



**METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA A
QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO
BASEADA NOS EFEITOS DA TEMPERATURA E DO
RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

MARCOS DIEGO DE CASTRO E SILVA

**TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA A
QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO
BASEADA NOS EFEITOS DA TEMPERATURA E DO
RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

MARCOS DIEGO DE CASTRO E SILVA

ORIENTADOR: ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO

TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE.TD – 163/20

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

CASTRO E SILVA, MARCOS DIEGO DE

Metodologia Alternativa para a Quantificação do Desequilíbrio de Tensão Baseada nos Efeitos da Temperatura e do Rendimento de Motores de Indução Trifásicos [Distrito Federal] 2020.

xv, 72p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Doutor, Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia).

Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1. Quantificação do Desequilíbrio de Tensão | 2. Motor de Indução Trifásico |
| 3. Temperatura | 4. Rendimento |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, M. D. C. (2020). Metodologia Alternativa para a Quantificação do Desequilíbrio de Tensão Baseada nos Efeitos da Temperatura e do Rendimento de Motores de Indução Trifásicos. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.TD – 163/20, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 72p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marcos Diego de Castro e Silva.

TÍTULO: Metodologia Alternativa para a Quantificação do Desequilíbrio de Tensão Baseada nos Efeitos da Temperatura e do Rendimento de Motores de Indução Trifásicos.

GRAU: Doutor ANO: 2020

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

Marcos Diego de Castro e Silva
mdiego_86@hotmail.com
Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de tudo a Deus, por sua graça e por ter me capacitado a chegar onde estou.

Aos meus pais e familiares, que me deram todo o suporte e condições necessárias à minha formação. A eles que sempre estiveram ao meu lado e dedicam suas vidas para oferecer o melhor a seus filhos.

Ao professor Anésio de Leles, cuja relação se estende de longa data e sua orientação foi fundamental para meu crescimento e viabilizou a realização desta pesquisa. Pela sua paciência, dedicação a execução desta tese e solicitude em ajudar sempre que necessário.

Aos colegas do laboratório e do SG-11, pela relação de amizade proporcionada, companheirismo e momentos de descontração.

À Universidade de Brasília e aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, pela inestimável contribuição em minha formação acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro, através da bolsa concedida.

O presente estudo foi realizado no âmbito do Programa de P&D da ANEEL, na Chamada ANEEL Nº 001/2016 "Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior", e do Termo de Cooperação Técnica 502/2018, celebrado entre CEB Distribuição S.A. e Fundação Universidade de Brasília, intitulado "Geração Distribuída no Campus da Universidade de Brasília Integrada à Rede de Distribuição da CEB"

RESUMO

METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO BASEADA NOS EFEITOS DA TEMPERATURA E DO RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Apesar da existência na literatura atinente de inúmeros trabalhos que relatam a incapacidade dos tradicionais indicadores de desequilíbrio de tensão (DT) de traduzirem com a devida precisão as condições sob as quais eles estão associados, segue incipiente o volume de estudos que proponham formas alternativas para a quantificação desse fenômeno de qualidade da energia elétrica. Neste cenário, alguns autores têm sugerido o uso do indicador de DT oriundo do método das componentes simétricas, designado de VUF, em conjunto com i) a diferença angular entre as componentes de tensão de sequência negativa (\bar{V}_2) e positiva (\bar{V}_1), ou ii) com o módulo da componente de sequência positiva (V_1). No entanto, o uso conjunto de dois ou mais indicadores para a quantificação do desequilíbrio torna o processo de estabelecimento de níveis de compatibilidade desse fenômeno mais complexo.

Considerando-se os aspectos ora mencionados, surgiu a ideia de desenvolvimento deste estudo que tem como objetivo apresentar uma metodologia alternativa para a quantificação do DT desenvolvida com base nos efeitos desse fenômeno na temperatura e no rendimento de motores de indução trifásicos (MIT). Tal metodologia permite obter um indicador para a quantificação do desequilíbrio (WVUF) que contempla os efeitos combinados dos módulos e dos ângulos de \bar{V}_2 e \bar{V}_1 . Com o propósito de aplicar essa metodologia e avaliar o seu desempenho em laboratório, um MIT é submetido a um conjunto abrangente de condições de tensões equilibradas e desequilibradas. Dos resultados destes ensaios e do emprego da metodologia proposta, constata-se que o WVUF, quando comparado ao VUF, reduz as incertezas inerentes ao processo de quantificação do DT.

Com isso, é possível inferir que a metodologia apresentada neste trabalho resultou em um indicador que representa os efeitos conjuntos de \bar{V}_2 e de \bar{V}_1 na temperatura e no rendimento de motores conectados ao sistema elétrico. As vantagens vinculadas ao

WVUF o designam como uma alternativa potencial para aplicações industriais e também em substituição aos tradicionais métodos de quantificação do DT presentes nas principais normas que versam sobre o assunto.

ABSTRACT

ALTERNATIVE METHODOLOGY FOR VOLTAGE UNBALANCE QUANTIFICATION BASED ON THE EFFECTS OF TEMPERATURE AND EFFICIENCY OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS

Despite the existence of countless studies in the relevant literature that report the inability of the traditional voltage unbalance (VU) indicators to translate, with due precision, the conditions under which they are associated, the volume of studies that propose alternative ways for the quantification of this power quality phenomenon continues to be incipient. In this scenario, some authors have suggested the use of the VU indicator from the symmetric components method, called the VUF, together with i) the angular difference between the negative (\bar{V}_2) and positive (\bar{V}_1) sequence voltage components, or ii) with the module of the positive sequence component (V_1). However, the joint use of two or more indicators for the quantification of the unbalance makes the process of establishing the compatibility levels of this phenomenon more complex.

Considering the aspects mentioned above lead to the idea of developing this study, which aims to present an alternative methodology for the quantification of VU, developed based on the effects of this phenomenon on the temperature and efficiency of three-phase induction motors (TIM). Such methodology allows the obtaining of an indicator for the quantification of the unbalance (WVUF) that contemplates the combined effects of the modules and angles of \bar{V}_2 and \bar{V}_1 . In order to apply this methodology and evaluate its performance in the laboratory, a TIM is subjected to a comprehensive set of balanced and unbalanced voltage conditions. From the results of these tests and the use of the proposed methodology, it was observed that the WVUF, when compared to the VUF, reduces the uncertainties inherent to the VU quantification process.

Thus, it is possible to infer that the methodology presented in this work resulted in an indicator that represents the joint effects of \bar{V}_2 and \bar{V}_1 on the temperature and efficiency of motors connected to the electrical system. The advantages linked to the WVUF designate it as a potential alternative for industrial applications and for replacing the traditional methods used for quantifying VU present in the major standards that deal with the subject.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – MOTIVAÇÃO	1
1.2 – CONTEXTO E OBJETIVOS	2
1.3 – CONTRIBUIÇÕES	5
1.4 – ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	5
2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	7
2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	7
2.2 – CONCEITOS E METODOS PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES	7
2.2.1 – Método 1: Componentes Simétricas	7
2.2.2 – Método 2: CIGRÉ	11
2.2.3 – Método 3: ANSI e NEMA	12
2.2.4 – Método 4: IEEE std. 141	12
2.3 – CAUSAS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	13
2.4 - EFEITOS DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÕES	13
2.5 – DOCUMENTOS NORMATIVOS E RECOMENDAÇÕES SOBRE O DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	14
2.5.1 – Síntese das Normas e Recomendações sobre o Desequilíbrio	15
2.5.1.1 – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.....	15
2.5.1.2 – Procedimentos de Rede.....	15
2.5.1.3 – Recomendação IEC 61000-4-30.....	16
2.5.1.4 – Norma Europeia CENELEC.....	16
2.5.2 – Resumo Comparativo sobre os Documentos Consultados	16
2.6 – ANÁLISES CRÍTICAS SOBRE AS METODOLOGIAS EM PRÁTICA PARA O CÁLCULO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	17
2.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
3 – MÉTODOS E PROCEDIMENTOS	21
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
3.2 – INFRAESTRUTURA LABORATORIAL	21
3.3 – BANCOS DE DADOS APLICADOS AO MOTOR	26
3.4 – MODELO TÉRMICO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	28

3.5.5 – Técnica de Otimização Aplicada ao Modelo Térmico do Motor	30
3.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
4 – AVALIAÇÃO CRÍTICA DOS MÉTODOS EMPREGADOS PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	33
4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	33
4.2 – ANÁLISE GRÁFICA DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	33
4.3 – ANÁLISE CRÍTICA DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	42
4.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5 – PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	48
5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	48
5.2 – PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	48
5.2.1 – Obtenção da Temperatura e do Rendimento de um Motor submetido a Condições Equilibradas e Desequilibradas	49
5.2.2 - Modelagem dos Comportamentos Médios das Variações da Temperatura e do Rendimento do Motor	50
5.2.3 – Modelagem dos Comportamentos Médios Conjuntos das Variações da Temperatura e do Rendimento do Motor	53
5.2.4 – Formulação do Indicador Proposto para a Quantificação do Desequilíbrio de Tensão	55
5.3 – AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA ALTERNATIVA PROPOSTA	56
5.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
6 – CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Índices de Conformidades.	17
Tabela 3.1 – Composição do banco de dados BD ₁	26
Tabela 3.2 - Grandezas empregadas na ferramenta matemática de otimização para a obtenção dos coeficientes do modelo térmico do MIT.	30
Tabela 3.3 – Coeficientes empregados no modelo térmico do MIT.	30
Tabela 4.1 – Valores de base empregados nos testes com o MIT.	43
Tabela 4.2 – Fatores de escalas aplicados à T e ao η para a avaliação comparativa entre o VUF, PVUR e o LVUR.	44
Tabela 4.3 – Valores das faixas de variações da T e do η para a condição em que os indicadores VUF, PVUR e LVUR normalizados valem 2%.	45
Tabela 5.1 – Coeficientes das funções $F(V_2)$, $G(V_1)$ e $H(\theta_2, V_2)$ de acordo com os pesos da T e do η	57
Tabela 5.2 – Fatores de escalas aplicados à T e ao η para o $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e o $WVUF_{0,0,0}$	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Diagrama fasorial de um conjunto de tensões trifásicas desequilibradas e as suas componentes simétricas de sequência (b) positiva, (c) zero e (d) negativa.	9
Figura 3.1 – Aparato experimental para ensaios no MIT.	22
Figura 3.2 – Equipamentos que constituem o sistema de controle.	24
Figura 3.3 – Detalhes dos sensores e dos equipamentos conectados ao motor e ao gerador.	25
Figura 3.4 – Detalhes do computador e dos medidores de grandezas elétricas.	25
Figura 3.5 – Detalhe da carga resistiva.	26
Figura 3.6 - Correntes de fase do MIT lidas com a aplicação dos bancos de dados BD ₁ e BD ₂	27
Figura 3.7 – Circuito térmico equivalente do MIT.	28
Figura 4.1 – (a) Diagrama fasorial de um conjunto de tensões trifásicas desequilibradas e as suas componentes simétricas de sequência (b) positiva, (c) zero e (d) negativa.	34
Figura 4.2 – Decomposição fasorial das componentes simétricas de tensões.	34
Figura 4.3 – Decomposição fasorial das componentes simétricas de tensões empregando a método de deslocamento do ponto de neutro.	35
Figura 4.4 – Tensões de fase e de linha para as seguintes condições: i) $CVUF_2 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$; e ii) $CVUF_2 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$	36
Figura 4.5 – Tensões de fase e de linha para: i) $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$; e ii) $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 20\% \angle 45^\circ$	36
Figura 4.6 – Comportamento das tensões de fase para as condições: i) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$; ii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$; e iii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$	37
Figura 4.7 – Comportamento das tensões de linha para as condições: i) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$; ii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$; e iii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$	39
Figura 4.8 – Tensões de linha e de fase para: i) $CVUF_0 = 20\angle 45^\circ \%$ e $CVUF = 20\angle 60^\circ \%$; e ii) $CVUF_0 = 20\angle 45^\circ \%$ e $CVUF = 40\angle 60^\circ \%$	39
Figura 4.9 – Tensões de linha e de fase para: i) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$, $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$ e $V_1 = 1$ p.u.; e ii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$, $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$ e $V_1 = 0,92$ pu.	40
Figura 4.10 – Lugar geométrico das amplitudes das tensões resultantes de $VUF = 0\%$, $CVUF_0 = 1,164\angle 89,667^\circ \%$, e com ângulos das tensões das fases A, B e C iguais a 0° , -121° e 119° , respectivamente. V_1 varia de 0.9 a 1.05 p.u.	41
Figura 4.11 – Valores da T do MIT submetido ao BD ₁ em função do VUF, PVUR e LVUR.	43
Figura 4.12 – Valores do η do MIT submetido ao BD ₁ em função do VUF, PVUR e LVUR.	43

Figura 4.13 – Valores da T do MIT submetido ao BD_1 em função do VUF, PVUR e LVUR após as mudanças de escalas no eixo X.....	45
Figura 4.14 – Valores do η do MIT submetido ao BD_1 em função do VUF, PVUR e LVUR após as mudanças de escalas no eixo X.....	45
Figura 5.1 – Comportamento (a) da T e (b) do η em função de V_2	50
Figura 5.2 – Comportamento (a) da T e (b) do η em função de V_1	50
Figura 5.3 – Comportamento (a) da T e (b) do η do MIT em função de θ_2 e V_2	50
Figura 5.4 – Comportamentos médios da (a) T e do (b) η em função de V_2 oriundos das regressões numéricas.	51
Figura 5.5 – Comportamentos médios da (a) T e do (b) η em função de V_1 oriundos das regressões numéricas.	52
Figura 5.6 – Comportamentos médios da (a) T e do (b) η do MIT em função de θ_2 e V_2 , oriundos da aplicação de regressões numéricas.	52
Figura 5.7 – Variações médias da T e do η em função de (a) V_2 e (b) V_1	53
Figura 5.8 – Variações médias da T e do η em função de (a) V_2 e (b) V_1 após a aplicação das mudanças de escalas.....	55
Figura 5.9 – T em função dos indicadores VUF, $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$	57
Figura 5.10 – T em função dos indicadores VUF, $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$ após as mudanças de escalas no eixo X.....	59
Figura 5.11 – η em função dos indicadores VUF, $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$ após as mudanças de escalas no eixo X.....	59
Figura 5.12 – Faixa de variação da T em função dos indicadores VUF, $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$	60
Figura 5.13 – Faixa de variação do η em função dos indicadores VUF, $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$	60

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

Nomenclaturas:

- ANSI - *American National Standards Institute*;
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;
- CIGRÉ - *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*;
- DT - Desequilíbrio de Tensão;
- IEC - *International Electrotechnical Commission*;
- IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*;
- MIT - Motor de Indução Trifásico;
- NEMA - *National Electrical Manufacturers Association*;
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico;
- PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional;
- WVUF - *Weighed Voltage Unbalance Factor*. Indicador de desequilíbrio de tensão proposto neste trabalho.

Símbolos:

- \bar{V}_0 - fasor da componente de tensão de sequência zero;
- \bar{V}_1 - fasor da componente de tensão de sequência positiva;
- \bar{V}_2 - fasor da componente de tensão de sequência negativa;
- \bar{V}_A - fasor da tensão na fase A;
- \bar{V}_B - fasor da tensão na fase B;
- \bar{V}_C - fasor da tensão na fase C;
- θ_0 - ângulo do fasor da componente de tensão de sequência zero;
- θ_2 - ângulo do fasor da componente de tensão de sequência negativa;
- V_0 - módulo do fasor da componente de tensão de sequência zero;
- V_1 - módulo do fasor da componente de tensão de sequência positiva;
- V_2 - módulo do fasor da componente de tensão de sequência negativa;
- V_A - módulo da tensão na fase A;
- V_B - módulo da tensão na fase B;
- V_C - módulo da tensão na fase C;
- V_{AB} - módulo da tensão de linha entre as fases A e B;

V_{BC}	- módulo da tensão de linha entre as fases B e C;
V_{CA}	- módulo da tensão de linha entre as fases C e A;
VUF_0	- <i>Voltage Unbalance Factor of Zero Sequence</i> . Fator de desequilíbrio de tensão de sequência zero;
VUF	- <i>Voltage Unbalance Factor</i> . Fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa;
$CVUF_0$	- <i>Complex Voltage Unbalance Factor of Zero Sequence</i> . Fator de desequilíbrio de tensão complexo de sequência zero;
$CVUF$	- <i>Complex Voltage Unbalance Factor</i> . Fator de desequilíbrio de tensão complexo de sequência negativa;
$LVUR$	- <i>Line Voltage Unbalance Rate</i> . Razão de desequilíbrio de tensão de linha;
$PVUR$	- <i>Phase Voltage Unbalance Rate</i> . Razão de desequilíbrio de tensão de fase;
$\Delta V_{L,Max}$	- máxima diferença entre as tensões de linha medidas e $\Delta V_{L,Médio}$;
$\Delta V_{L,Médio}$	- média das tensões de linha;
$\Delta V_{F,Max}$	- máxima diferença entre as tensões de fase medidas e $\Delta V_{F,Médio}$;
$\Delta V_{F,Médio}$	- média das tensões de fase;
$\Delta V_{F,Max}$	- máxima diferença entre as tensões de fase medidas e $\Delta V_{F,Médio}$;
$\Delta V_{F,Médio}$	- média das tensões de fase;
η	- rendimento do MIT;
Q_A	- calor gerado no enrolamentos do estator da fase A (W);
Q_B	- calor gerado no enrolamentos do estator da fase B (W);
Q_C	- calor gerado no enrolamentos do estator da fase C (W);
T_A	- temperatura no enrolamento do estator na fase A (°C);
T_B	- temperatura no enrolamento do estator na fase B (°C);
T_C	- temperatura no enrolamento do estator na fase C (°C);
T_{Amb}	- temperatura do ar ambiente (°C);
R_A	- resistência elétrica do enrolamento do estator da fase A;
R_B	- resistência elétrica do enrolamento do estator da fase B;
R_C	- resistência elétrica do enrolamento do estator da fase C;
I_A	- corrente elétrica que circula pelo enrolamento do estator da fases A;
I_B	- corrente elétrica que circula pelo enrolamento do estator da fases B;
I_C	- corrente elétrica que circula pelo enrolamento do estator da fases C;
k_A	- coeficiente de condutividade térmica entre o enrolamento do estator na fase A e o ar ambiente (W/°C);

- k_B - coeficiente de condutividade térmica entre o enrolamentos do estator na fase B e o ar ambiente ($W/^\circ C$);
- k_C - coeficiente de condutividade térmica entre o enrolamento do estator na fase B e o ar ambiente ($W/^\circ C$);
- k_{AB} - coeficiente de condutividade térmica entre os enrolamentos do estator na fase A e B ($W/^\circ C$);
- k_{BC} - coeficiente de condutividade térmica entre os enrolamentos do estator na fase B e C ($W/^\circ C$);
- k_{CA} - coeficiente de condutividade térmica entre os enrolamentos do estator na fase C e A ($W/^\circ C$);
- T - máxima temperatura entre as três fases dos enrolamentos do estator do MIT.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, estudiosos de diversos países têm enveredado esforços para a identificação dos efeitos do desequilíbrio de tensão (DT) em equipamentos dos sistemas elétricos, e para a análise dos indicadores dedicados à sua quantificação (Lee, 1999; Wang, 2001; Faiz *et al.*, 2004; Kini *et al.*, 2007; Gnacinski, 2009; Anwari e Hiendro, 2010; Silva, 2014; Silva *et al.*, 2016; Sen Kurt *et al.*, 2017; El-Kharashi *et al.*, 2018). Com isso, hoje, sabe-se que a presença de altos níveis de desequilíbrio provoca, dentre outros problemas, acréscimo das perdas, sobreaquecimento, solicitação do isolamento, redução da vida útil de motores e transformadores, e o acionamento indevido dos seus sistemas de proteção, levando à parada dos processos de produção. Ademais, sob tais condições, podem ser produzidas correntes harmônicas não características, tornando ainda mais árdua a tentativa de mitigação dos seus efeitos. Por esta razão, caracteriza-se como relevante a definição de indicadores, metodologias de quantificação e limites toleráveis para o DT, de forma a atender alguns dos aspectos fundamentais da qualidade da energia, quais sejam:

- A operação normal do sistema;
- O atendimento aos consumidores dentro de padrões de qualidade satisfatórios;
- A preservação da vida útil de elementos e equipamentos do sistema elétrico; e
- As questões de caráter econômico e legal.

Não obstante o reconhecimento da existência de um procedimento mundialmente utilizado e, em consonância com as demandas do momento, especialistas da área têm desenvolvido e encorajado investigações destinadas à determinação de índices de quantificação do DT, que expressem adequadamente os possíveis efeitos causados por uma rede com tensões desequilibradas. Por se tratar de um problema que envolve cinco variáveis, a saber, as três amplitudes e os dois ângulos das tensões, quase sempre obtêm-

se resultados úteis para condições específicas, as quais podem não representar a maioria dos casos práticos (Wang, 2001). Em função disso, na literatura atinente, têm-se trabalhos que relatam a incapacidade dos tradicionais indicadores de DT de traduzirem com a devida precisão as condições sob as quais eles estão associados. Isto ocorre pelo fato de que diferentes efeitos em equipamentos elétricos podem estar vinculados a um mesmo nível de DT (Lee, 1999; Wang, 2001; Faiz *et al.*, 2004; Kini *et al.*, 2007; Gnacinski, 2009; Anwari e Hiendro, 2010; Silva, 2014; Silva *et al.*, 2016; Sen Kurt *et al.*, 2017; El-Kharashi *et al.*, 2018). Cabe ressaltar que, em geral, constatações deste tipo são encontradas em trabalhos que empregam em suas análises motores de indução trifásicos (MIT), pois este tipo de equipamento é reconhecidamente sensível ao DT. Ademais, os MIT possuem uma grande participação nas cargas dos sistemas elétricos (cerca de 70% a 80% das cargas elétricas), sobretudo nas indústrias (Cordoba *et al.*, 2017; Souto *et al.*, 2000; Corres *et al.*, 2006; Abbi e Jain, 2006).

Com base nos aspectos ora citados, apresentam-se neste trabalho os resultados de estudos teóricos e práticos sustentados por equacionamentos matemáticos, simulações computacionais e análises calcadas em resultados de ensaios em laboratório. Tais pesquisas visam, dentre outras metas, i) avaliar a eficácia do índice de quantificação do desequilíbrio de tensão mais empregado pelas normas e recomendações em todo o mundo, no que diz respeito à sua correlação com os efeitos provocados pela presença do mencionado fenômeno, e ainda, propor uma metodologia alternativa voltada à quantificação do DT.

1.2 – CONTEXTO E OBJETIVOS

Em 2018, entrou em vigor a nova versão dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST, 2018) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O PRODIST institui os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica para redes de distribuição, considerando-se a qualidade do produto e do serviço prestados. Na apresentação de cada fenômeno de qualidade abordado neste documento, são estabelecidos a terminologia, a metodologia de medição, a instrumentação e os valores de referência.

Para o sistema de transmissão, têm-se desde janeiro de 2017, segundo (ONS, 2017), os “Padrões de Desempenho da Rede Básica”. Seu propósito é subsidiar os usuários conectados, ou que requeiram conexão, com informações necessárias sobre os padrões de desempenho a serem atendidos pelo sistema em questão.

Nos referidos documentos são utilizados como indicadores, para comparação com os limites das normas, os valores que foram superados em apenas 5% dos registros obtidos, calculados com base em uma das duas metodologias que serão devidamente explicitadas no item 2.2.1 do Capítulo 2 (Método das componentes simétricas e do CIGRÉ).

De fato, com a execução de medições que respeitem essas condições, obtêm-se diversos valores dos indicadores relacionados ao supracitado fenômeno, destinados a abranger o ciclo de operação de cargas ou processos, bem como o efeito de um ou mais consumidores envolvidos. Considerando-se que as recomendações e normas estabelecem, entre outros aspectos, valores limites para tais índices, os quais devem ser respeitados, torna-se possível a caracterização e a classificação das barras e (ou) dos pontos de interesse (ONS, 2017).

No caso da constatação de não conformidades, espera-se que sejam tomadas medidas capazes de conduzir os efeitos dos DT a níveis estrategicamente escolhidos. Para tanto, há de se ter disponíveis meios eficientes que viabilizem a detecção dos valores que as amplitudes e os ângulos das tensões devem assumir para encaminhar o sistema a uma condição de funcionamento sem ameaças de danos.

Contudo, sabe-se que para se evitar e reduzir de forma eficaz os efeitos nocivos que a presença do DT pode provocar, necessariamente, deve-se fazer uso de um indicador de quantificação do citado fenômeno capaz de associar a sua amplitude aos impactos que ele pode produzir em cargas como o MIT.

Dentro do contexto ora apresentado, alguns aspectos demandam destaque. São eles:

- A quantificação de um fenômeno como o DT requer metodologias que mantenham uma elevada correlação com os seus possíveis efeitos em equipamentos do sistema elétrico.

Hoje, os mesmos não apresentam fundamentação e justificativas claras quanto às suas escolhas e aplicações;

- Os equipamentos modernos apresentam ampla diversidade de modelos e de características e, em consequência, sensibilidades diferentes aos possíveis valores de tensão que constituem o desequilíbrio;
- Não há padrões de desempenho ou de imunidade de equipamentos submetidos às diversas condições de DT; e
- A atenuação de tal fenômeno requer, em alguns casos, soluções de custo elevado.

A ideia desta tese origina-se no reconhecimento e exame desses aspectos, considerando-se que satisfazer determinados métodos de cálculos do desequilíbrio e limites de normas, ambos desnecessariamente rígidos, constitui um contrassenso que pode implicar em gastos e (ou) penalizações indevidas.

Tendo em mente tal lacuna, as metas desta tese são:

- a) Analisar o comportamento dos módulos e dos ângulos das tensões de fase e de linha frente a variação das amplitudes e dos ângulos das componentes de sequência das tensões. Com base nestes resultados, torna-se factível a determinação dos possíveis inconvenientes relacionados aos seus empregos;
- b) Propor uma metodologia alternativa para a quantificação do DT, cuja aplicação culmina em um indicador capaz de reduzir as incertezas inerentes à quantificação desse fenômeno; e
- c) Avaliar comparativamente o indicador encontrado com aqueles tradicionalmente empregados para a quantificação do DT.

Uma vez estabelecida e aplicada a metodologia proposta neste estudo, a avaliação da sua eficácia é realizada por meio da identificação das faixas de variações das temperaturas e

dos rendimentos de um MIT sob teste. Com isso, o desempenho do indicador pode ser comparado relativamente aos demais (reconhecidos em normas e aceitos pela comunidade científica).

1.3 – CONTRIBUIÇÕES

Dentre as principais contribuições oriundas do desenvolvimento deste estudo, pode-se destacar os seguintes tópicos:

- Análise crítica de algumas condições de DT estrategicamente selecionadas, que promovem uma melhor compreensão de como as tensões de linha e de fase de um sistema elétrico se comportam frente às variações das componentes simétricas de tensão. Desta avaliação é possível identificar as limitações dos atuais métodos de quantificação do DT; e
- Proposição de uma metodologia que resulta em um novo indicador o qual, quando comparado aos tradicionais métodos de cálculo do DT, culmina em avanços no tocante à precisão do processo de quantificação.

1.4 – ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este trabalho é estruturado em seis capítulos que buscam, em seu conjunto, a consecução dos objetivos desta tese.

A presente unidade tem como meta contextualizar e proporcionar as motivações para a execução deste estudo, bem como apresentar os seus objetivos e as contribuições que dele podem ser extraídas.

O Capítulo 2 é destinado a apresentar um resumo dos principais fundamentos associados aos desequilíbrios de tensões dos sistemas elétricos de potência, e sobretudo, as normas e (ou) recomendações nacionais e internacionais referentes a este tópico.

O Capítulo 3 é direcionado à descrição dos detalhes referentes à infraestrutura laboratorial e aos procedimentos utilizados na execução deste estudo. Os assuntos apresentados nesta

unidade fornecem subsídios, tanto para a avaliação crítica dos tradicionais métodos de quantificação do DT, quanto para a aplicação da metodologia alternativa proposta neste estudo.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados de uma análise crítica do DT. Com esse propósito: i) mostra-se como as tensões de linha e de fase de um sistema elétrico se comportam frente às variações das componentes simétricas de tensão; e ii) realiza-se uma análise dos tradicionais métodos dedicados à quantificação do DT. Os resultados destas duas avaliações permitem identificar os principais aspectos que se caracterizam como limitações dos indicadores e dos métodos hoje disponíveis para a quantificação do mencionado fenômeno.

No Capítulo 5, inicialmente, é exposta a metodologia proposta nesta tese para a quantificação do DT. A aplicação desta metodologia resulta em um indicador para a quantificação do mencionado fenômeno. São também exibidos e analisados os resultados da aplicação da metodologia proposta sobre os valores de rendimento e temperatura de um MIT, adquiridos em laboratório. Em seguida, são apresentados os procedimentos adotados para se avaliar a eficácia desse indicador em associar os efeitos do DT.

O Capítulo 6 ilustra as principais conclusões da tese, as suas contribuições relevantes, bem como as sugestões de trabalhos futuros.

2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Posto que as investigações realizadas neste trabalho direcionam-se à proposição de uma metodologia alternativa para a quantificação do DT, o presente capítulo tem por objetivo principal apresentar a definição e os principais tópicos que compõem o termo desequilíbrio de tensão. Neste contexto, é dado um enfoque à conceituação e aos métodos de cálculo deste fenômeno. São abordados as suas causas e seus efeitos sobre os equipamentos da rede elétrica. São também expostos as principais diretrizes que constituem as normas internacionais e nacionais que abordam o DT. Em seguida, são citados e avaliados os resultados de um levantamento bibliográfico referente à quantificação do desequilíbrio e seus efeitos sobre os equipamentos do sistema elétrico.

2.2 – CONCEITOS E METODOS PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILIBRIO DE TENSÕES

Em sistemas trifásicos, o DT corresponde a um fenômeno de qualidade da energia elétrica que ocorre quando os sinais senoidais das tensões apresentam qualquer assimetria em suas amplitudes ou defasagem angular entre eles diferentes de 120 graus elétricos (PRODIST, 2018).

Na literatura atinente e em documentos normativos podem ser encontradas diferentes metodologias de cálculos do DT. Em função disso, nesta seção, são expostos os procedimentos para a obtenção dos indicadores do DT mais comumente empregados.

2.2.1 – Método 1: Componentes Simétricas

O método das Componentes Simétricas é alicerçado nos estudos de Fortescue que datam do ano de 1918 (Fortescue, 1918). O Teorema de Fortescue estabelece que:

“Qualquer grupo desequilibrado de n fasores associados, do mesmo tipo, pode ser resolvido em n grupos de fasores equilibrados, denominados componentes simétricas dos fasores originais”. (Fortescue, 1918).

Assim, um sistema trifásico desequilibrado com sequência de fases ABC pode ser decomposto em três sistemas simétricos e equilibrados, a saber:

- Um conjunto de fasores trifásicos e equilibrados, na mesma sequência de fases dos fasores originais desequilibrados, denominados sistema de sequência positiva (ou sistema de sequência direta);
- Um conjunto de fasores trifásicos e equilibrados, na sequência de fases inversa aos fasores originais desequilibrados, denominados sistema de sequência negativa (ou sistema de sequência inversa); e
- Um conjunto de fasores trifásicos paralelos, denominados sistema de sequência zero.

A determinação analítica das componentes simétricas se dá com base no uso da matriz de transformação de Fortescue, segundo as equações matriciais (2.1) e (2.2):

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde: α corresponde ao fasor unitário de valor $1 \angle 120^\circ$; \bar{V}_A , \bar{V}_B e \bar{V}_C correspondem, respectivamente, às tensões de fases; e \bar{V}_0 , \bar{V}_1 e \bar{V}_2 são, respectivamente, as componentes simétricas de tensões de sequência zero, positiva e negativa.

Opcionalmente, as componentes de tensões de sequência positiva e negativa podem ser obtidas por meios das tensões de linha pela aplicação da equação (2.3). Para o processo inverso, deve-se empregar a equação (2.4).

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{0,L} \\ \bar{V}_{1,L} \\ \bar{V}_{2,L} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_{AB} \\ \bar{V}_{BC} \\ \bar{V}_{CA} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{AB} \\ \bar{V}_{BC} \\ \bar{V}_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{V}_{1,L} \\ \bar{V}_{2,L} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

O valor de $\bar{V}_{0,L}$, equação (2.3), é sempre igual a zero, pois esta componente corresponde a um terço da soma das três tensões de linhas, cuja soma fasorial é nula. Cabe destacar que $\bar{V}_{1,L} = \sqrt{3} \angle 30^\circ \times \bar{V}_1$ e $\bar{V}_{2,L} = \sqrt{3} \angle -30^\circ \times \bar{V}_2$.

Visando-se exemplificar graficamente a relação entre as tensões de sequência de fase e as componentes simétricas, na Figura 2.1 são exibidos os diagramas fasoriais para um conjunto de tensões trifásicas desequilibradas (de fase), e também as respectivas componentes simétricas resultantes da sua decomposição.

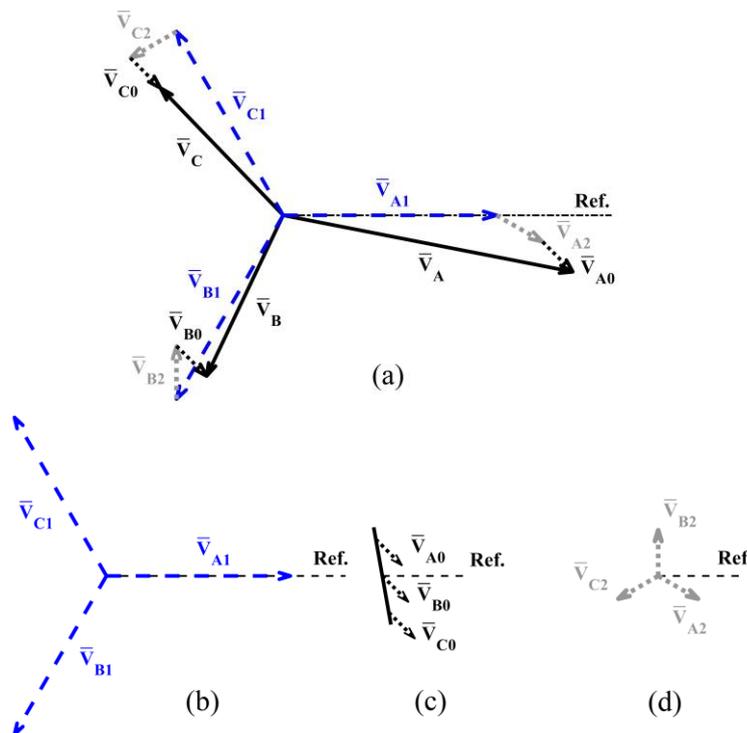


Figura 2.1 – (a) Diagrama fasorial de um conjunto de tensões trifásicas desequilibradas e as suas componentes simétricas de sequência (b) positiva, (c) zero e (d) negativa.

Nota-se da Figura 2.1 que os fasores da componente de sequência zero estão em fase. Assim sendo, o \bar{V}_0 representa um elemento de tensão constante e não girante em relação

à referência angular de \bar{V}_1 . Este aspecto resulta em interpretações físicas que repercutem diretamente nas aplicações que envolvem DT, a saber:

- a) Em cargas a três fios (delta ou estrela com ponto de neutro flutuante), o \bar{V}_0 é incapaz de produzir uma corrente de sequência zero (I_0), pois não há caminho para a circulação desta corrente; e
- b) Por outro lado, se a carga for conectada a quatro fios (estrela aterrada), há a circulação do I_0 . Neste caso, pode-se verificar que o módulo da corrente no condutor de neutro é três vezes maior do que o I_0 .

De acordo com o método das componentes simétricas, o DT é dado pela razão entre os módulos da tensão de sequência negativa e positiva (PRODIST, 2018), conforme mostra (2.5). Opcionalmente, o VUF_0 (do inglês *voltage unbalance factor of zero sequence*) também pode ser empregado. Este indicador é calculado conforme a expressão (2.6).

$$VUF = |\bar{V}_2/\bar{V}_1| = V_2/V_1 \quad (2.5)$$

$$VUF_0 = |\bar{V}_0/\bar{V}_1| = V_0/V_1 \quad (2.6)$$

Segundo a IEEE std. 1159, dentre os métodos de quantificação, este é o que melhor representa o grau de desequilíbrio devido à abordagem simultânea das amplitudes e dos ângulos das tensões. Ademais, a presença da componente de sequência negativa está intimamente ligada aos efeitos de mau funcionamento e interferências em diversos equipamentos conectados ao sistema. Entretanto, na literatura, é possível encontrar autores que ao avaliarem o VUF, o desaprovam em função da sua incapacidade de associar satisfatoriamente o seu módulo aos efeitos do DT (Wang, 2001; Anwari e Hiendro, 2010; Silva, 2014; Silva et al., 2016; El-Kharashi et al., 2018). Por este motivo, alguns trabalhos científicos empregam a definição do fator de desequilíbrio de tensão complexo (CVUF – do inglês *complex voltage unbalance factor*), conforme mostra a equação (2.7). Observa-se que o método de cálculo do CVUF é similar ao do VUF, com a diferença de que o primeiro indicador contempla as defasagens angulares entre as

componentes de tensão de sequência negativa e positiva (θ_2). Com isso, o CVUF proporciona mais informação sobre a natureza do DT do que o VUF.

Embora os estudos acadêmicos estejam preponderantemente focados na utilização da componente de sequência negativa, dado que os motores são, em geral, conectados a três fios, da mesma forma como anteriormente mencionado, tem-se a definição do fator de desequilíbrio de tensão complexo de sequência zero (CVUF₀ – do inglês *complex voltage unbalance fator of zero sequence*). O CVUF₀ é definido conforme a expressão (2.8).

$$\text{CVUF} = \bar{V}_2/\bar{V}_1 = V_2/V_1 \angle \theta_2 \quad (2.7)$$

$$\text{CVUF}_0 = \bar{V}_0/\bar{V}_1 = V_0/V_1 \angle \theta_0 \quad (2.8)$$

Documentos como (Bollen, 2006) e (Pillay e Hofmann, 2001) rotulam o VUF como o verdadeiro indicador de desequilíbrio. Segundo a IEEE std. 1159, este método de cálculo é o mais confiável, pois ele representa diretamente o fenômeno de DT sem aproximações. Por estas razões, tradicionalmente, o VUF é o indicador empregado para a quantificação do DT.

Mediante ao fato de muitos instrumentos de medição não disponibilizarem os ângulos das tensões, métodos alternativos de cálculo foram criados. Tais metodologias fazem uso apenas das amplitudes das tensões trifásicas. A seguir, são apresentados alguns destes métodos.

2.2.2 – Método 2: CIGRÉ

Neste método, descrito pelas equações (2.9) e (2.10), somente os módulos das tensões de linha são empregados. Ele foi elaborado para se contornar a impossibilidade de alguns aparelhos de medirem os ângulos das tensões de fase.

$$\text{VUF} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100\% \quad (2.9)$$

$$\beta = \frac{|V_{AB}|^4 + |V_{BC}|^4 + |V_{CA}|^4}{(|V_{AB}|^2 + |V_{BC}|^2 + |V_{CA}|^2)^2} \quad (2.10)$$

Ressalta-se que o método CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques) é equivalente ao das componentes simétricas, pois ambos retornam o mesmo valor em módulo para o VUF. A demonstração matemática dessa equivalência pode ser verificada em (Bollen, 2006).

2.2.3 – Método 3: ANSI e NEMA

O ANSI e a NEMA (do inglês, *American National Standards Institute* e *National Electrical Manufacturers Association*) estabelecem o cálculo do indicador LVUR (do inglês *line voltage unbalance rate*) como expresso na equação (2.11).

$$LVUR = \frac{\Delta V_{L,Max}}{\Delta V_{L,Médio}} \times 100\% \quad (2.11)$$

onde: $\Delta V_{L,Max}$ é a máxima diferença entre as tensões de linha medidas, e o $\Delta V_{L,Médio}$ é a média das tensões de linha.

Segundo a IEEE std. 1159, o método de cálculo do LVUR resulta em valores que se aproximam do fornecido pelo método das componentes simétricas, caso: i) as tensões de linha sejam utilizadas; ii) o conteúdo harmônico do sinal seja baixo; e iii) se a componente de sequência zero for pequena.

2.2.4 – Método 4: IEEE std. 141

O indicador PVUR (do inglês *phase voltage unbalance rate*) apresentado pela IEEE std. 141 é calculado conforme a equação (2.12) (Bollen, 2006).

$$PVUR = \frac{\Delta V_{F,Max}}{\Delta V_{F,Médio}} \times 100\% \quad (2.12)$$

onde: $\Delta V_{F,Max}$ é a máxima diferença entre as tensões de fases medidas e $\Delta V_{F,Médio}$; e $\Delta V_{F,Médio}$ é a média das tensões de fase.

2.3 – CAUSAS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Podem-se citar como causas do DT os seguintes aspectos (Filho, 2008):

- distribuição irregular de cargas monofásicas ou de geração própria de energia;
- linhas de distribuição extensas, particularmente as linhas monofásicas e de áreas de distribuição rurais;
- numerosos conjuntos de usuários urbanos, com extenso volume de cargas monofásicas;
- impedâncias assimétricas de transformadores e de linhas de transmissão;
- transposição incompleta de linhas de transmissão;
- bancos de capacitores deteriorados e (ou) com fusíveis de proteção rompidos;
- equipamentos elétricos e máquinas rotativas com impedâncias desequilibradas;
- níveis divergentes de distorção harmônica nas fases do sistema elétrico;
- há também fatores que causam DT dinâmicos como a presença de interrupções, afundamentos, subtensões, sobretensões e transitórios elétricos.

2.4 - EFEITOS DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÕES

A presença de tensões desequilibradas nos sistemas elétricos industriais de potência constitui um dos mais habituais itens que comprometem o suprimento elétrico. Seus efeitos nos diversos equipamentos elétricos caracterizam-se como nocivos, tendo em vista que pequenos desequilíbrios nas tensões de alimentação podem resultar num elevado

nível de desequilíbrio nas correntes absorvidas e, conseqüentemente, causar sobreaquecimentos.

Os efeitos mais comuns do DT sobre o sistema elétrico e seus equipamentos (ANEEL, 2000), são:

- Surgimento de correntes de sequência negativa: tratam-se dos principais causadores de sobreaquecimento nas máquinas rotativas em corrente alternada (síncronas e assíncronas). Tais correntes também causam oscilações no conjugado, acarretando vibrações e fadiga mecânica nos eixos de rotação;
- Funcionamento inadequado e redução da vida útil de equipamentos;
- Sobreaquecimento e maior solicitação do material isolante dos condutores (em caso de cabos isolados), e aumento das perdas.

Quando é detectada a perda do padrão aceitável, em geral, são executadas medidas corretivas para a melhoria da qualidade dos sistemas elétricos. Contudo, reconhece-se que qualquer solução voltada à busca pela qualidade da energia implica necessariamente em investimentos, e conforme o caso, culmina em elevados custos financeiros. Em vista disso, usualmente, o que se observa é uma tentativa de convivência harmoniosa entre elementos do sistema elétrico e os problemas advindos dos distúrbios na tensão de suprimento (Bronzeado, 2002). Obviamente, este procedimento demanda uma atenção especial quando da avaliação dos impactos técnicos e econômicos advindos de tal interação.

2.5 – DOCUMENTOS NORMATIVOS E RECOMENDAÇÕES SOBRE O DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Nesta etapa do corrente capítulo, são abordadas questões relacionadas às normas internacionais e nacionais que versam sobre o DT. Para tanto, expõem-se de forma resumida os principais aspectos relacionados a cada uma destas normas, os indicadores empregados e os seus limites. Por fim, tem-se um quadro resumo comparativo para uma melhor visualização dos conteúdos dos diversos documentos.

2.5.1 – Síntese das Normas e Recomendações sobre o Desequilíbrio

2.5.1.1 – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST

No PRODIST, o fator de desequilíbrio de tensão é definido como a relação entre os módulos das componentes de tensão de sequência negativa e positiva, expressa em porcentagem desta última componente, conforme a equação (2.5).

A presente recomendação indica que o fator de desequilíbrio nos sistemas de distribuição deve ser limitado a 2% para barramentos acima de 1 kV, e em 3% nos pontos com tensão nominal abaixo de 1 kV.

Muito embora a recomendação em questão tenha se referido ao desequilíbrio na forma da relação entre as componentes de sequência negativa e positiva, a última revisão do PRODIST (2018) também estabelece como expressão para o cálculo do fator de desequilíbrio, a equação (2.9), referente ao método do CIGRÉ.

2.5.1.2 – Procedimentos de Rede

O indicador para avaliar o DT nos barramentos da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) é o fator de desequilíbrio de tensão que exprime a relação entre as componentes de sequência negativa e sequência positiva da equação (2.5). O limite global nos barramentos da Rede Básica é de 2%. Já os limites individuais, determinados por meio de cálculos específicos para cada instalação que contenha equipamentos com características não lineares que produzam tais efeitos são iguais a 1,5%.

O valor do indicador a ser comparado com o valor padrão será assim obtido: i) determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros amostrados no período de 1 dia (24 horas), ao longo de 7 (sete) dias consecutivos; e ii) o valor do indicador corresponde ao maior dentre os sete valores adquiridos, anteriormente, em base diária.

Caso as tensões de sequência negativa variem de forma intermitente e repetitiva, será permitido que os limites especificados sejam ultrapassados em até o dobro, desde que a

duração cumulativa das tensões de sequência negativa, acima dos limites contínuos estabelecidos, não ultrapasse 5% do período de monitoração.

2.5.1.3 – Recomendação IEC 61000-4-30

A recomendação IEC 61000-4-30 indica que um nível aceitável do VUF em sistemas de baixa tensão é de 2%. Em alguns casos, valores elevados podem ocorrer pelo menos por períodos limitados, por exemplo, durante um curto-circuito.

2.5.1.4 – Norma Europeia CENELEC

A norma EN 50160 estabelece que, sob condições normais de suprimento, durante o período de uma semana, 95% dos valores da componente de sequência negativa devem estar na faixa de 0 a 2% da componente de sequência positiva. Tais valores consistem na média dos pontos medidos durante 10 (dez) minutos consecutivos. Em algumas áreas, onde partes dos consumidores são atendidos em ligações monofásicas ou bifásicas, pode-se admitir desequilíbrios de até 3%. Nessa norma, são considerados apenas os valores para as componentes de sequência negativa.

2.5.2 – Resumo Comparativo sobre os Documentos Consultados

Do levantamento efetuado, é possível verificar que as normas utilizam quatro métodos para quantificação do DT. A Tabela 2.1 apresenta os índices de conformidade dos citados métodos de quantificação. Desta tabela verifica-se que a maioria das normas limita o indicador de DT em 2%. Isto mostra que os índices de conformidade convergem para este valor.

Da análise dos mencionados documentos, é possível concluir que as normas e recomendações como a IEEE std. 1159, IEC 61000-4-30, NRS 048-2 e o PRODIST sugerem o emprego do VUF para a quantificação do DT. De fato, a IEEE std. 1159 faz alusão ao VUF_0 em seu glossário. Contudo, na definição e formulação do indicador de quantificação do desequilíbrio, apenas o VUF é considerado. A norma NRS 048-2 afirma que, embora o DT possa ser descrito em termos do VUF e do VUF_0 , somente a contribuição das tensões de sequência negativa é considerada porque esta é a componente

relevante quando da avaliação dos efeitos em equipamentos conectados ao sistema. A norma IEC 61000-4-30 exige que tanto o VUF_0 quanto o VUF sejam disponibilizados pelos instrumentos de medição classe A, mas para equipamentos classe S, o VUF_0 não é mandatório. No PRODIST, o VUF_0 é negligenciado. Assim, pode-se verificar que não há consenso sobre a consideração ou não da componente de sequência zero no processo de quantificação do DT.

Tabela 2.1 – Índices de Conformidades.

Recomendação / Norma	Método de cálculo do DT	Limite
Procedimentos de Rede	$VUF = \left \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \right \times 100$	2%
IEC	$VUF = \left \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \right \times 100$	2%
PRODIST	$VUF = \left \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \right \times 100$ <p style="text-align: center;">ou</p> $VUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100\%$ <p style="text-align: center;">onde</p> $\beta = \frac{ V_{AB} ^4 + V_{BC} ^4 + V_{CA} ^4}{(V_{AB} ^2 + V_{BC} ^2 + V_{CA} ^2)^2}$	3%
CENELEC	$VUF = \left \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \right \times 100$	2%

2.6 – ANÁLISES CRÍTICAS SOBRE AS METODOLOGIAS EM PRÁTICA PARA O CÁLCULO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Apesar da existência no Brasil e no mundo de expressivos congressos onde têm-se abordados temas vinculados à qualidade da energia elétrica, a necessidade de novas investigações a respeito de DT tem sido ressaltada por especialistas da área. Reconhecendo-se esse fato, e ainda, considerando-se a sensibilidade de cargas como os MIT a tensões desequilibradas, descreve-se neste item do presente estudo, alguns aspectos relacionados à quantificação do referido fenômeno e seus efeitos sobre alguns equipamentos do sistema elétrico.

Atualmente, encontram-se na literatura trabalhos cujas abordagens contemplam essencialmente os efeitos do DT nos dispositivos do sistema de potência (Xu *et al.*, 2015; Moazen *et al.*, 2016; Donolo *et al.*, 2016; Agamloh *et al.*, 2017; Gonzalez-Cordoba *et al.*, 2017; Mortazavian *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2018; Campbell e Arce 2018; Gonzalez-Cordoba *et al.*, 2018), e também aqueles em que esses efeitos são investigados com o propósito de se verificar as limitações dos indicadores empregados na sua quantificação (Lee, 1999; Wang, 2001; Faiz *et al.*, 2004; Kini *et al.*, 2007; Gnacinski, 2009; Anwari e Hiendro, 2010; Silva, 2014; Silva *et al.*, 2016; Sen Kurt *et al.*, 2017; El-Kharashi *et al.*, 2018).

Em (Lee, 1999; Wang, 2001; Faiz *et al.*, 2004; Kini *et al.*, 2007; Gnacinski, 2009; Anwari e Hiendro, 2010; Silva, 2014; Silva *et al.*, 2016; Sen Kurt *et al.*, 2017; El-Kharashi *et al.*, 2018), os autores concluíram, entre outros aspectos, que diversas condições de DT que produzem diferentes efeitos em equipamentos elétricos podem estar associadas ao mesmo valor do indicador empregado para a quantificação do DT. Este tipo de limitação pode ser observado quando se utiliza tanto o VUF quanto os demais indicadores apresentados na Seção 2.2. Por essa razão, alguns catedráticos da área têm buscado enfatizar a incapacidade dos atuais indicadores de correlacionarem adequadamente os níveis de desequilíbrio com seus efeitos. Alguns destes trabalhos apresentam propostas alternativas de procedimentos para se quantificar o DT.

Neste contexto, Lee, 1999; Faiz *et al.*, 2004; Anwari e Hiendro, 2010; Kini *et al.*, 2007; Silva, 2014; e Silva *et al.*, 2016 sugeriram o emprego do V_1 e do VUF no processo de quantificação do DT. Essa prática, segundo os autores, coopera para reduzir o número de condições de desequilíbrio relacionadas ao mesmo indicador e, conseqüentemente, permite uma melhor associação entre os valores do VUF e os seus efeitos nos motores.

Já Wang, 2001; Faiz *et al.*, 2004; Kini *et al.*, 2007; Gnacinski, 2009; Anwari e Hiendro, 2010; Silva, 2014; e Silva *et al.*, 2016 afirmam que o CVUF melhor descreve os efeitos do DT, uma vez que ele contempla a amplitude do VUF e a diferença angular (θ_2) entre os fasores das componentes de tensão das sequências positivas e negativas (\bar{V}_1 e \bar{V}_2). A utilização combinada da amplitude e do ângulo do CVUF também culmina na redução do número de condições que resultam no mesmo VUF.

Faiz *et al.*, 2004 verificaram que o emprego conjunto da amplitude e do ângulo do CVUF com V_1 permite associar os valores dessas grandezas a um efeito, ou seja, a um único valor de temperatura de um MIT, por exemplo. Em outras palavras, utilizar o CVUF em conjunto com o V_1 remete a um caso específico de DT.

El-Kharashi *et al.*, 2018 empregaram o fator de desequilíbrio de corrente complexo (CUF – do inglês *complex current unbalance factor*), com a finalidade de determinar a potência de saída de motores de indução industriais sujeitos a tensões desequilibradas. Neste estudo, o CUF foi calculado por meio do modelo elétrico da máquina, cujos parâmetros dependem das características do motor em avaliação. Dado que este indicador é baseado nas análises da corrente, o resultado da sua aplicação é restrito às cargas responsáveis pela geração dessas correntes de sequência positiva e negativa, as quais são empregadas em seu cálculo.

Da análise dos trabalhos destacados acima, é possível notar que o emprego conjunto do V_1 com o VUF e do θ_2 com o VUF tem sido sugerido ou empregado por alguns especialistas da área para a quantificação do DT (Wang, 2001; Anwari e Hiendro, 2010; Silva, 2014; Silva *et al.*, 2016; El-Kharashi *et al.*, 2018). No entanto, esses procedimentos não se comprovaram viáveis o suficiente para alterar os já consolidados métodos de cálculo do mencionado fenômeno. Um dos motivos para isso é que o processo de estabelecimento de níveis de compatibilidade se torna mais complexo quando se utiliza simultaneamente mais de um indicador para a caracterização do DT. Além disso, cabe ressaltar que não existem estudos recentes na literatura que proponham um método de quantificação do DT, identificado por meio de testes experimentais, cuja proposição tenha sido elaborada com base na relação entre a magnitude de seu indicador e os efeitos desse fenômeno.

Cabe ainda destacar que, de acordo com Faiz *et al.*, 2004, MIT são amplamente empregados em sistemas industriais, residenciais e comerciais. Na literatura, com algumas exceções, os estudos relacionados ao DT investigam a temperatura, o rendimento, o torque, as vibrações, a solicitação de isolamento, o fator de subcarregamento e a perda de vida útil dos MIT.

2.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo exibiu, de forma concisa, os principais conceitos e definições relacionados com o tema DT. Dada a sua importância para a concretização desta pesquisa, os métodos de cálculo do desequilíbrio, as suas causas e os seus efeitos foram detalhados. Para a quantificação do DT, quatro métodos foram ilustrados. Destes, três não fazem uso dos ângulos das tensões para o cálculo do VUF. Diversos aspectos que podem causar desequilíbrio foram citados. Adicionalmente, alguns de seus efeitos foram ressaltados.

Em seguida, foram apresentadas algumas normas e recomendações utilizadas em países de todo o mundo, que versam sobre este fenômeno da qualidade da energia elétrica. De todo o exposto, observou-se que o VUF calculado com base no método das componentes simétricas é empregado por diversas normas sobre DT. O limite máximo de 2% é, predominantemente, empregado como índice de conformidade nas normas que abordam este distúrbio.

Do levantamento bibliográfico realizado, detectou-se que diversas condições de DT, que produzem diferentes efeitos em equipamentos elétricos, podem estar associadas a um mesmo valor do indicador empregado para a sua quantificação. Com o intuito de superar esse problema, alguns autores apresentam propostas alternativas de procedimentos para a quantificação do DT. Neste sentido, têm sido sugeridas soluções como o emprego conjunto do V_1 ou do θ_2 com o VUF. No entanto, esses procedimentos não se comprovaram viáveis o suficiente para alterar os já consolidados métodos de cálculo do mencionado fenômeno. O principal motivo deste fato é que o processo de estabelecimento de níveis de compatibilidade se torna mais complexo quando se emprega simultaneamente mais de um indicador para a caracterização do DT.

Em consonância com a consecução dos objetivos da tese, no Capítulo 3, são descritos os detalhes da infraestrutura laboratorial desenvolvida, e os métodos e os procedimentos que viabilizam tanto a execução de uma avaliação crítica dos métodos utilizados para a quantificação do DT, como a aplicação da metodologia proposta neste estudo.

3 – MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Visando uma estrutura para fins investigativos dos indicadores de desequilíbrio e seus impactos sobre a operação dos motores de indução, foi estabelecido um ambiente laboratorial controlado, dois bancos de dados constituídos por um abrangente conjunto de tensões equilibradas e desequilibradas, e ainda, um modelo térmico para a obtenção das temperaturas do MIT. Por esta razão, neste capítulo, cujo objetivo é apresentar os detalhes da infraestrutura laboratorial e dos procedimentos utilizados neste estudo, são abordados:

- Os aspectos relacionados à infraestrutura laboratorial e ao sistema de controle utilizado para a coleta automática da temperatura e do rendimento de um MIT submetido a inúmeras condições de tensões;
- Os bancos de dados compostos pelas tensões equilibradas e desequilibradas que são aplicadas sobre o MIT para a aplicação e avaliação da metodologia proposta; e
- O modelo térmico do MIT empregado neste estudo e a ferramenta de otimização que viabiliza a obtenção dos parâmetros desse modelo.

3.2 – INFRAESTRUTURA LABORATORIAL

Para a aplicação em laboratório das tensões equilibradas e desequilibradas sobre o MIT, foi desenvolvido o sistema de controle em malha fechada cujo esquemático é mostrado na Figura 3.1. Tal sistema permite a coleta automática das correntes, temperaturas, potências, velocidades rotacionais do motor, dentre outras grandezas elétricas. Cada um dos elementos que constituem o aparato laboratorial exposto na Figura 3.1 são descritos em seguida.

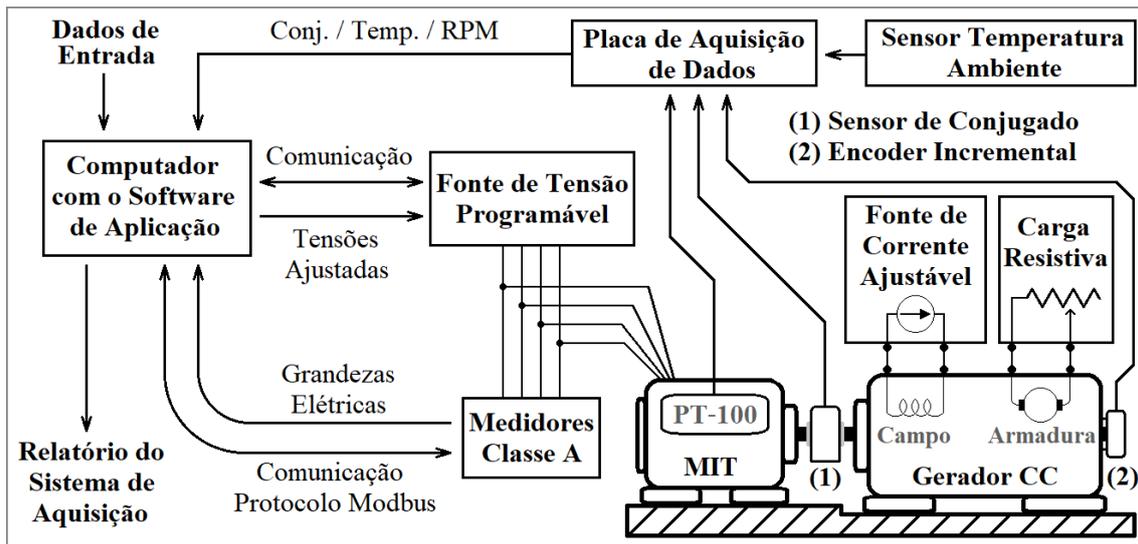


Figura 3.1 – Aparato experimental para ensaios no MIT.

1) Dados de entrada: trata-se de um arquivo de texto que contém de forma sequencial a duração, os valores das tensões de referência, e um limite de segurança para as correntes de alimentação do MIT;

2) Fonte programável modelo CSW 11110: é o equipamento responsável por gerar as tensões de alimentação do MIT. Como são infinitas as possibilidades de condições de tensões, elas são repassadas para a fonte por meio de comandos oriundos de um computador;

3) Medidores classe A modelos Elspec G4500 e ION 7600: são os instrumentos de medição que efetuam as leituras das grandezas elétricas de alimentação do MIT. O conjunto de alicates do Elspec G4500 realiza as medições das correntes de linha. Já o ION 7600, mede as correntes nas fases do motor. Ambos medidores coletam as tensões aplicadas sobre o MIT, porém, são empregados os resultados das leituras do Elspec G4500. Estes aparelhos possuem softwares próprios que disponibilizam as leituras das grandezas elétricas. Entretanto, como os procedimentos executados neste estudo demandam uma aplicação supervisória (aquisição em tempo real), o protocolo Modbus é empregado para realizar as leituras desses medidores;

4) Placa de aquisição de dados da *National Instruments* modelo NI PCIe-6321: tal placa realiza a leitura dos sinais de tensões dos sensores presentes no aparato laboratorial com uma elevada taxa de amostragem e precisão (16 bits, 250 kS/s);

- 5) Sensores de temperatura do tipo PT-100: tratam-se dos sensores instalados nas “cabeças” dos enrolamentos de cada fase do estator do MIT. Esses locais constituem os pontos mais sensíveis do motor, uma vez que apresentam as temperaturas mais elevadas e, conseqüentemente, são mais propensos às perdas de isolamento elétrica. A resistência de cada PT-100 varia de forma conhecida em função da temperatura;
- 6) Sensor de temperatura do ar ambiente modelo LM35 (circuito integrado): este dispositivo atua como um sensor de precisão, que possui uma saída de tensão linear em relação à temperatura ambiente;
- 7) Sensor de conjugado modelo MKDC-10: este sensor é responsável pela leitura do conjugado do MIT. Ele é alimentado por uma fonte de tensão independente de 10 Vcc. A sua tensão de saída varia linearmente com o conjugado;
- 8) Encoder incremental modelo LPD3806 600BM-G5-24C: este elemento viabiliza a obtenção da velocidade de rotação do motor;
- 9) Motor de indução trifásico: o MIT empregado nos testes apresenta as seguintes especificações: classe de isolamento F, potência nominal de saída de 1,5 kW, e correntes nominais e tensões de linha iguais a 6,15 A e 220 V, respectivamente. Ele é conectado em delta. A potência mecânica de saída deste MIT é calculada pela relação entre o conjugado mecânico de saída (em newton-metro), disponibilizado pelo sensor de conjugado, multiplicado pela velocidade angular (em radiano por segundo), disponibilizada pelo encoder incremental. O seu rendimento é determinado fazendo-se a razão entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica de entrada fornecida pelo Elspec G4500;
- 10) Gerador de corrente contínua (carga mecânica do MIT): este gerador possui uma potência nominal de 4 kW. Ele se comporta como uma carga de conjugado linear em relação a velocidade. A sua bobina de campo é alimentada por uma fonte de corrente contínua regulada, e a sua armadura é conectada a uma carga resistiva, a qual é dimensionada de forma que MIT conectado a ele apresente valores nominais de rotação, corrente e potência. O valor dessa carga resistiva é mantido inalterado durante a execução de todos os ensaios;

11) Fonte linear de corrente ajustável: trata-se do dispositivo que garante uma corrente de campo constante no gerador CC. Esta fonte de corrente também contribui para diminuir o fenômeno de histerese no campo magnético do gerador, evitando-se assim mudanças em seu ponto de operação;

12) Computador: esta máquina é empregada para controlar e processar todas as informações do sistema de controle. Ele comunica-se com a fonte programável, com os medidores de grandezas elétricas e com a placa de aquisição de dados. Cabe enfatizar que toda a programação do sistema de controle foi realizada no ambiente gráfico de desenvolvimento LabVIEW. O software desenvolvido, inicialmente, recebe os dados de entrada, e em seguida, entra em um ciclo fechado de leitura das grandezas, comparando-as com os valores de referência, e se necessário, enviando comandos com novos valores de tensão para a fonte programável; e

13) Relatório do sistema de aquisição: a cada três segundos, o software gera uma nova linha com os valores médios de todas as grandezas lidas. Esses valores são gravados em uma memória não volátil. O relatório é salvo no formato de arquivo de texto com as leituras separadas por tabulações, o que permite a fácil conversão para uma planilha de dados.

As Figuras 3.2 a 3.5 exibem os equipamentos que perfazem a estrutura laboratorial estabelecida para os ensaios experimentais.

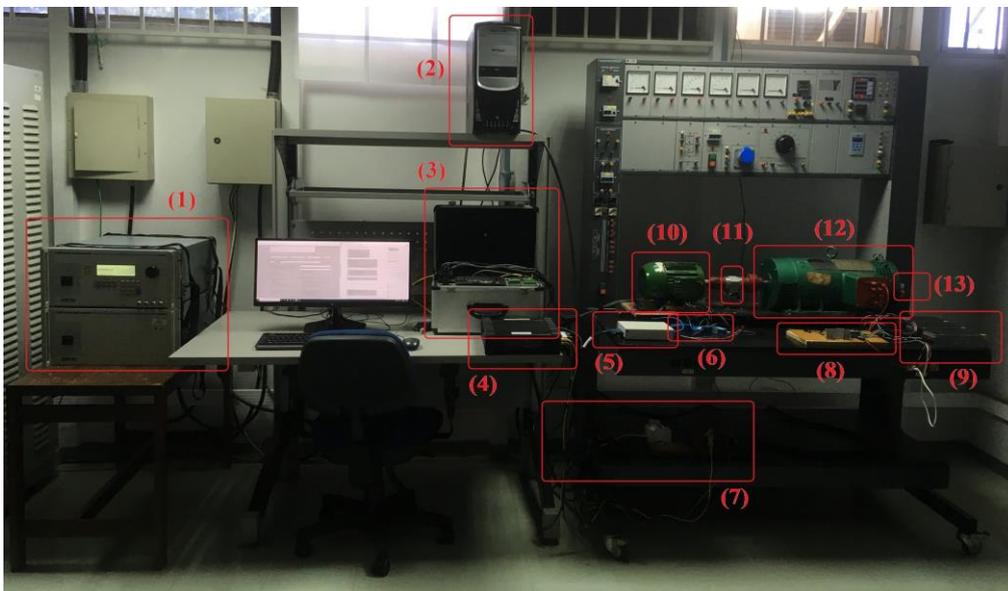


Figura 3.2 – Equipamentos que constituem o sistema de controle.

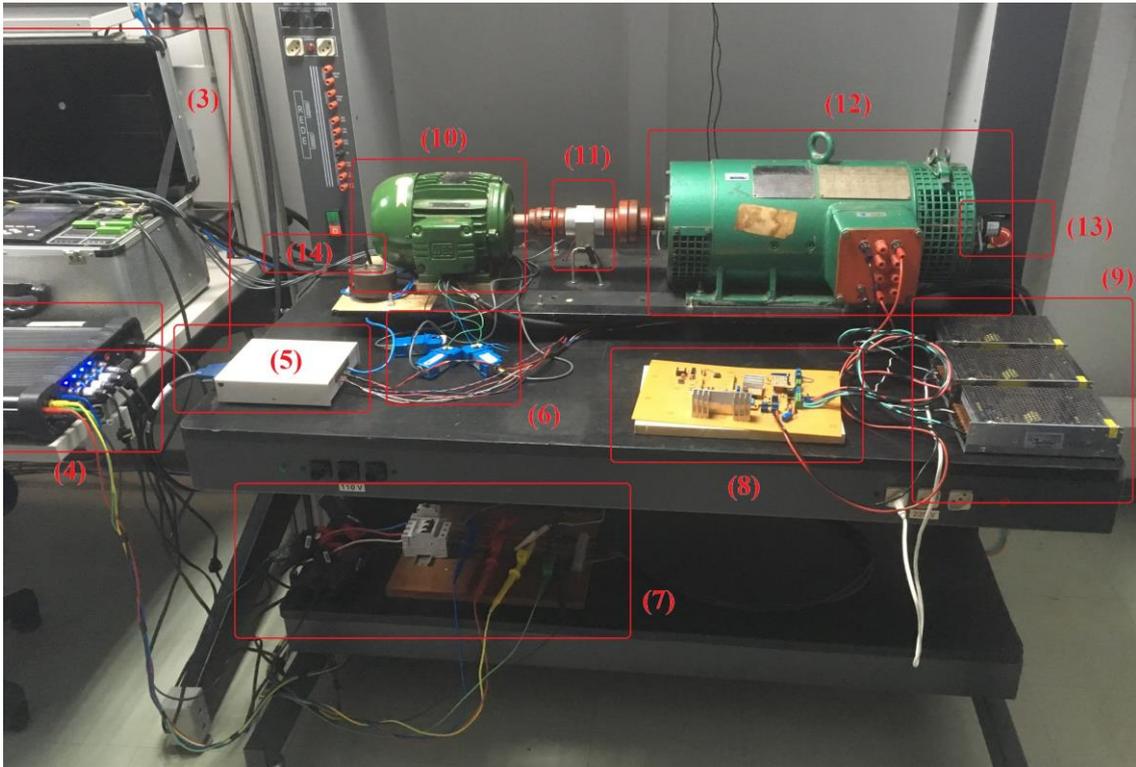


Figura 3.3 – Detalhes dos sensores e dos equipamentos conectados ao motor e ao gerador.

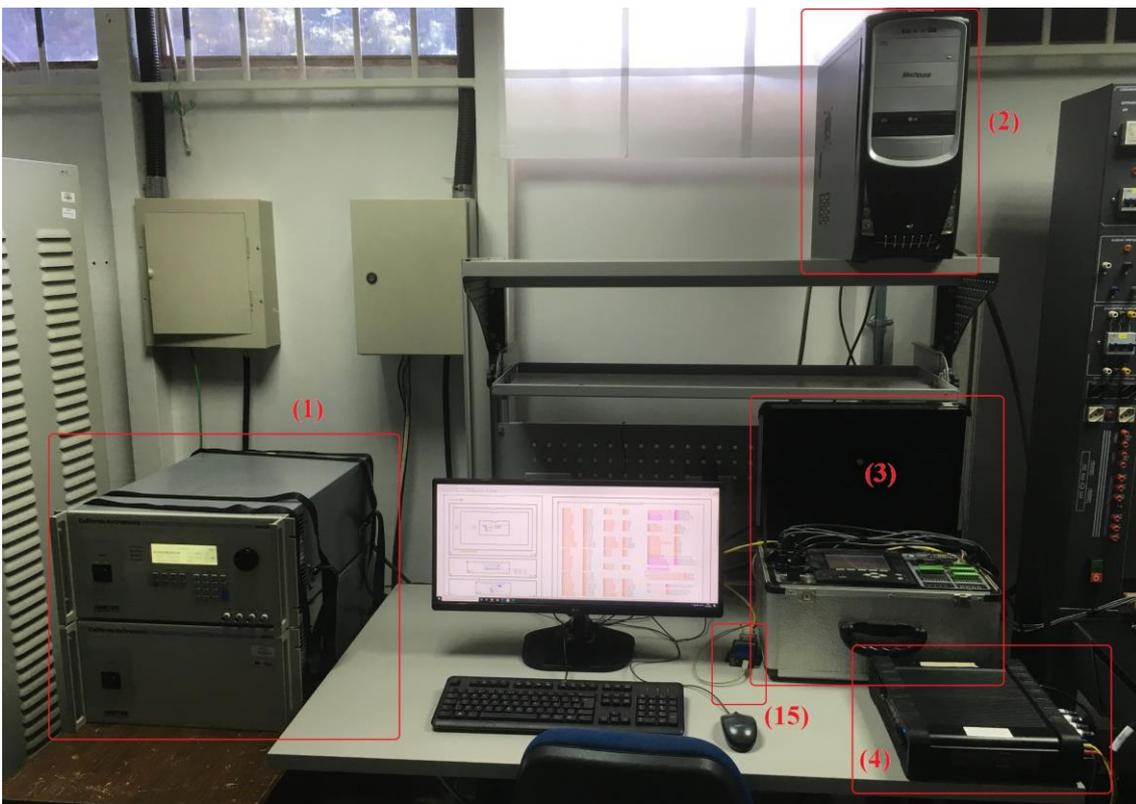


Figura 3.4 – Detalhes do computador e dos medidores de grandezas elétricas.



Figura 3.5 – Detalhe da carga resistiva.

3.3 – BANCOS DE DADOS APLICADOS AO MOTOR

Os procedimentos voltados para a coleta das temperaturas e do rendimento de um MIT iniciam-se com a seleção dos bancos de dados que são utilizados para se aplicar e avaliar a metodologia alternativa para a quantificação do DT. Ressalta-se que as tensões utilizadas devem abranger variadas condições de tensões equilibradas e desequilibradas, pois do contrário, pode-se negligenciar alguns dos efeitos que o desequilíbrio é capaz de gerar. Com este propósito, é elaborado o banco de dados BD_1 com 8244 condições de tensões trifásicas. Cada condição do BD_1 é imposta ao motor por um período de 30 segundos, tempo hábil para realização dos ensaios e suficiente para a leitura das correntes elétricas e das potências de entrada e de saída no eixo do MIT em teste.

A Tabela 3.1 mostra as combinações de valores das componentes simétricas de tensões que compõem as condições do BD_1 .

Tabela 3.1 – Composição do banco de dados BD_1 .

Especificação	Valores
V_1	200 V a 232 V em passos de 4 V
V_2 (% de V_{NOM})	0; 0,5; 1,0; ... ; 7,5
θ_2	0° a 360° em passos de 6°
V_0	0% para todas as condições

Da Tabela 3.1, é possível observar que a variação de V_1 no BD_1 contempla a faixa de tensões adequada estabelecida pelo PRODIST (de 201 a 231 volts, dado que $V_{NOM} = 220$ volts). Considerando-se que V_2 e θ_2 variam de 0 a 7,5% e de 0 a 360° , respectivamente, pode-se concluir que o BD_1 contempla um conjunto abrangente de condições de tensões que podem ser encontradas nas indústrias.

O segundo banco de dados empregado neste estudo, o BD₂, tem por finalidade proporcionar as condições necessárias para a obtenção das temperaturas do BD₁. Com este propósito, os resultados da aplicação do BD₂ viabilizam a identificação dos parâmetros que constituem o modelo térmico do MIT que é apresentado na Seção 3.4. No BD₂ as temperaturas dos enrolamentos do estator do motor devem ser lidas com a máquina em regime permanente. Para que isso seja possível, cada condição de tensão é aplicada sobre o MIT por um período de 16 minutos ¹.

As 650 condições presentes no BD₂ foram selecionadas do BD₁ por meio de um algoritmo computacional desenvolvido com o intuito de contemplar toda a região amostral das correntes elétricas adquiridas com a aplicação das 8244 combinações de tensões no MIT.

A Figura 3.6 exibe os módulos das correntes de fase lidas no MIT quando da aplicação das condições de tensões contidas nos bancos de dados BD₁ e BD₂.

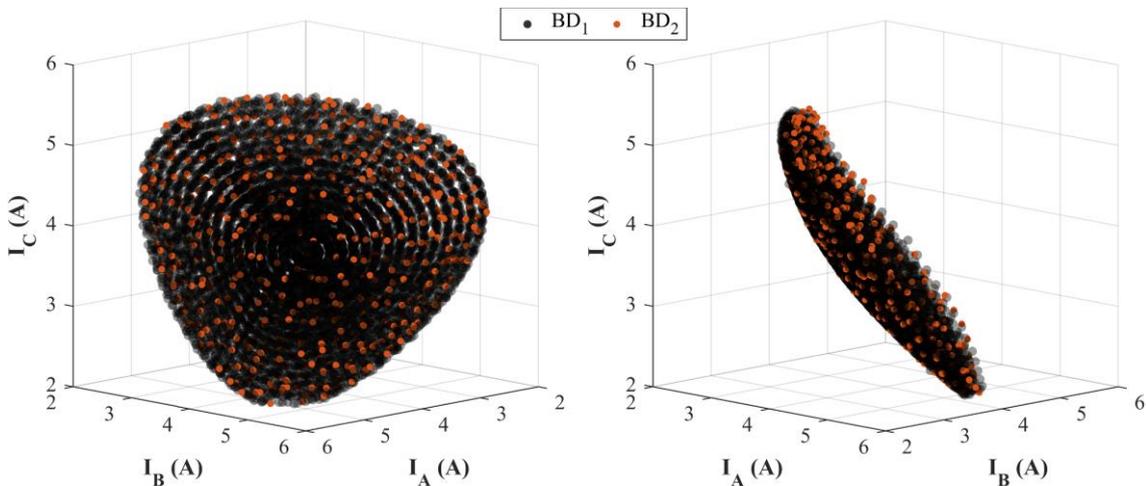


Figura 3.6 - Correntes de fase do MIT lidas com a aplicação dos bancos de dados BD₁ e BD₂.

¹ A definição de equilíbrio térmico e a determinação de um valor de tempo para alcançá-lo caracterizam-se como um assunto complexo e que depende do porte das máquinas elétricas envolvidas (motor e gerador). Na engenharia costuma-se definir o tempo de assentamento como aquele necessário para que a curva de resposta alcance e permaneça dentro de uma faixa de 2% em torno do valor final de regime permanente. Com relação a transformadores, é comum estipular o período de 2 horas como suficiente para obtenção do equilíbrio térmico e para que a variação da temperatura após esse período de tempo seja menor que 1°C.

Com base em resultados práticos, verificou-se neste estudo que um tempo de 16 minutos é suficiente para alcançar o equilíbrio térmico, contanto que as variações nos desequilíbrios de tensões sejam suaves, e ainda, que o conjunto motor-gerador, no início da aplicação das condições desequilibradas, já se encontra em regime permanente (tais precauções são adotadas na realização dos ensaios).

Nota-se da Figura 3.6 que o BD_2 abrange todo o espaço preenchido pelas combinações das correntes elétricas presentes no BD_1 . Dado que o BD_2 se presta para a estimação dos parâmetros térmicos do MIT, tal característica contribui para o aumento da eficácia do modelo térmico.

Com o objetivo de reduzir as imprecisões no processo de leitura, algumas medidas se fazem necessárias durante a execução dos testes. São elas: i) a ordem de aplicação das tensões trifásicas do BD_1 e do BD_2 foram estabelecidas para garantir variações suaves entre condições consecutivas de DT; e ii) para atingir o tempo de aquecimento, no início ou em casos de descontinuidade dos ensaios, o MIT deve ser submetido às suas tensões equilibradas e nominais por duas horas e meia. A temperatura resultante desta condição é considerada como a nominal (T_{NOM}).

A seguir apresenta-se o modelo térmico empregado neste estudo para a obtenção das temperaturas do MIT utilizado nos testes laboratoriais.

3.4 – MODELO TÉRMICO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Neste trabalho, o modelo térmico exibido na Figura 3.7 é empregado para o cálculo da temperatura em regime permanente do MIT. A escolha deste modelo deu-se calcada na sua simplicidade e na sua elevada precisão. Este circuito possui uma quantidade reduzida de parâmetros, os quais são estimados por meio de uma função de otimização baseada no método dos mínimos quadrados. Este procedimento, como demonstrado em (Silva, 2014; e Silva *et al.*, 2018), garante um elevado grau de precisão na estimativa das temperaturas nos enrolamentos do MIT submetido à DT.

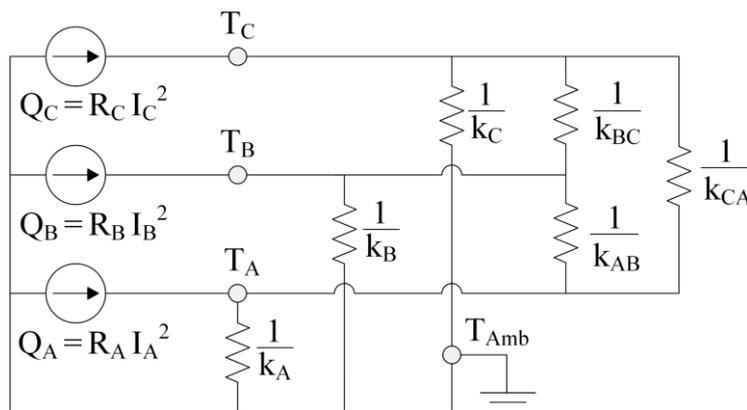


Figura 3.7 – Circuito térmico equivalente do MIT.

No sistema térmico da Figura 3.7, os índices ‘A’, ‘B’, ‘C’ e ‘Amb’ representam, respectivamente, as três fases dos enrolamentos do estator e o meio físico externo ao MIT. T_A , T_B , T_C e T_{Amb} são as temperaturas em graus Celsius; I_A , I_B e I_C são as correntes de entrada em Ampères; R_A , R_B e R_C são as resistências elétricas em Ohms; Q_A , Q_B e Q_C são os calores produzidos em Watts por grau Celsius; e k_A , k_B e k_C são as condutividades térmicas entre as fases e o meio físico externo ao MIT.

O modelo térmico da Figura 3.7 deve fornecer com a maior precisão possível, as temperaturas nas três fases dos enrolamentos do estator. Em função disso, quando da sua elaboração, considera-se que:

- Toda a troca de calor inerente ao sistema térmico se dá pelo processo de condução;
- O modelo é capaz de identificar as temperaturas do MIT somente quando ele se encontra em regime permanente. Desta forma, desconsideram-se as capacitâncias térmicas das partes integrantes do motor;
- No modelo térmico exibido na Figura 3.7, têm-se três fontes de energia térmica, as quais são injetadas em cada fase dos enrolamentos do estator do MIT. Contudo, as demais perdas do motor se encontram inseridas em sua totalidade (de forma oculta) dentro destas três fontes de calor.
- Os valores dos parâmetros desse modelo são válidos para uma condição de carregamento fixa. Caso o carregamento se altere, um outro conjunto de parâmetros que representa o circuito térmico deve ser obtido.

As variáveis de entrada do modelo térmico são as correntes elétricas adquiridas por meio de medições quando da aplicação das tensões que constituem o BD_1 sobre o MIT. Os valores de T_A , T_B e T_C são obtidos pela aplicação da expressão (3.1). A temperatura empregada nas análises (T) corresponde a maior entre T_A , T_B e T_C .

$$[T_A \quad T_B \quad T_C]^T = [K]^{-1} \times [R_A I_A^2 \quad R_B I_B^2 \quad R_C I_C^2]^T \quad (3.1)$$

onde:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_A + k_{AB} + k_{CA} & -k_{AB} & -k_{CA} \\ -k_{AB} & k_B + k_{AB} + k_{BC} & -k_{BC} \\ -k_{CA} & -k_{BC} & k_C + k_{BC} + k_{CA} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

3.5.5 – Técnica de Otimização Aplicada ao Modelo Térmico do Motor

Para o cálculo dos parâmetros do modelo térmico utilizado neste estudo, ou seja, de R_A , R_B , R_C e dos elementos da matriz $[K]$, emprega-se uma função de otimização baseada no método dos mínimos quadrados. Este procedimento é constituído por duas etapas. Inicialmente, realizam-se as leituras em regime permanente das correntes elétricas e das temperaturas do MIT submetido em laboratório às diversas condições de DT do BD₂. Em seguida, essas correntes elétricas e as temperaturas medidas são utilizadas, respectivamente, como grandezas de entrada e saída da ferramenta computacional de otimização, a qual é capaz de fornecer a combinação de parâmetros que melhor representa as temperaturas em regime permanente nos enrolamentos do MIT. A Tabela 3.2 mostra as grandezas empregadas na técnica de otimização matemática baseada no método dos mínimos quadrados para a estimação dos coeficientes do modelo térmico do MIT.

Tabela 3.2 - Grandezas empregadas na ferramenta matemática de otimização para a obtenção dos coeficientes do modelo térmico do MIT.

Grandezas	Variáveis
Coeficientes	$k_A; k_B; k_C; k_{AB}; k_{BC}; k_{CA}; R_A; R_B; R_C.$
Entradas	$I_A; I_B; I_C; T_{AMB}.$
Saída	$T_A; T_B; T_C.$

A Tabela 3.3 expõe os valores dos parâmetros do modelo térmico do MIT descrito na Seção 3.2. Eles foram calculados utilizando-se os resultados da aplicação do BD₂ sobre o MIT em teste.

Tabela 3.3 – Coeficientes empregados no modelo térmico do MIT.

k_A (W/K)	k_B (W/K)	k_C (W/K)	k_{AB} (W/K)	k_{BC} (W/K)	k_{CA} (W/K)	R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_C (Ω)
1.067	1.048	1.062	1.091	1.110	1.037	4.464	4.456	4.331

Comparando-se as temperaturas medidas, obtidas da aplicação do DB₂ no MIT, com aquelas adquiridas usando-se o modelo térmico, verifica-se que o erro médio é de 1,8 °C, o que corresponde a 2,5% da T_{NOM}. Com isso, conclui-se que a ferramenta utilizada é eficaz para estimar as temperaturas nos enrolamentos do MIT.

Cabe ressaltar que os parâmetros obtidos representam apenas o MIT que foi utilizado nos testes com a condição de carregamento nominal. Caso outros MIT sejam empregados na metodologia proposta, cada um deles deve ser submetido separadamente ao processo de obtenção dos parâmetros do modelo térmico.

3.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os recursos e as ferramentas essenciais para viabilizar a aplicação da metodologia que é proposta neste estudo, cuja aplicação resulta em um novo indicador de DT. Nesse sentido, foram detalhados:

1) A infraestrutura laboratorial: neste trabalho foi desenvolvido um sistema de controle em malha fechada para gerar com precisão as condições DT impostas ao MIT e ainda coletar de forma automática as correntes, temperaturas, potências, velocidades rotacionais do sistema motor-gerador, dentre outras grandezas elétricas. Cabe frisar que devido ao grande número de condições de tensões aplicadas ao motor, caracteriza-se como impraticável a execução manual dos ensaios necessários para a realização deste estudo;

2) Os bancos de dados: com o propósito de aplicar e avaliar a metodologia proposta neste estudo, foram desenvolvidos dois bancos de dados, o BD₁ e o BD₂. O BD₁ contém 8244 condições de tensões equilibradas e desequilibradas. Ele foi concebido de forma a abranger as mais variadas condições de DT. Por esta razão, este é o banco de dados que efetivamente é empregado para as análises realizadas neste estudo. Já o BD₂, com 650 condições de DT, presta-se para a obtenção dos parâmetros do modelo térmico do MIT, os quais são estimados por meio da aplicação dos resultados deste banco de dados na função de otimização baseada no método dos mínimos quadrados; e

3) Modelos térmicos do MIT: nesta seção, inicialmente, foram apresentados alguns conceitos básicos de termodinâmica. Em seguida, foram exibidos três modelos térmicos

do MIT. Estes modelos foram selecionados para exposição por eles apresentarem diferentes níveis de complexidade. Além dos assuntos mencionados acima, também foram detalhadas as particularidades relativas ao modelo térmico e à técnica de otimização que permitem obter as temperaturas do MIT empregado nos ensaios. Por fim, foram expostos os parâmetros do modelo térmico utilizado no presente trabalho, calculados empregando-se os resultados da aplicação do banco de dados DB₂ sobre o MIT.

De posse do mencionado aparato laboratorial, do modelo térmico ora exposto, e dos resultados da aplicação do DB₁ sobre o motor em avaliação, é possível obter a temperatura e o rendimento do MIT para inúmeras condições de tensões equilibradas e desequilibradas. As leituras das correntes e dos rendimentos do motor são extraídas diretamente por meio de suas velocidades rotacionais, conjugados mecânicos, e grandezas elétricas. Já as temperaturas são adquiridas de forma indireta, ou seja, pela aplicação das correntes do BD₁ no modelo térmico descrito na Seção 3.4. Os valores de temperatura e rendimento do motor são grandezas de entrada da metodologia apresentada no Capítulo 5 desta tese. No Capítulo 4, tem-se uma análise crítica de alguns dos métodos empregados para a quantificação do DT, encontrados na literatura.

4 – AVALIAÇÃO CRÍTICA DOS MÉTODOS EMPREGADOS PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem por objetivo principal apresentar os resultados de uma análise crítica de alguns dos indicadores e métodos empregados para a quantificação do DT. Com esse propósito, inicialmente, efetua-se uma análise gráfica com a finalidade de se mostrar como as tensões de linha e de fase de um sistema elétrico se comportam frente às variações das componentes simétricas. Em seguida, empregando-se as temperaturas e os rendimentos adquiridos em laboratório decorrentes da aplicação do banco de dados BD₁ no MIT, realiza-se uma análise dos tradicionais métodos dedicados à quantificação do DT.

Os resultados destas duas avaliações permitem identificar os principais aspectos que se caracterizam como limitações dos indicadores e dos métodos hoje disponíveis para a quantificação do DT.

4.2 – ANÁLISE GRÁFICA DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Nesta seção, são exibidos os resultados de uma investigação do comportamento das tensões de linha e de fase de um sistema de alimentação de sequência direta frente à variação das componentes simétricas. Para tanto, optou-se pelo emprego de elevados níveis de desequilíbrios com o intuito de facilitar a visualização dos fasores de tensões. A componente de sequência positiva é adotada como referência. Em outras palavras, $V_1 = 1$ p.u..

A Figura 4.1 exibe um diagrama fasorial para um conjunto de tensões trifásicas desequilibradas, e também as respectivas componentes simétricas resultantes da sua decomposição. Nesta figura, os índices ‘a’, ‘b’ e ‘c’ representam as fases A, B e C do sistema elétrico.

Conforme mencionado no Capítulo 2, da Figura 4.1 é possível observar que um sistema trifásico desequilibrado com sequência de fases ABC pode ser decomposto em três sistemas simétricos e equilibrados, a saber, de sequências positiva, negativa e zero.

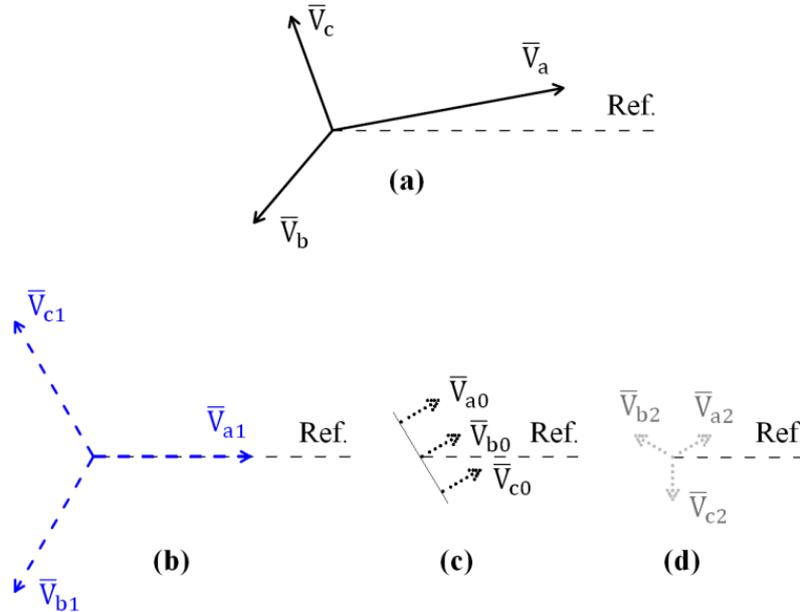


Figura 4.1 – (a) Diagrama fasorial de um conjunto de tensões trifásicas desequilibradas e as suas componentes simétricas de sequência (b) positiva, (c) zero e (d) negativa.

A Figura 4.2 expõe os resultados da decomposição gráfica dos fasores de tensão de fase em componentes de sequência.

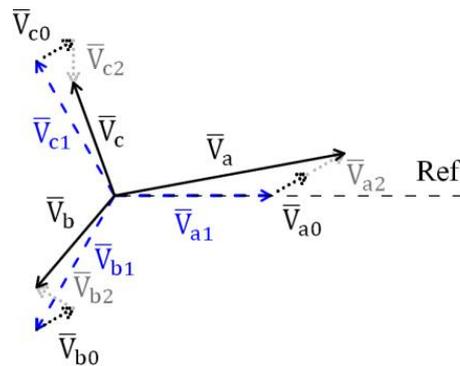


Figura 4.2 – Decomposição fasorial das componentes simétricas de tensões.

Da Figura 4.2, verifica-se graficamente e com base no princípio da superposição, como cada componente simétrica atua na formação das tensões de fase. A partir da Figura 4.2, é possível observar como cada componente contribui para a formação do conjunto de tensões trifásicas desequilibradas.

Já a Figura 4.3 apresenta a representação gráfica da decomposição fasorial empregando-se o método de deslocamento do ponto de neutro.

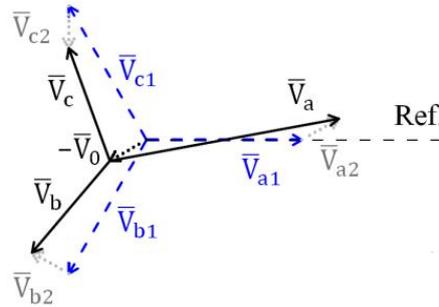


Figura 4.3 – Decomposição fasorial das componentes simétricas de tensões empregando a método de deslocamento do ponto de neutro

Da Figura 4.3, verifica-se que a posição do ponto de neutro é definida pela coordenada polar estabelecida por \bar{V}_0 . O módulo de \bar{V}_0 corresponde ao raio da circunferência que caracteriza os lugares das possíveis localizações do neutro. O ângulo de \bar{V}_0 , somado a um deslocamento de 180° , fornece a identificação exata da localização do ponto neutro. Da mencionada figura é ainda possível observar que, uma vez identificado graficamente os fasores resultantes da soma $\bar{V}_1 + \bar{V}_2$, para se obter os fasores das tensões de fase, basta deslocar o ponto de neutro. Vale ressaltar que os conjuntos de tensões obtidos a partir da aplicação dos métodos expostos nas Figuras 4.2 e 4.3 são idênticos, exceto pelo deslocamento no espaço. Por esta razão, nas análises que seguem, será empregada a representação via método do deslocamento do neutro.

A Figura 4.4 mostra o diagrama fasorial das tensões de fase e de linha para duas condições distintas de desequilíbrio, a saber: i) $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$; e ii) $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$.

Da Figura 4.4, verifica-se que a circunferência representa o lugar geométrico do ponto neutro quando $VUF_0 = 20\%$, ou seja, $V_0 = 0,2$ p.u.. Dado que $\theta_0 = 0^\circ$, o ponto de neutro encontra a 180° da origem (resultante de $\theta_0 + 180^\circ$). É possível observar que, para a condição em que $CVUF_2 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$, as tensões de fase e linha são equilibradas, ou seja, elas se encontram deslocadas 120° umas das outras e apresentam módulos iguais a 1 p.u.. Em outras palavras, V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são iguais a 1 p.u.. Dessa forma, com $V_2 = 0$ p.u., as tensões de linha formam um triângulo equilátero cujos lados são iguais ao V_1 .

Ressalta-se que, para as condições em avaliação na Figura 4.4, o cálculo dos indicadores VUF_0 e $CVUF_0$ efetuado via tensões de linha, conduz a resultados iguais a 0.

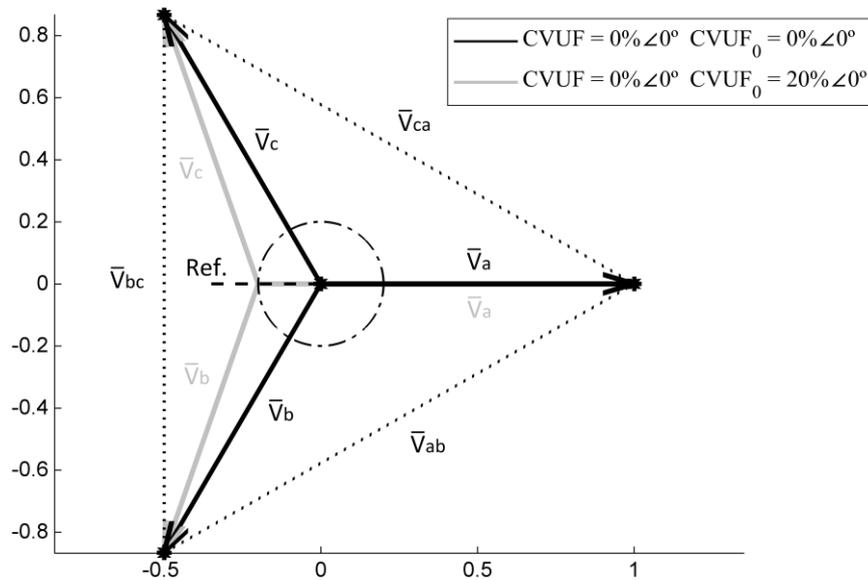


Figura 4.4 – Tensões de fase e de linha para as seguintes condições: i) $CVUF_2 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$; e ii) $CVUF_2 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$.

A Figura 4.5 mostra o diagrama fasorial das tensões para duas condições, a saber: i) $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$; e ii) $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 20\% \angle 45^\circ$.

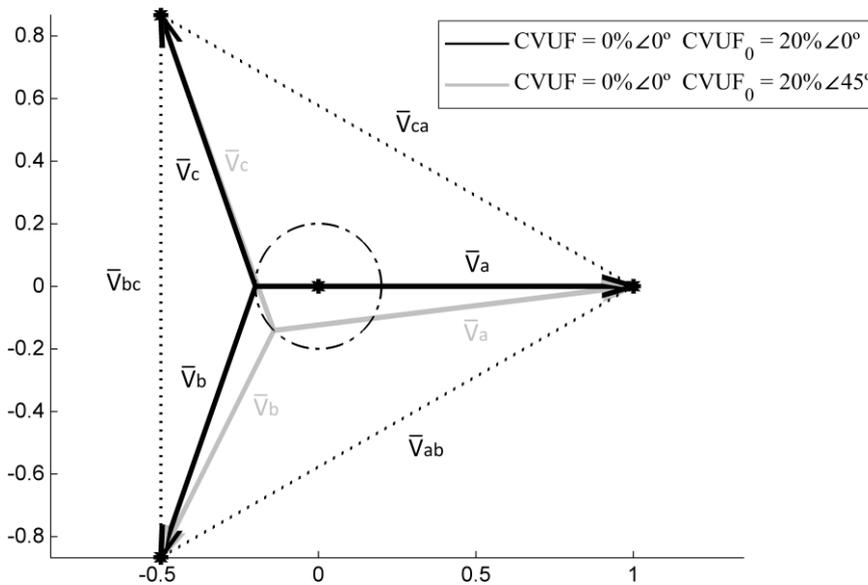


Figura 4.5 – Tensões de fase e de linha para: i) $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$; e ii) $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 20\% \angle 45^\circ$.

Na Figura 4.5 pode perceber que, para $CVUF_0 = 20\% \angle 45^\circ$, o ponto neutro encontra-se na circunferência de raio igual a 0,2 p.u. ($VUF_0 = 20\%$), a 225° do eixo x positivo ($\theta_0 + 180^\circ = 45^\circ + 180^\circ$). Da análise deste diagrama, é possível verificar como o ângulo de $CVUF_0$ pode contribuir para o desequilíbrio das tensões de fase. Além disso, é possível notar que nas duas condições de DT em avaliação, apesar das tensões de fase serem desequilibradas, o triângulo formado pelas tensões de linha é equilátero, como ocorreu na Figura 4.4. Isso acontece porque se a componente de sequência negativa é zero, as tensões de linha têm módulos iguais. Do exposto, é possível inferir que as diversas combinações de módulos e ângulos de V_0 culminam na existência de inúmeras combinações de tensões de fase que conduzem a um mesmo triângulo equilátero formado pelas tensões de linha. Este aspecto constitui uma limitação dos tradicionais métodos de quantificação empregados em documentos normativos, uma vez que para esta condição, apesar de $VUF = 0\%$, as tensões de fases se encontram desequilibradas.

A Figura 4.6 ilustra os fasores das tensões de fases correspondentes às seguintes combinações: i) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$; ii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$; e iii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$.

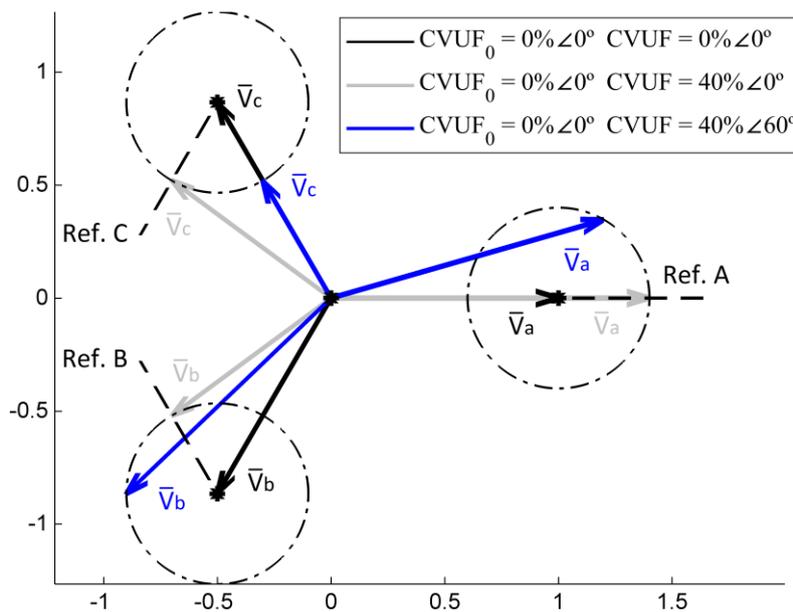


Figura 4.6 – Comportamento das tensões de fase para as condições: i) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$; ii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$; e iii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$.

Na Figura 4.6, em preto encontra-se o conjunto de tensões de fase equilibradas correspondente à condição em que $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$. Observa-se que, como a componente de sequência zero é nula, o ponto neutro está localizado na origem do plano cartesiano. Também são mostradas na Figura 4.6 três circunferências cujos centros, neste caso em que $\bar{V}_1 = 1 \angle 0^\circ$ p.u., estão localizados nos pontos $(1; 0)$, $(-1/2; -\sqrt{3}/2)$ e $(-1/2; \sqrt{3}/2)$ para as fases A, B e C, respectivamente. Os raios destas três circunferências são iguais a 0,4 p.u., considerando-se que elas representam as condições i) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$, e ii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$.

Como a componente negativa possui sequência de fases inversa, as referências angulares das circunferências das fases A, B e C estão localizadas em 0° , 120° e -120° , tendo-se como referência o eixo positivo das abscissas (sentido anti-horário). Logo, na Figura 4.6, para a condição $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$, as tensões de fase são representadas conforme os fasores em cinza, ou seja, $\bar{V}_a = 1,4 \angle 0^\circ$ p.u., $\bar{V}_b = 0,87 \angle -143,4^\circ$ p.u., e $\bar{V}_c = 0,87 \angle 143^\circ$ p.u.. Para a condição em que $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$, as circunferências têm raios de 0,4 p.u., e as extremidades dos fasores das fases A, B e C (em azul) estão a 60° de suas respectivas referências angulares, ou seja, $\bar{V}_a = 1,25 \angle 16,1^\circ$ p.u., $\bar{V}_b = 1,25 \angle -136,1^\circ$ p.u., e $\bar{V}_c = 0,6 \angle 120^\circ$ p.u..

A Figura 4.7 exhibe os fasores das tensões de linha para as mesmas três condições mostradas na Figura 4.6.

Da Figura 4.7, observa-se que as tensões de linha podem ser identificadas para todas as condições em estudo, com base na união das extremidades dos respectivos fasores de tensões de fase. Para as condições em que $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$, as tensões de linha em preto constituem um triângulo equilátero. No entanto, para $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$ (fasores cinzas) e $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$ (fasores azuis), é observada a formação de triângulos com tensões de linha com módulos assimétricos.

Na Figura 4.8 encontram-se ilustrados os conjuntos de tensões de fase e de linha em que i) $CVUF_0 = 20 \angle 45^\circ$ % e $CVUF = 20 \angle 60^\circ$ %; e ii) $CVUF_0 = 20 \angle 45^\circ$ % e $CVUF = 40 \angle 60^\circ$ %.

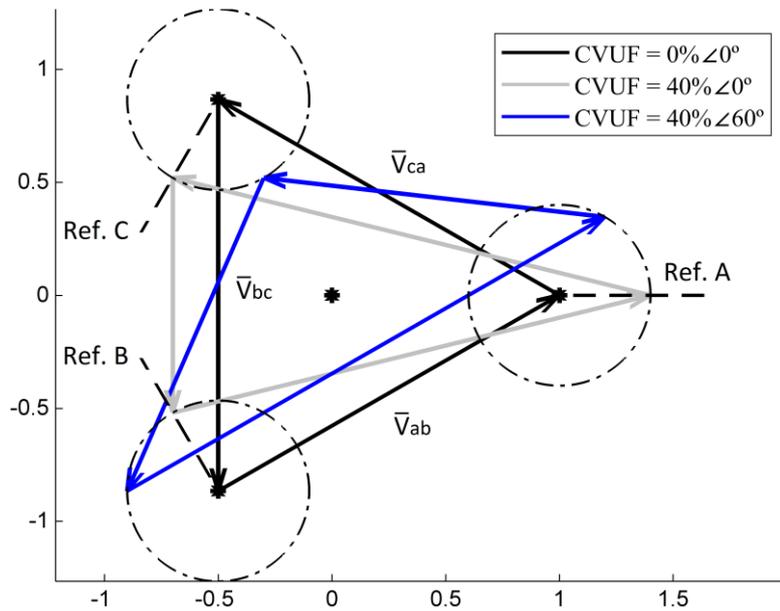


Figura 4.7 – Comportamento das tensões de linha para as condições: i) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 0\% \angle 0^\circ$; ii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$; e iii) $CVUF_0 = 0\% \angle 0^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$.

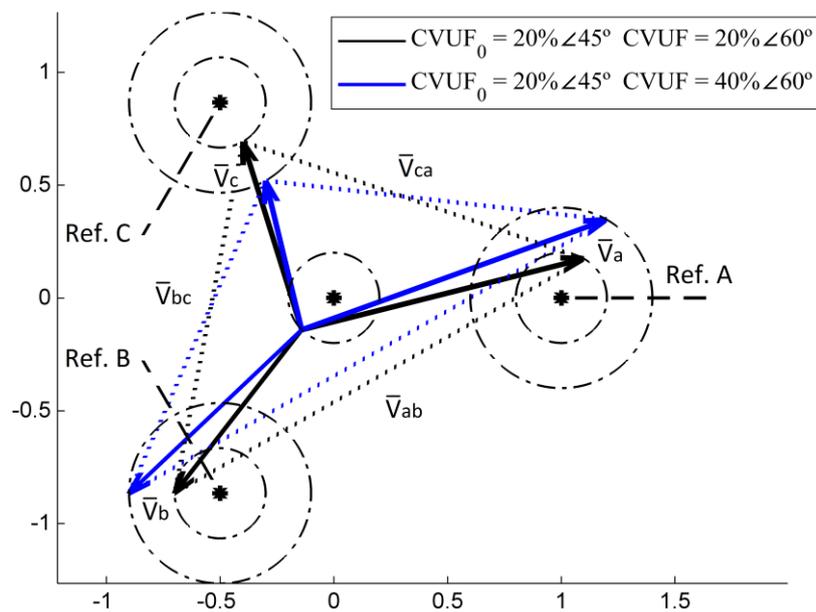


Figura 4.8 – Tensões de linha e de fase para: i) $CVUF_0 = 20\% \angle 45^\circ$ e $CVUF = 20\% \angle 60^\circ$; e ii) $CVUF_0 = 20\% \angle 45^\circ$ e $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$.

Na Figura 4.8, o $CVUF_0 = 20\% \angle 45^\circ$ determina a posição do ponto neutro, que neste caso encontra-se na circunferência central, a 225° do eixo x positivo (sentido anti-horário). Para todas as condições mostradas na Figura 4.8, as tensões das fases A, B e C têm origem no mesmo ponto de neutro.

Quando o $CVUF = 40\% \angle 60^\circ$, as extremidades dos fasores que representam as tensões de fase (em azul) estão localizadas nas três circunferências de raios iguais a 0,4 pu, a 60° de suas respectivas referências angulares, ou seja, $\bar{V}_a = 1,43 \angle 20^\circ$ p.u., $\bar{V}_b = 1,05 \angle -136,3^\circ$ p.u., e $\bar{V}_c = 0,68 \angle 103,5^\circ$ p.u.. As tensões de linha relacionadas a essa condição (linhas pontilhadas em azul) são obtidas por meio da união das extremidades das tensões de fase. As tensões de linha e de fase mostradas em preto ($CVUF = 20\% \angle 60^\circ$) na Figura 4.8 são adquiridas aplicando-se um raciocínio idêntico ao da condição em azul. Neste caso têm-se: $\bar{V}_a = 1,28 \angle 14,2^\circ$ p.u., $\bar{V}_b = 0,91 \angle -127,6^\circ$ p.u., e $\bar{V}_c = 0,87 \angle 107,2^\circ$ p.u..

A partir da Figura 4.8, pode-se inferir que quanto menor a componente de sequência negativa, mais o triângulo formado pelas tensões de linha se assemelha a um equilátero. As tensões de linha estão diretamente relacionadas à componente de sequência negativa. Se o módulo do CVUF for diferente de zero, as tensões de linha inevitavelmente serão desequilibradas e, portanto, as tensões de fase também o serão. No entanto, existem condições nas quais as tensões de linha são equilibradas e as tensões de fase não são ($VUF_0 \neq 0\%$ e $VUF = 0\%$).

A Figura 4.9 mostra os diagramas fasoriais para: i) $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$, $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$ e $V_1 = 1$ p.u.; e ii) $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$, $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$ e $V_1 = 0,92$ p.u..

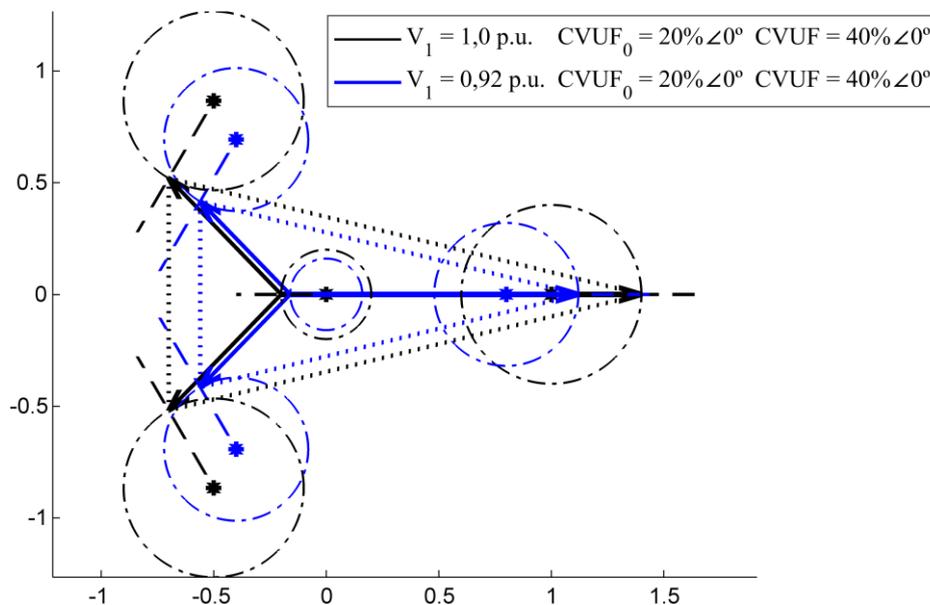


Figura 4.9 – Tensões de linha e de fase para: i) $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$, $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$ e $V_1 = 1$ p.u.; e ii) $CVUF_0 = 20\% \angle 0^\circ$, $CVUF = 40\% \angle 0^\circ$ e $V_1 = 0,92$ pu.

Observa-se da Figura 4.9 que a mudança no valor de V_1 de 1 para 0,92 p.u. culmina em modificações na mesma proporção nas amplitudes das tensões de fase e de linha. Sendo assim, os valores de V_2 e V_0 também são alterados na mesma proporção de V_1 . Enquanto isso, os ângulos das tensões de fase e de linha permanecem inalterados, o que significa que eles são independentes dos valores de V_1 .

Vale ressaltar que a aplicação em separado dos dois conjuntos de tensões da Figura 4.9 em motores de indução culminará em diferentes conjugados, rendimentos e temperaturas. Depreende-se, portanto, que a variação de V_1 caracteriza-se como uma das razões para a existência de efeitos distintos do DT em equipamentos conectados à rede elétrica. Em outras palavras, o valor do indicador VUF (relação V_2/V_1) pode se manter constante, apesar da variação do V_1 .

A Figura 4.10 exibe o lugar geométrico das amplitudes das tensões de fase para $CVUF = 0\%$, $CVUF_0 = 1,164\angle 89,667^\circ \%$, e ângulos das tensões das fase A, B e C iguais a 0° , -121° e 119° , respectivamente. Neste caso, V_1 varia de 0,9 a 1,05 p.u.,

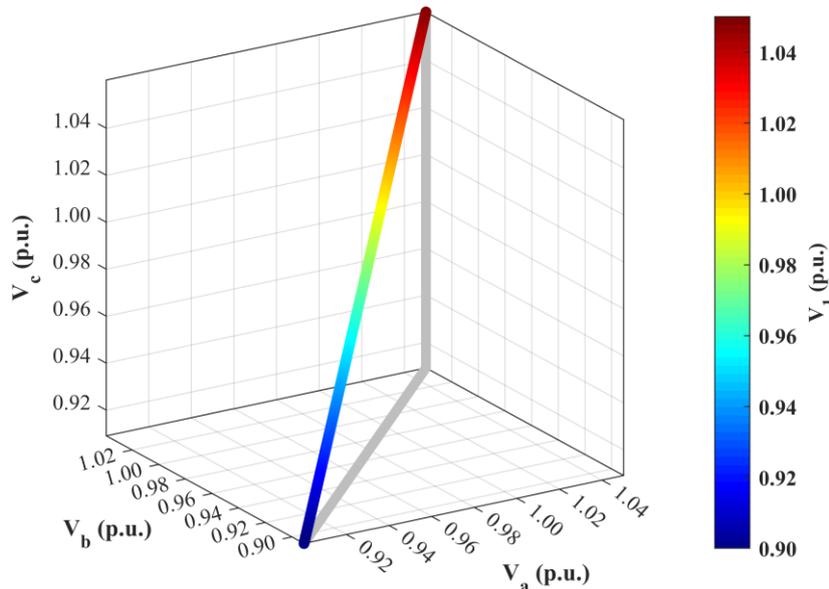


Figura 4.10 – Lugar geométrico das amplitudes das tensões resultantes de $VUF = 0\%$, $CVUF_0 = 1,164\angle 89,667^\circ \%$, e com ângulos das tensões das fases A, B e C iguais a 0° , -121° e 119° , respectivamente. V_1 varia de 0.9 a 1.05 p.u..

Da Figura 4.10 é possível constatar que o lugar geométrico das amplitudes das tensões para $CVUF = 0\%$ é uma reta, cuja inclinação depende dos valores dos ângulos das tensões

de fase. O comprimento da reta exposta na mencionada figura está associado à variação das amplitudes de V_1 (neste caso, entre 0,9 e 1,05 p.u.). Caso os limites de variação de V_1 superem estes patamares, outros fasores tornam-se parte do conjunto que gera $CVUF = 0\%$.

Vale ressaltar que a escolha da análise do lugar geométrico com $CVUF = 0\%$ foi estrategicamente selecionada por se tratar de uma condição onde se espera, teoricamente, que não haja risco para equipamentos decorrentes da existência de DT. Contudo, o que se observa na Figura 4.10 são inúmeros valores de amplitudes desequilibradas que se aplicados a, por exemplo, um MIT, podem reduzir, consideravelmente, a sua vida útil. Depreende-se, portanto, que a depender dos valores de V_1 , V_0 e θ_0 , é possível que certas condições de DT, quando aplicadas a um MIT com $VUF = 0\%$, por exemplo, culminem em efeitos mais nocivos do que os que seriam verificados em uma determinada combinação de tensões em que se tem $VUF = 2\%$ (Silva, 2014; Silva *et al.*, 2016).

4.3 – ANÁLISE CRÍTICA DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Nesta seção, os indicadores VUF, PVUR e LVUR, dedicados à quantificação do DT, são avaliados considerando-se os efeitos que este fenômeno causa na máxima temperatura entre as três fases dos enrolamentos do estator (T) e no rendimento (η) de um motor. Para tanto, são aplicados em laboratório sobre o MIT descrito no capítulo anterior, as condições de tensões do BD_1 . A avaliação dos mencionados indicadores é executada comparando-se as faixas de variação de T e η para cada nível de DT. Supõe-se que, quanto menor a faixa de variação de T e η para um determinado nível de DT, mais assertivo é o indicador em relação à sua associação com os efeitos desse fenômeno. Esta é uma forma efetiva de se avaliar como os citados indicadores se associam aos efeitos do DT.

Nas análises realizadas neste estudo, as tensões e o η do MIT são expressos em porcentagens de seus valores nominais (especificados pelo fabricante). Já as T são dadas em porcentagens da T_{NOM} , a qual é obtida por meio de ensaio laboratorial quando o MIT é submetido a uma T_{AMB} de 25 °C. A Tabela 4.1 mostra os valores nominais referentes ao MIT ensaiado.

Tabela 4.1 – Valores de base empregados nos testes com o MIT.

Grandeza	Acrônimo	Valor de Base/Nominal	Origem
Tensão de Linha	V_{NOM}	220 V	Fabricante
Rendimento	η_{NOM}	84,2%	Fabricante
Temperatura	T_{NOM}	79,4 °C	Ensaio

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam, nesta ordem, os valores de T e η e suas respectivas envoltórias em função dos indicadores VUF, PVUR e LVUR, os quais foram apresentados na Seção 2.2.

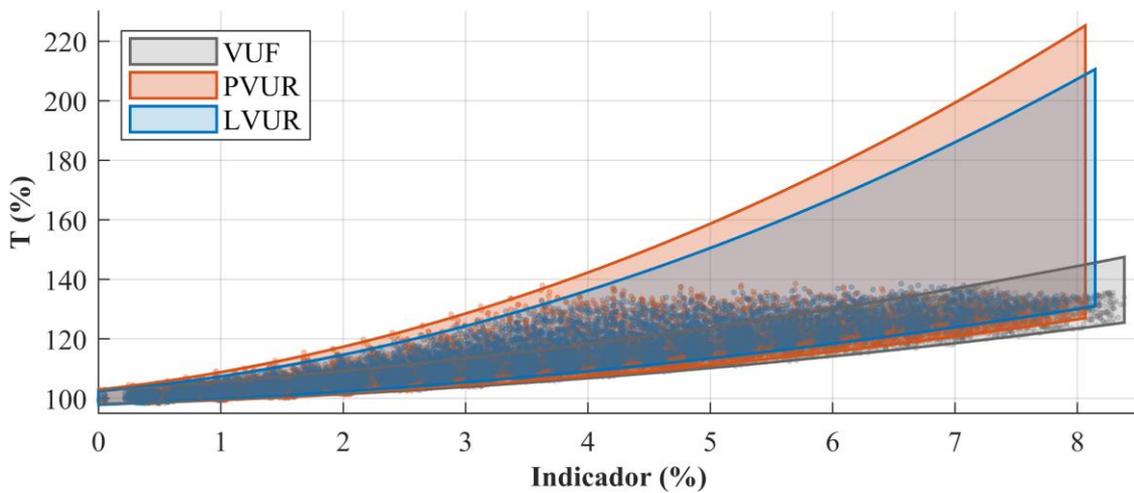


Figura 4.11 – Valores da T do MIT submetido ao BD_1 em função do VUF, PVUR e LVUR.

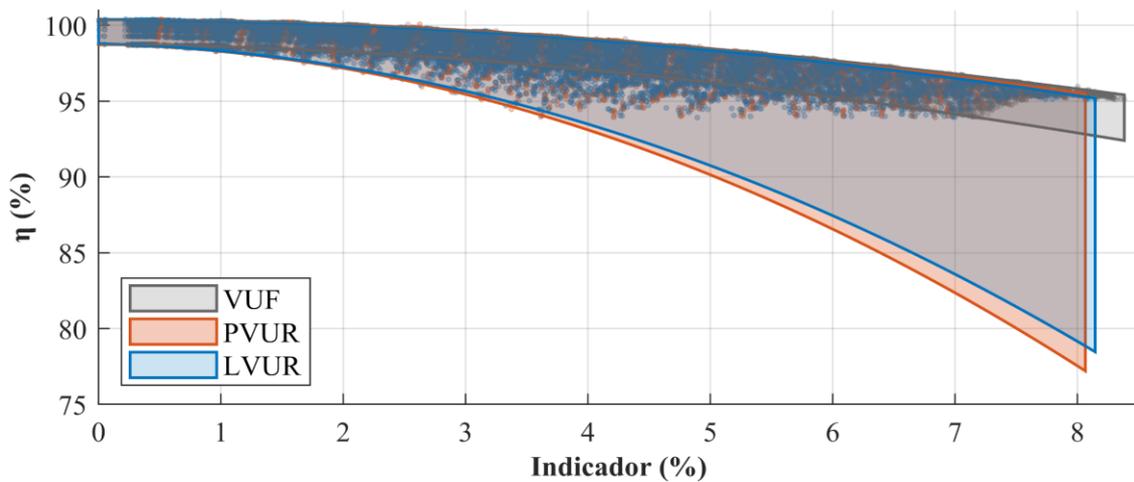


Figura 4.12 – Valores do η do MIT submetido ao BD_1 em função do VUF, PVUR e LVUR.

Embora o conjunto de tensões equilibradas e desequilibradas aplicadas sobre o MIT tenha sido o mesmo, os valores máximos de VUF, PVUR e o LVUR observados nas Figuras 4.5 e 4.6 são diferentes. Isso ocorre porque estes indicadores possuem escalas próprias. Logo, para se viabilizar uma avaliação comparativa entre estes indicadores, algumas mudanças de escalas devem ser realizadas. Com essa finalidade, os seguintes procedimentos são executados:

- 1) Inicialmente, identifica-se o máximo valor da T adquirida nos ensaios laboratoriais e o valor do VUF relacionado a essa condição. São eles: $T = 138,69\%$ e $VUF = 7,24\%$;
- 2) $T = 138,69\%$ é então associada às condições em que os indicadores PVUR e LVUR são iguais a $7,24\%$. Para exemplificar o efeito desta mudança, considere o caso do PVUR na Figura 4.11. Sem a mudança de escala, o PVUR correspondente a $T = 138,69\%$ é igual a $3,75\%$. Com a mudança proposta, o PVUR assume o valor de $7,24\%$ para a condição em que $T = 138,69\%$. Logo, quando da análise da temperatura, todos os valores do PVUR devem ser multiplicados pelo fator $7,24/3,75 = 1,93$.

Em relação ao η , o mínimo valor medido é igual a $93,85\%$ (para $VUF = 7,24\%$). Portanto, os indicadores PVUR e LVUR passam a valer $7,24\%$ quando o seu mínimo η é igual a $93,85\%$. Neste caso, aplicando-se o mesmo procedimento adotado para a T, o fator multiplicador do PVUR relacionado ao η é igual a $1,95$.

A Tabela 4.2 apresenta os fatores de multiplicação que são aplicados aos indicadores para se processar as mudanças de escalas acima mencionadas, quando da avaliação da T e do η do MIT.

Tabela 4.2 – Fatores de escalas aplicados à T e ao η para a avaliação comparativa entre o VUF, PVUR e o LVUR.

Grandeza	VUF	PVUR	LVUR
T	1,000	1,9283	1,7315
η	1,000	1,9529	1,8822

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram, nesta ordem, os valores da T e do η do MIT e suas respectivas envoltórias em função dos indicadores VUF, PVUR e LVUR, após a

realização das mudanças no eixo das abscissas. A Tabela 4.3 exibe os valores das faixas de variações da T e do η do VUF, PVUR e LVUR para a condição em que o nível de DT é igual a 2%. Conforme mencionado, este patamar corresponde ao limite estabelecido para o VUF em alguns documentos normativos que lidam com esse fenômeno.

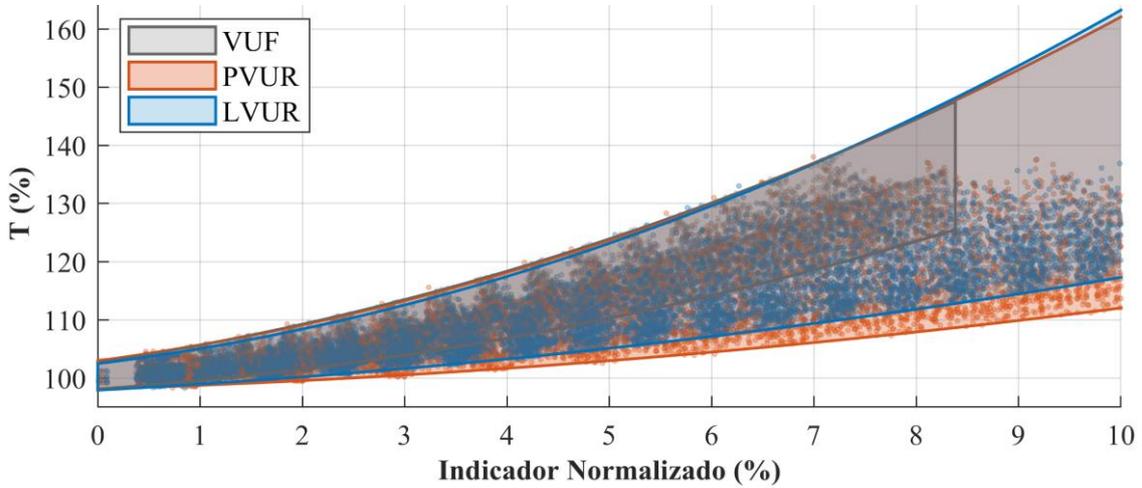


Figura 4.13 – Valores da T do MIT submetido ao BD_1 em função do VUF, PVUR e LVUR após as mudanças de escalas no eixo X.

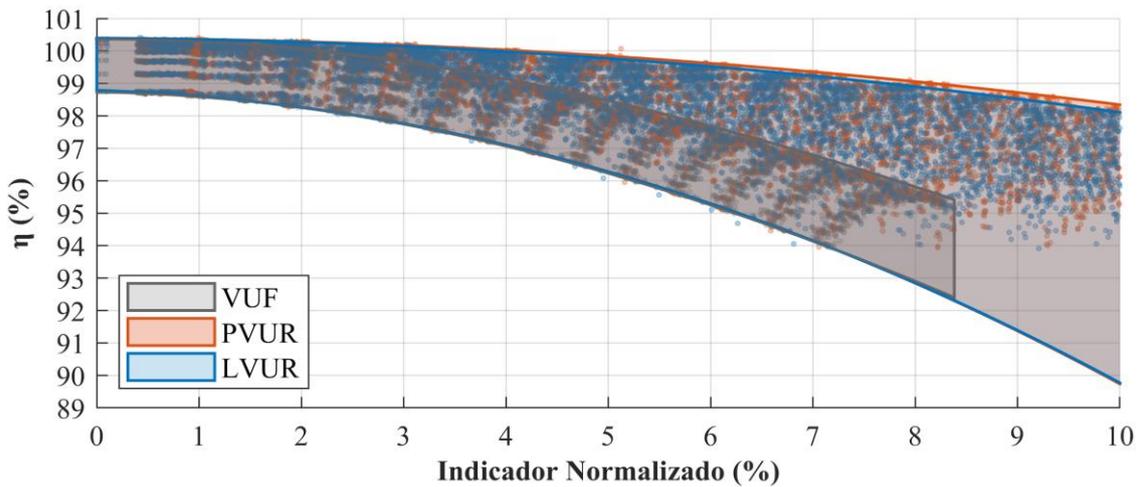


Figura 4.14 – Valores do η do MIT submetido ao BD_1 em função do VUF, PVUR e LVUR após as mudanças de escalas no eixo X.

Tabela 4.3 – Valores das faixas de variações da T e do η para a condição em que os indicadores VUF, PVUR e LVUR normalizados valem 2%.

Grandeza	VUF	PVUR	LVUR
T	7,75%	9,58	8,22
η	1,81%	2,03	2,01

Para o nível de DT igual a 2%, é possível constatar que as faixas de variação da T dos indicadores VUF, PVUR e LVUR são iguais a 7,75%, 9,58% e 8,22%, respectivamente. Portanto, o uso do VUF reduz a faixa de variação da T em 19,1% em relação ao valor obtido para o PVUR, e em 5,72% no tocante ao LVUR.

Já para o η , as faixas de variações para o VUF, o PVUR e o LVUR são 1,81%, 2,03% e 2,01%, nesta ordem. Com isso, o emprego do VUF reduz a faixa de variação do η em relação ao PVUR e ao LVUR em 10,8% e 10,0%, respectivamente. As reduções das faixas de variações tanto da T como do η , conforme mostram os gráficos das Figuras 4.13 e 4.14, tornam-se mais acentuadas à medida que os níveis de DT se distanciam de 2%.

À luz dessas constatações e, tendo em vista as faixas de variações da T e do η do VUF, PVUR e LVUR, verifica-se que o VUF é o indicador que possui o melhor desempenho para quantificar o DT. Por esta razão, no Capítulo 5 deste trabalho, o VUF será utilizado para a realização da análise comparativa com o indicador oriundo da aplicação da metodologia proposta neste estudo.

4.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo, foram apresentados dois conjuntos de avaliações relacionadas aos métodos empregados para a quantificação do DT. No primeiro conjunto, foram abordados os comportamentos das tensões de fase e de linha frente à variação das componentes simétricas. Dos resultados desta avaliação, depreende-se que:

- Com base nos gráficos e diagramas fasoriais apresentados, é possível concluir que as tensões de linha estão diretamente relacionadas à V_2 . Se $V_2 = 0$ p.u., as tensões de linha formam um triângulo equilátero cujos lados são iguais a V_1 ;
- Por outro lado, V_0 viabiliza a identificação da posição do ponto de neutro no diagrama de tensões, ou seja, tal componente permite identificar as tensões de fase que, unidas pelas extremidades, constituem as tensões de linhas impostas pelo V_2 ;
- Há infinitas combinações de V_2 com V_1 que culminam em um mesmo VUF. Isso significa que, para um mesmo VUF, podem existir diferentes conjuntos de tensões que,

se aplicadas sobre um MIT, podem produzir diferentes temperaturas, rendimentos, dentre outros efeitos;

- Se o VUF for diferente de zero, as tensões de linha são impreterivelmente desequilibradas. Em consequência, as tensões de fase também o são. Entretanto, existem condições nas quais as tensões de linha são equilibradas e as tensões de fase não são;
- O VUF_0 e os ângulos θ_0 e θ_2 podem modificar significativamente a configuração das tensões trifásicas e, conseqüentemente, alterar os efeitos causados pelo DT (Silva, 2014); e
- Existem lugares geométricos das tensões de fase para $CVUF = 0\%$ que, se aplicadas sobre um MIT conectado em estrela, podem reduzir, consideravelmente, a sua vida útil.

Já a segunda análise efetuada neste capítulo foi focada na observação de como os indicadores VUF, PVUR e LVUR se associam aos efeitos do DT no MIT. Desta avaliação foi possível concluir que as faixas de variação do VUF, tanto da T como do η do MIT, são menores do que as encontradas quando do emprego do PVUR e do LVUR. Por esta razão, o VUF foi selecionado para a realização da análise comparativa com o indicador oriundo da aplicação da metodologia proposta neste estudo.

Das investigações realizadas, foi possível constatar a existência de algumas limitações dos indicadores atualmente empregados para a quantificação do DT. Dentre elas, cabe destacar a possibilidade de se ter inúmeras condições de tensões desequilibradas associadas a um mesmo valor de VUF. Isso implica em diferentes efeitos sobre a temperatura e o η do MIT, para um mesmo VUF. Visando-se reduzir esta deficiência, no próximo capítulo é apresentado uma proposta de uma metodologia que aplicada, resulta em um indicador mais eficiente do que os disponíveis hoje na literatura.

5 – PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma proposta de metodologia para a quantificação do DT cuja aplicação culmina em um indicador denominado de fator de desequilíbrio de tensão ponderado (WVUF – do inglês *weighted voltage unbalance factor*). Este indicador contempla os efeitos conjuntos do \bar{V}_2 e do \bar{V}_1 na T e no η de motores conectados à rede elétrica.

Inicialmente, são expostas as etapas metodológicas que constituem os procedimentos necessários para a obtenção do WVUF. Em seguida, são apresentados os procedimentos empregados para a realização de uma avaliação comparativa entre o WVUF e o VUF. Assim como foi adotado no Capítulo 3 quando da análise comparativa entre o VUF, o PVUR e o LVUR, tal avaliação é efetuada por meio da investigação das faixas de variações da T e do η em função do nível de DT.

5.2 – PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

A metodologia proposta neste trabalho consiste das seguintes etapas:

- 1) Medição da T e do η do MIT submetido a condições de tensão equilibradas e desequilibradas;
- 2) Modelagem dos comportamentos médios das variações da T e do η em função de V_2 , V_1 e θ_2 ;
- 3) Modelagem dos comportamentos médios resultantes da abordagem ponderada conjunta das variações da T e do η em função de V_2 , V_1 e θ_2 ; e
- 4) Formulação do indicador WVUF.

A seguir, cada uma destas etapas será descrita em detalhes. Por se tratar de uma metodologia baseada no uso de dados de temperatura e η de MIT, optou-se por se empregar para a exposição de cada etapa metodológica, os resultados das medições executadas em laboratório com o motor descrito no Capítulo 3. Ressalta-se, no entanto, que a metodologia proposta pode ser aplicada a um conjunto de temperaturas e η adquiridos de TIM com diferentes classificações de potência e condições de carregamento. No caso de se utilizar mais de um TIM, faz-se necessário obter o comportamento médio das variações de temperatura e η considerando todas eles simultaneamente.

5.2.1 – Obtenção da Temperatura e do Rendimento de um Motor submetido a Condições Equilibradas e Desequilibradas

Na primeira etapa desta metodologia, busca-se coletar por meio do aparato laboratorial e do modelo térmico ora descritos, a T e o η do MIT submetido às condições equilibradas e desequilibradas presentes no banco de dados BD_1 . Conforme citado, o η do MIT é obtido por meio do sensor de conjugado e da medição da velocidade angular da máquina. Já a T é adquirida empregando-se o modelo térmico do MIT. O modelo térmico utilizado tem como dado de entrada as correntes elétricas coletadas no motor quando da aplicação das tensões que compõem o BD_1 .

As Figuras 5.1 a 5.3 apresentam os comportamentos da T e do η em função de V_2 , V_1 e de θ_2 , respectivamente. Tendo em vista que o DB_1 é composto por 9 valores de V_1 , 16 de V_2 e 60 de θ_2 , os gráficos da Figura 5.1 possuem 540 curvas (9×60) decorrentes das combinações de V_1 com θ_2 . Da mesma forma, considerando-se as possíveis combinações de V_2 com θ_2 , e de V_1 com V_2 , nos gráficos das Figuras 5.2 e 5.3 têm-se, respectivamente, 900 e 144 curvas experimentais.

Da Figura 5.3(a), nota-se que a influência de θ_2 na T do MIT é proporcional à amplitude de V_2 . Já da Figura 5.3(b), é possível inferir que a influência de θ_2 no η não é significativa. A seguir, os comportamentos médios da T e do η do MIT em função de V_2 , V_1 e θ_2 serão modelados.

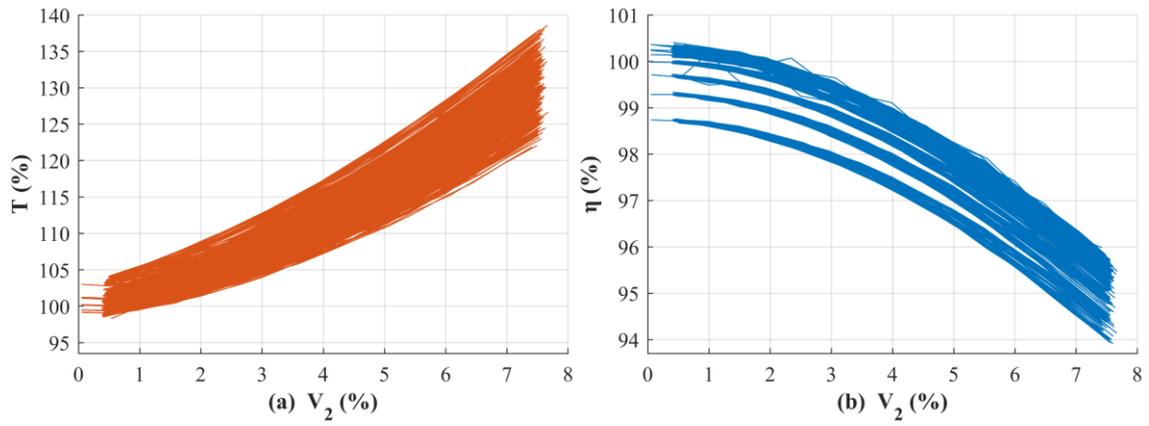


Figura 5.1 – Comportamento (a) da T e (b) do η em função de V_2 .

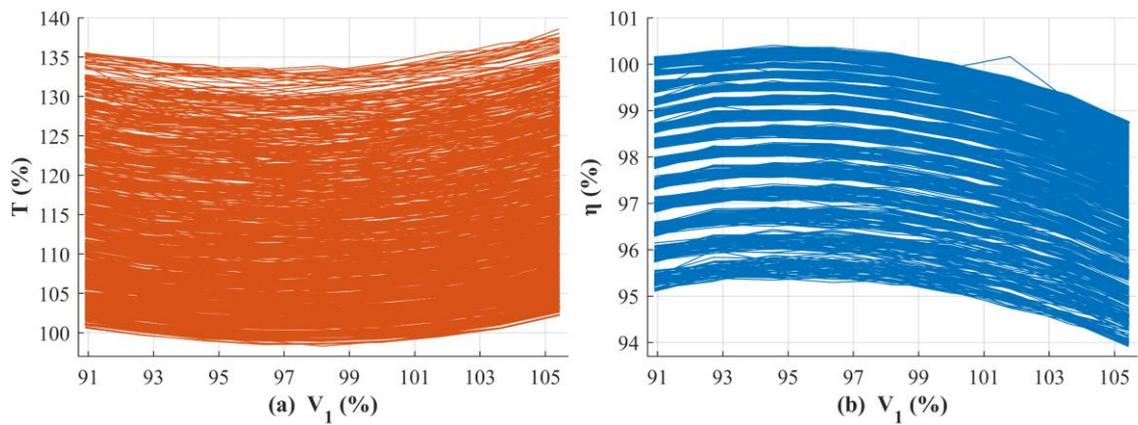


Figura 5.2 – Comportamento (a) da T e (b) do η em função de V_1 .

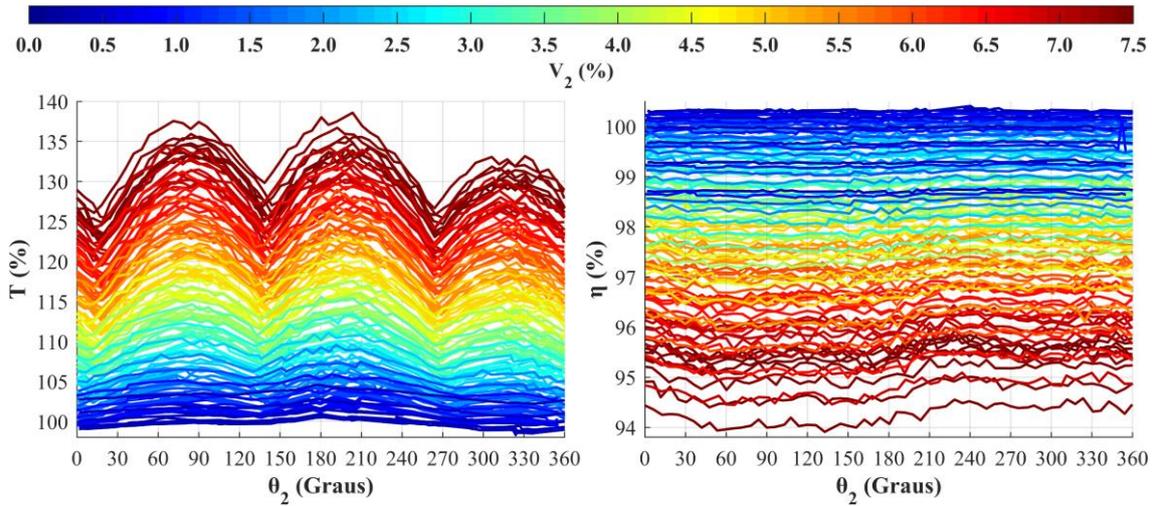


Figura 5.3 – Comportamento (a) da T e (b) do η do MIT em função de θ_2 e V_2 .

5.2.2 - Modelagem dos Comportamentos Médios das Variações da Temperatura e do Rendimento do Motor

Para a obtenção dos comportamentos médios das variações da T e do η do MIT em função de V_2 , V_1 e θ_2 , inicialmente, efetuam-se regressões numéricas em cada uma das curvas dos gráficos das Figuras 5.1 a 5.3(a). As Figuras 5.4 a 5.6 mostram os resultados das aplicações dessas regressões numéricas. Nessas figuras, as curvas pretas correspondem aos comportamentos médios da T e do η do MIT em função de V_2 , V_1 e θ_2 . Estas curvas pretas são definidas de acordo com (5.1) a (5.5). Cabe enfatizar que cada coeficiente de (5.1) corresponde à média dos 540 respectivos coeficientes de cada uma das 540 equações adquiridas via regressões numéricas. Um procedimento similar foi executado para a obtenção dos coeficientes de (5.2) a (5.5).

$$T_{V_2}(V_2)[\%] = 0,2929 V_2^2 + 1,8980 V_2 + 99,64 \quad (5.1)$$

$$\eta_{V_2}(V_2)[\%] = -0,0752 V_2^2 - 0,0723 V_2 + 99,95\% \quad (5.2)$$

$$T_{V_1}(V_1)[\%] = -4,25 \times 10^{-6} (V_1 - 97,40)^4 + 2,84 \times 10^{-4} (V_1 - 97,40)^3 + 0,0590 (V_1 - 97,40)^2 + 111,9\% \quad (5.3)$$

$$\eta_{V_1}(V_1)[\%] = -4,38 \times 10^{-7} (V_1 - 95,16)^4 - 7,11 \times 10^{-5} (V_1 - 95,16)^3 - 0,0137 (V_1 - 95,16)^2 + 98,57\% \quad (5.4)$$

$$T_{\theta_2}(\theta_2, V_2)[\%] = 1,3780 V_2 \cdot \left| \sin \left(\frac{\pi}{120} \theta_2 - 0,5474 \right) \right| + 114,30 \quad (5.5)$$

onde: T_{V_2} , T_{V_1} e T_{θ_2} , correspondem, respectivamente, aos comportamentos médios da T do MIT em função de V_2 , V_1 e θ_2 ; e η_{V_2} , η_{V_1} representam, respectivamente, os comportamentos médios do η do MIT em função de V_2 e V_1 .

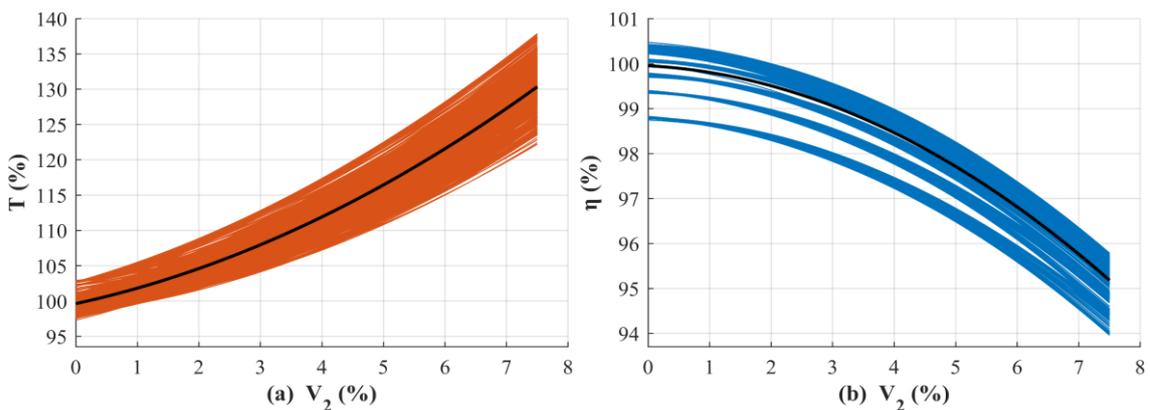


Figura 5.4 – Comportamentos médios da (a) T e do (b) η em função de V_2 oriundos das regressões numéricas.

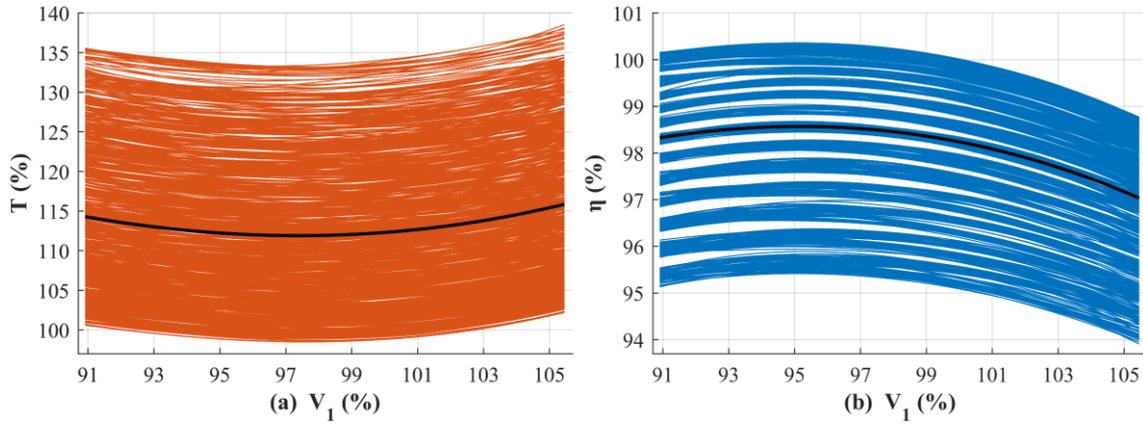


Figura 5.5 – Comportamentos médios da (a) T e do (b) η em função de V_1 oriundos das regressões numéricas.

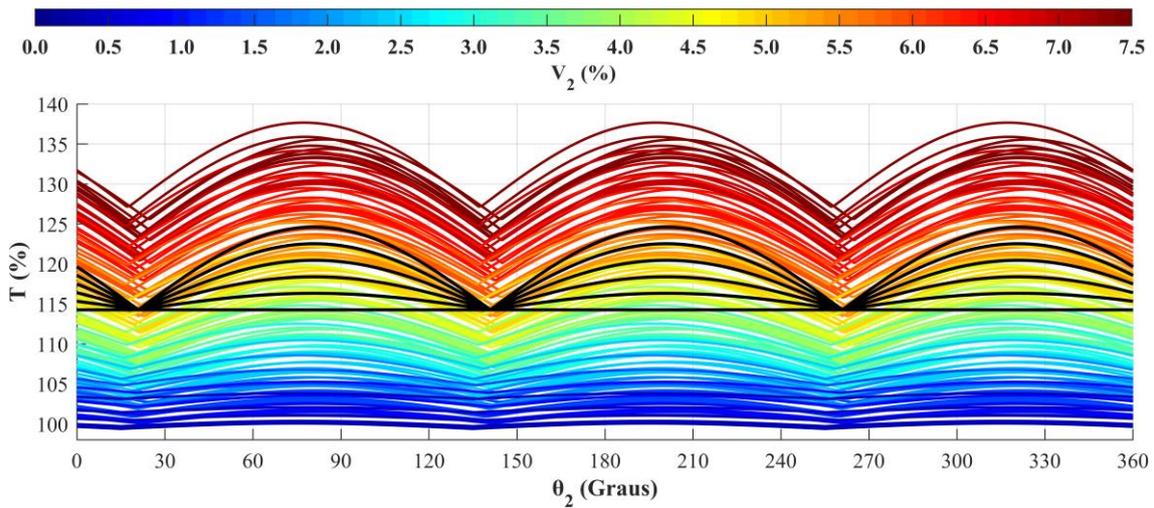


Figura 5.6 – Comportamentos médios da (a) T e do (b) η do MIT em função de θ_2 e V_2 , oriundos da aplicação de regressões numéricas.

Os comportamentos médios das variações da T e do η do MIT em função de V_2 , V_1 e θ_2 , a saber, ΔT_{V_2} , $\Delta \eta_{V_2}$, ΔT_{V_1} , $\Delta \eta_{V_1}$, ΔT_{θ_2} e $\Delta \eta_{\theta_2}$, são dados por (5.6) a (5.10). Estas curvas são obtidas por meio da eliminação dos valores constantes de (5.4) a (5.8), e pela multiplicação de (5.5) e (5.7) por -1 , de forma que as variações do η tenham a mesma direção das variações da T.

$$\Delta T_{V_2}(V_2)[\%] = 0,2929 V_2^2 + 1,8980 V_2 \quad (5.6)$$

$$\Delta \eta_{V_2}(V_2)[\%] = 0,0752 V_2^2 + 0,0723 V_2 \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{V_1}(V_1)[\%] = & -4,25 \times 10^{-6} (V_1 - 97,40)^4 + 2,84 \times 10^{-4} (V_1 - 97,40)^3 \\ & + 0,0590 (V_1 - 97,40)^2 \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\Delta\eta_{V_1}(V_1)[\%] = 4,38 \times 10^{-7}(V_1 - 95,16)^4 + 7,11 \times 10^{-5}(V_1 - 95,16)^3 + 0,0137(V_1 - 95,16)^2 \quad (5.9)$$

$$\Delta T_{\theta_2}(\theta_2, V_2)[\%] = 1,3780 V_2 \cdot \left| \sin\left(\frac{\pi}{120}\theta_2 - 0,5474\right) \right| \quad (5.10)$$

A Figura 5.7 mostra os gráficos que representam as curvas expressas em (5.6) a (5.9).

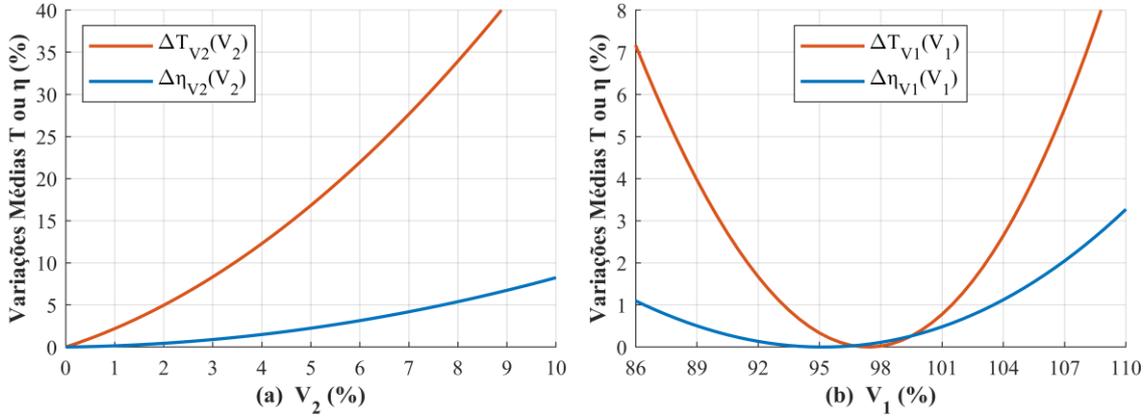


Figura 5.7 – Variações médias da T e do η em função de (a) V_2 e (b) V_1 .

5.2.3 – Modelagem dos Comportamentos Médios Conjuntos das Variações da Temperatura e do Rendimento do Motor

De modo a possibilitar a abordagem conjunta da T e do η em um mesmo modelo, algumas mudanças de escalas em (5.6) a (5.10) devem ser realizadas. A implementação da mudança na escala da T é realizada por meio da multiplicação de ΔT_{V_2} , ΔT_{V_1} e ΔT_{θ_2} por um fator F_T . Já o $\Delta\eta_{V_2}$ e o $\Delta\eta_{V_1}$ devem ser multiplicados por um fator F_η . Os valores F_T e F_η são estabelecidos conforme as equações (5.11) e (5.12), respectivamente.

$$F_T = \frac{k}{\max\{\Delta T_{V_2}(V_2)\} + \max\{\Delta T_{V_1}(V_1)\}} \quad (5.11)$$

$$F_\eta = \frac{k}{\max\{\Delta\eta_{V_2}(V_2)\} + \max\{\Delta\eta_{V_1}(V_1)\}} \quad (5.12)$$

onde: $\max\{\Delta T_{V_2}(V_2)\}$, $\max\{\Delta\eta_{V_2}(V_2)\}$, $\max\{\Delta T_{V_1}(V_1)\}$, $\max\{\Delta\eta_{V_1}(V_1)\}$ e $\max\{\Delta T_{\theta_2}(\theta_2, V_2)\}$ representam, respectivamente, as maiores T e os maiores η medidos em função de V_2 e V_1 . Já a constante k corresponde a um fator que determina a ordem de

grandeza do indicador. Neste estudo, para que a escala do WVUF seja similar à do VUF, adota-se $k = 7,5$.

Considerando-se as variações médias da T e do η adquiridos com a aplicação das condições do BD₁ sobre o MIT descrito no Capítulo 3, têm-se: $\max\{\Delta T_{V_2}(V_2)\} = 30,64\%$ e $\max\{\Delta \eta_{V_2}(V_2)\} = 4,75\%$ para $V_2 = 7,5\%$; e $\max\{\Delta T_{V_1}(V_1)\} = 3,92\%$ e $\max\{\Delta \eta_{V_1}(V_1)\} = 1,53\%$ para $V_1 = 105,5\%$. Dessa forma, os fatores F_T e F_η valem, respectivamente 0,217 e 1,194.

As mudanças de escalas descritas acima são, portanto, aplicadas em (5.6) a (5.10), o que resulta nas curvas $\Delta T_{V_2}'$, $\Delta \eta_{V_2}'$, $\Delta T_{V_1}'$, $\Delta \eta_{V_1}'$ e $\Delta T_{\theta_2}'$ descritas de acordo com (5.13) a (5.17), respectivamente.

$$\Delta T_{V_2}'(V_2)[\%] = 0,0634 V_2^2 + 0,4106 V_2 \quad (5.13)$$

$$\Delta \eta_{V_2}'(V_2)[\%] = 0,0894 V_2^2 + 0,0860 V_2 \quad (5.14)$$

$$\Delta T_{V_1}'(V_1)[\%] = -9,20 \times 10^{-7} (V_1 - 97,40)^4 + 6,13 \times 10^{-5} (V_1 - 97,40)^3 + 0,0128 (V_1 - 97,40)^2 \quad (5.15)$$

$$\Delta \eta_{V_1}'(V_1)[\%] = 5,21 \times 10^{-7} (V_1 - 95,16)^4 + 8,46 \times 10^{-5} (V_1 - 95,16)^3 + 0,0163 (V_1 - 95,16)^2 \quad (5.16)$$

$$\Delta T_{\theta_2}'(\theta_2, V_2)[\%] = 0,2981 V_2 \cdot \left| \sin \left(\frac{\pi}{120} \theta_2 - 0,5474 \right) \right| \quad (5.17)$$

A Figura 5.8(a) mostra as curvas de $\Delta T_{V_2}'$ e $\Delta \eta_{V_2}'$. Já a Figura 5.8(b) exhibe o mesmo tipo de gráfico quando da consideração de $\Delta T_{V_1}'$ e $\Delta \eta_{V_1}'$.

Os comportamentos médios ponderados resultantes da abordagem conjunta das variações da T e do η do MIT em função de V_2 , V_1 e θ_2 são definidos conforme (5.18) a (5.20). Estes comportamentos são representados pelos modelos denominados $F(V_2)$, $G(V_1)$ e $H(\theta_2, V_2)$. O $F(V_2)$ representa o comportamento médio ponderado resultante da abordagem conjunta das variações da T e do η do MIT em função de V_2 . Já o $G(V_1)$ e o $H(\theta_2, V_2)$ estão associados, respectivamente, a V_1 e a θ_2 .

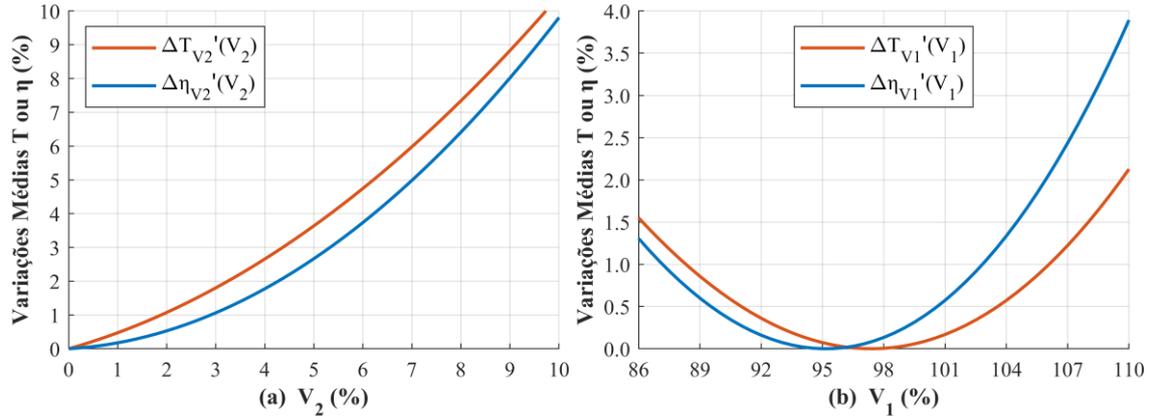


Figura 5.8 – Variações médias da T e do η em função de (a) V_2 e (b) V_1 após a aplicação das mudanças de escalas.

$$F(V_2) = P_F \cdot \Delta T_{V_2}'(V_2) + (1 - P_F) \cdot \Delta \eta_{V_2}'(V_2) \quad (5.18)$$

$$G(V_1) = P_G \cdot \Delta T_{V_1}'(V_1) + (1 - P_G) \cdot \Delta \eta_{V_1}'(V_1) \quad (5.19)$$

$$H(\theta_2, V_2) = P_H \cdot \Delta T_{\theta_2}'(\theta_2, V_2) \quad (5.20)$$

onde P_F , P_G e P_H correspondem, respectivamente, aos pesos atribuídos à T na composição das funções $F(V_2)$, $G(V_1)$ e $H(\theta_2, V_2)$. Ressalta-se que os pesos do η são complementares aos da T. Estes pesos podem variar de 0 a 1. Valores elevados de P_F , P_G e P_H tornam o WVUF mais assertivo para quantificar os efeitos da T. Por outro lado, valores de P_F , P_G e P_H próximos a zero faz com que o WVUF seja mais eficaz para quantificar os efeitos do η .

Com a finalidade de se identificar a combinação de pesos empregada no WVUF, neste estudo, foi elaborada a nomenclatura $WVUF_{P_F, P_G, P_H}$. Os subíndices P_F , P_G e P_H representam os respectivos pesos (em porcentagens) adotados em (5.18) a (5.20).

5.2.4 – Formulação do Indicador Proposto para a Quantificação do Desequilíbrio de Tensão

De posse dos modelos $F(V_2)$, $G(V_1)$ e $H(\theta_2, V_2)$, é possível obter o WVUF de acordo com (5.21). Dessa forma, as diferentes contribuições dos módulos e ângulos de \bar{V}_2 e \bar{V}_1 na T e no η do MIT são contempladas em um único indicador.

$$WVUF (\%) = F(V_2) + G(V_1) + H(\theta_2, V_2) \quad (5.21)$$

Adotando-se, por exemplo, $P_F = P_G = P_H = 0,5$ em (5.18) a (5.20) obtém-se o $WVUF_{50,50,50}$ expresso em (5.22):

$$\begin{aligned} WVUF_{50,50,50}(\%) &= 0,0764V_2^2 + 0,2483V_2 - 2 \times 10^{-7}(V_1 - 96,28)^4 \\ &+ 7,3 \times 10^{-5}(V_1 - 96,28)^3 + 0,0145(V_1 - 96,28)^2 + 0,1490V_2 \\ &\cdot \left| \sin\left(\frac{\pi}{120}\theta_2 - 0,5474\right) \right| \end{aligned} \quad (5.22)$$

A partir de (5.22), é possível verificar que, uma vez estabelecidos os pesos P_F , P_G e P_H , o $WVUF_{P_F, P_G, P_H}$ pode ser escrito de uma maneira geral como mostrado em (5.23).

$$\begin{aligned} WVUF_{P_F, P_G, P_H}(\%) &= aV_2^2 + bV_2 + c(V_1 - d)^4 + e(V_1 - d)^3 + f(V_1 - d)^2 + gV_2 \\ &\cdot \left| \sin\left(\frac{\pi}{120}\theta_2 + h\right) \right| \end{aligned} \quad (5.23)$$

onde os coeficientes 'a' a 'h' são resultantes de manipulações algébricas que envolvem os valores de P_F , P_G e P_H escolhidos e os termos dos modelos $F(V_2)$, $G(V_1)$ e $H(\theta_2, V_2)$.

5.3 – AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA ALTERNATIVA PROPOSTA

Neste trabalho, a avaliação do desempenho do WVUF é realizada por meio da sua comparação com os resultados do VUF, que, além de ser o indicador mais empregado para a quantificação do DT, apresentou o melhor desempenho quando da sua avaliação com relação aos indicadores PVUR e LVUR (exibida no Capítulo 4). Neste estudo, as combinações de pesos que resultam no $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$ foram selecionadas para a avaliação. Estes indicadores abrangem as condições nas quais os pesos da T e do η contemplam valores de 0%, 50% e 100%.

A Tabela 5.1 mostra, de acordo com (5.23), os valores dos coeficientes de 'a' a 'h' das combinações de pesos do $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$.

Tabela 5.1 – Coeficientes das funções $F(V_2)$, $G(V_1)$ e $H(\theta_2, V_2)$ de acordo com os pesos da T e do η .

Coef.	WVUF _{50,50,50}	WVUF _{50,50,100}	WVUF _{2 50,50,0}	WVUF _{100,100,100}	WVUF _{0,0,0}
a	0,07639	0,07639	0,07639	0,06336	0,08941
b	0,24831	0,24831	0,24831	0,41059	0,08602
c	$-1,997 \times 10^{-7}$	$-1,997 \times 10^{-7}$	$-1,997 \times 10^{-7}$	$-9,202 \times 10^{-7}$	$5,209 \times 10^{-7}$
d	96,28	96,28	96,28	97,40	95,16
e	$7,299 \times 10^{-5}$	$7,299 \times 10^{-5}$	$7,299 \times 10^{-5}$	$6,132 \times 10^{-5}$	$8,465 \times 10^{-5}$
f	0,01453	0,01453	0,01453	0,01275	0,01630
g	0,14904	0,29809	0	0,29809	0
h	-0,54741	-0,54741	0	-0,54741	0

A Figura 5.9 exibe, para todas as condições do BD₁, a região estabelecida pela T em função do VUF, WVUF_{50,50,50}, WVUF_{50,50,100}, WVUF_{50,50,0}, WVUF_{100,100,100} e do WVUF_{0,0,0}.

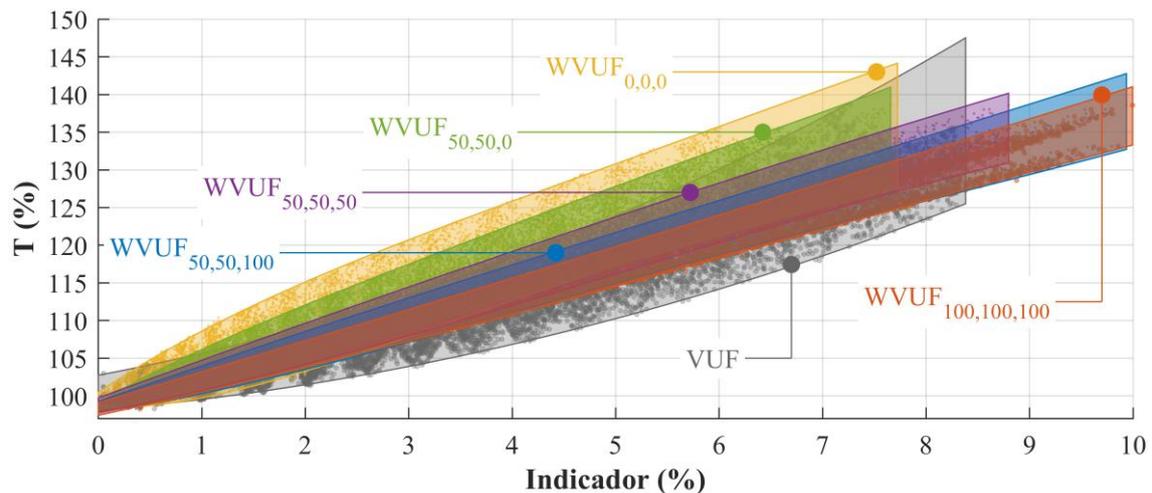


Figura 5.9 – T em função dos indicadores VUF, WVUF_{50,50,50}, WVUF_{50,50,100}, WVUF_{50,50,0}, WVUF_{100,100,100} e WVUF_{0,0,0}.

Observa-se da Figura 5.9 que a execução da metodologia proposta culmina em indicadores que possuem escalas próprias. Para que o WVUF_{50,50,50}, WVUF_{50,50,100}, WVUF_{50,50,0}, WVUF_{100,100,100} e o WVUF_{0,0,0} possam ser avaliados comparativamente com o VUF, algumas mudanças de escalas devem ser realizadas. Para tanto, os seguintes procedimentos são executados:

1) Inicialmente, identifica-se o máximo valor da T adquirida nos ensaios laboratoriais e o valor do VUF relacionado a essa condição. São eles: $T = 138,5\%$ e $VUF = 7,22\%$;

2) $T = 138,5\%$ é então associada às condições em que os indicadores $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e o $WVUF_{0,0,0}$ são iguais a $7,22\%$. Visando-se exemplificar como é efetuado este procedimento, tem-se que sem a mudança de escala, o $WVUF_{100,100,100}$ correspondente a $T = 138,5\%$ é igual a $9,38\%$. Com a mudança proposta, o $WVUF_{100,100,100}$ assume o valor de $7,22\%$ para a condição em que $T = 138,5\%$. Logo, quando da análise da temperatura, todos os valores do $WVUF_{100,100,100}$ devem ser multiplicados pelo fator $7,22/9,38 = 0,76994$.

Em relação ao η , identificou-se o mínimo valor medido de $93,86\%$ (para $VUF = 7,22\%$). Portanto, os indicadores $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$ passam a valer $7,22\%$ quando o seu mínimo rendimento é de $93,86\%$. Neste caso, aplicando-se o mesmo procedimento adotado para a T, o fator multiplicador do $WVUF_{100,100,100}$ relacionado ao η é igual a $0,94085$.

A Tabela 5.2 apresenta os fatores de multiplicação que são aplicados aos indicadores para se realizar as mudanças de escalas acima mencionadas.

Tabela 5.2 – Fatores de escalas aplicados à T e ao η para o $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e o $WVUF_{0,0,0}$.

Grand.	$WVUF_{50,50,50}$	$WVUF_{50,50,100}$	$WVUF_{50,50,0}$	$WVUF_{100,100,100}$	$WVUF_{0,0,0}$
T	0,86601	0,81201	1,00940	0,76994	1,12850
η	0,94169	0,94103	0,93826	0,94085	0,94788

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram, respectivamente, a T e o η em função dos indicadores VUF, $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$ após as mudanças no eixo das abscissas.

Para avaliar numericamente o desempenho dos indicadores apresentados nas Figuras 5.10 e 5.11, é necessário calcular as diferenças entre os limites superior e inferior da T e do η para cada nível de DT. Com esses resultados, é possível identificar a variação da T e do η de cada WVUF em relação àquela obtida para o VUF. Supõe-se que quanto menor essa faixa de variação, mais assertivo o indicador será para associar os efeitos desse fenômeno.

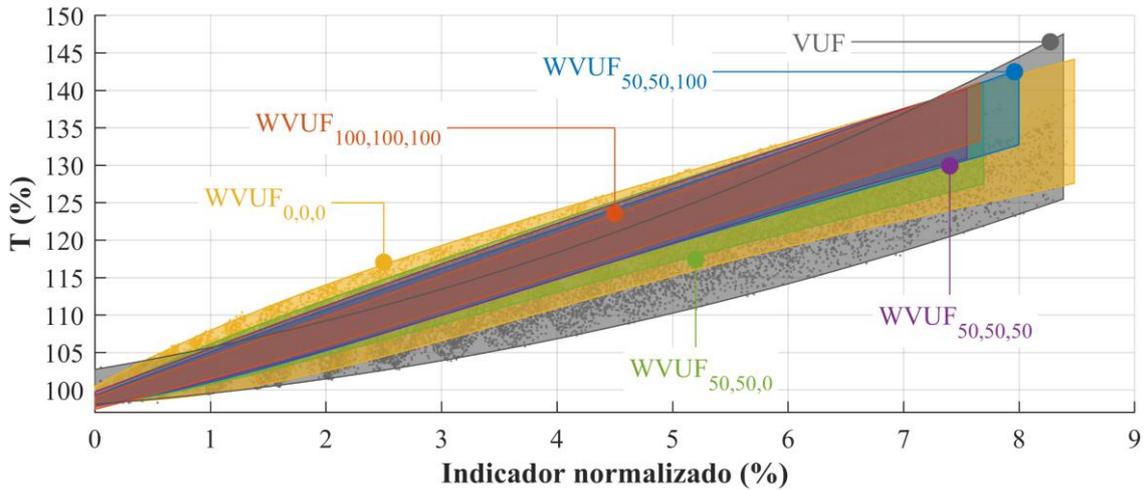


Figura 5.10 – T em função dos indicadores VUF, $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$ após as mudanças de escalas no eixo X.

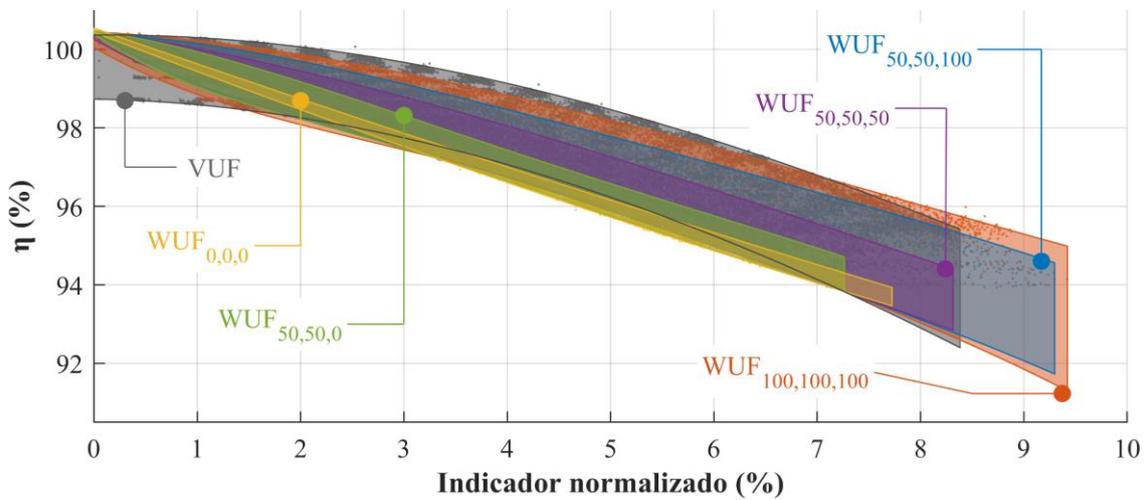


Figura 5.11 – η em função dos indicadores VUF, $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$ após as mudanças de escalas no eixo X.

As Figuras 5.12 e 5.13 mostram, respectivamente para a T e para o η , as faixas de variações do VUF, $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e do $WVUF_{0,0,0}$.

Considerando-se o nível de DT igual a 2% (limite estabelecido para o VUF em alguns documentos normativos que lidam com esse fenômeno), é possível observar na Figura 5.12 que a faixa de variação de T é igual a 3,78% ao utilizar o $WVUF_{100,100,100}$ e 7,75% para o VUF. Portanto, o emprego do $WVUF_{100,100,100}$ reduz a faixa de variação da T em 51,2% em relação ao valor obtido para o VUF. Todos os indicadores avaliados, com exceção do $WVUF_{0,0,0}$, resultam em reduções das faixas de variação da T em relação ao VUF. Somente o $WVUF_{0,0,0}$ exibiu faixas de variações superiores às do VUF para o

intervalo entre 0,5% e 4,9%. Ressalta-se que os pesos adotados para este indicador priorizam o η .

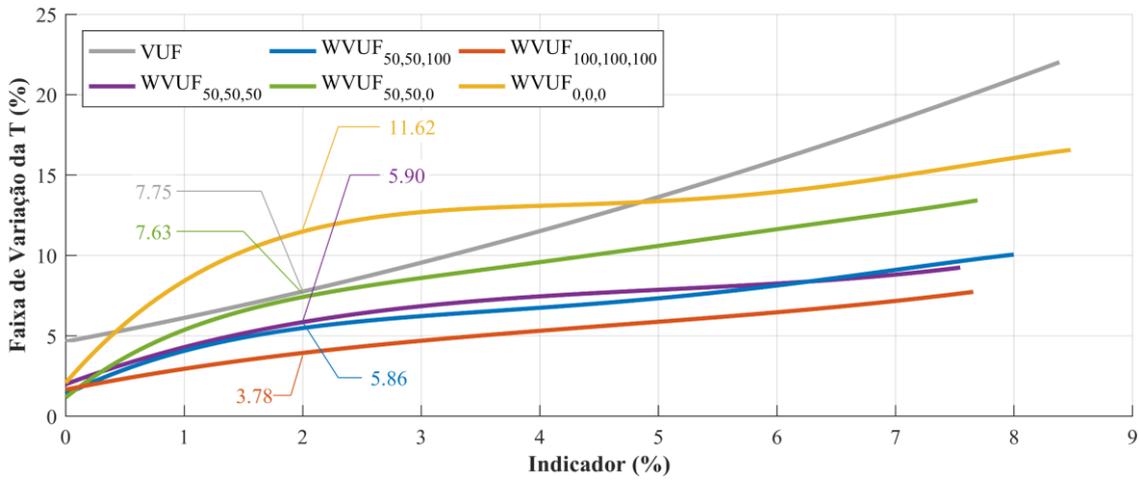


Figura 5.12 – Faixa de variação da T em função dos indicadores VUF, WVUF_{50,50,50}, WVUF_{50,50,100}, WVUF_{50,50,0}, WVUF_{100,100,100} e WVUF_{0,0,0}.

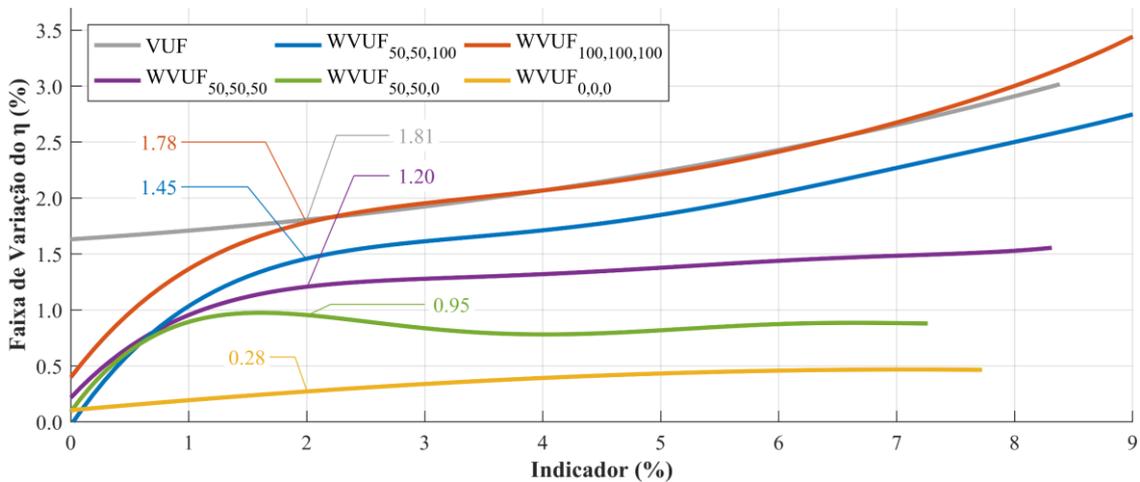


Figura 5.13 – Faixa de variação do η em função dos indicadores VUF, WVUF_{50,50,50}, WVUF_{50,50,100}, WVUF_{50,50,0}, WVUF_{100,100,100} e WVUF_{0,0,0}.

Na Figura 5.13, para o nível de DT igual a 2%, a faixa de variação do η para o WVUF_{0,0,0} é igual a 0,28% e para o VUF esse valor é de 1,81%, o que significa uma redução de 84,5% em relação à faixa de variação adquirida pelo VUF.

Com base nos resultados das Figuras 5.12 e 5.13, é possível verificar que o WVUF_{100,100,100} e o WVUF_{0,0,0} apresentam os melhores desempenhos para avaliar individualmente a T e o η , respectivamente.

Restringindo-se a análise aos indicadores que contemplam conjuntamente a T e o η para o nível de DT igual a 2%, o $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$ e $WVUF_{50,50,0}$ apresentam faixas de variações da T inferiores às do VUF em, respectivamente, 19,6%, 24,4% e 1,5%. Pode-se verificar que para este nível de DT (2%), embora o $WVUF_{50,50,100}$ tenha o melhor desempenho para a T , o $WVUF_{50,50,50}$ apresentou uma redução significativa em sua faixa de variação. Esses aspectos podem ser observados para a maioria dos níveis de DT exibidos na Figura 5.12.

Quando da avaliação do η , as faixas de variações dos indicadores $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$ e $WVUF_{50,50,0}$ são inferiores às do VUF em, respectivamente, 33,7%, 22,7% e 50,3%. Nesse caso, o $WVUF_{50,50,0}$ culminou no melhor desempenho. Mais uma vez, o $WVUF_{50,50,50}$ apresentou uma redução expressiva na faixa de variação do η . Isso também pode ser verificado para outros níveis de DT além de 2%.

Dado que o $WVUF_{50,50,50}$ resultou em reduções significativas nas faixas de variação tanto da T como do η , assume-se que este é o indicador mais apropriado para quantificar os efeitos do DT.

5.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, uma metodologia alternativa para a quantificação do DT baseada nos efeitos deste fenômeno sobre a temperatura e o η do MIT foi apresentada. A aplicação desta metodologia culmina em um índice ($WVUF$) que reduz as incertezas inerentes ao procedimento de quantificação do DT. Visando-se aplicar esta metodologia e avaliar o desempenho do índice obtido, as condições contidas no BD_1 foram empregadas para alimentar um MIT.

Cada fase da mencionada metodologia foi exibida passo a passo. A primeira etapa consistiu na obtenção das T e dos η do MIT submetido às condições equilibradas e desequilibradas do banco de dado BD_1 . Para tanto, foi empregado o aparato laboratorial descrito no Capítulo 3.

Na segunda etapa, teve-se como objetivo modelar os comportamentos médios das variações da T e do η do MIT em função de V_2 , V_1 e θ_2 . Para se obter esses modelos, foi

necessário aplicar regressões numéricas a cada uma das curvas da T e do η obtidas experimentalmente.

Já a terceira etapa teve como propósito a modelagem dos comportamentos médios resultantes das abordagens conjuntas das variações da T e do η do MIT em função de V_2 , V_1 e θ_2 . Estes comportamentos são representados, respectivamente, pelos modelos $F(V_2)$, $G(V_1)$ e $H(\theta_2, V_2)$. Com o intuito de obter $F(V_2)$, $G(V_1)$ e $H(\theta_2, V_2)$, inicialmente, foram realizadas mudanças de escalas em ΔT_{V_2} , $\Delta \eta_{V_2}$, ΔT_{V_1} , $\Delta \eta_{V_1}$, ΔT_{θ_2} e $\Delta \eta_{\theta_2}$. Por fim, os modelos $F(V_2)$, $G(V_1)$ e $H(\theta_2, V_2)$ foram obtidos após a seleção dos pesos que representam a contribuição da T e do η no processo de quantificação do DT.

Na última etapa da citada metodologia, as diferentes contribuições dos módulos e dos ângulos de \bar{V}_2 e \bar{V}_1 na T e no η do MIT foram contempladas na elaboração do WVUF.

Cabe destacar que a metodologia proposta pode ser aplicada a um conjunto de T e η adquiridos de diversos motores com diferentes potências nominais e condições de carregamento. No caso do emprego de vários motores, faz-se necessário obter as variações médias da T e do η em função de V_2 , V_1 e θ_2 , considerando-se os resultados das medições de todos os MIT simultaneamente.

Após a aplicação da metodologia proposta neste estudo, foi efetuada a avaliação do desempenho do WVUF. Tal análise foi realizada por meio da comparação das faixas de variações da T e do η de cada nível de DT do WVUF, em relação às respectivas variações adquiridas com o uso do VUF.

Neste processo de avaliação comparativa, o WVUF foi calculado empregando-se as seguintes combinações de pesos: $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e $WVUF_{0,0,0}$. Da avaliação realizada foi possível constatar que o $WVUF_{100,100,100}$ e o $WVUF_{0,0,0}$ apresentam os melhores desempenhos quando, individualmente, se avalia a T e do η , respectivamente.

O emprego do indicador $WVUF_{50,50,50}$ resulta em reduções significativas nas faixas de variações da T e do η do MIT. Por esta razão, o $WVUF_{50,50,50}$ foi identificado neste trabalho como o mais apropriado para quantificar os efeitos do DT.

6 – CONCLUSÕES

Muito embora tenham sido exibidos comentários conclusivos ao final de cada capítulo desta tese, apresenta-se nesta seção uma síntese dos trabalhos realizados e de seus desdobramentos.

Este estudo teve como objetivo principal a apresentação de uma proposta de metodologia alternativa para a quantificação do DT baseada nos efeitos desse fenômeno na T e no η do MIT. A aplicação dessa metodologia resulta no indicador WVUF, o qual contempla em sua formulação os efeitos não lineares da T e do η do MIT em relação às variações de \bar{V}_2 e \bar{V}_1 .

No Capítulo 1 buscou-se exprimir, de uma forma geral, a atual condição do tema com relação à área de qualidade da energia elétrica, e ainda, a necessidade de estudos direcionados ao DT. Adicionalmente, ressaltou-se as lacunas a serem preenchidas, e estabeleceu-se os objetivos gerais desta tese.

O Capítulo 2 prestou-se à apresentação dos principais tópicos que compõem o termo DT. Neste sentido, enfatizou-se os métodos de quantificação do desequilíbrio, suas causas, seus efeitos, e algumas normas e recomendações que abordam o mencionado fenômeno. Para a quantificação do DT, foram exibidos quatro métodos. Dois deles se baseiam nas componentes simétricas, e em três, os indicadores são obtidos por meio dos módulos das tensões de linha ou de fase. De todo o exposto, observou-se que o VUF calculado partindo-se do método das componentes simétricas é empregado por diversas normas sobre DT. O limite máximo de 2% é, predominantemente, utilizado como índice de conformidade pela maioria das normas.

Executou-se também nesse capítulo, uma revisão bibliográfica focada nos estudos sobre a quantificação do desequilíbrio e a caracterização de seus efeitos sobre os equipamentos do sistema elétrico. Com base no levantamento realizado, depreende-se que diversas condições de DT, as quais produzem diferentes efeitos em equipamentos elétricos, podem estar associadas ao mesmo indicador empregado para a sua quantificação. Com o intuito de superar esta limitação, alguns autores sugerem o emprego conjunto do V_1 ou do θ_2

com o VUF. No entanto, esses procedimentos não se comprovaram viáveis o suficiente para alterar os já consolidados métodos de cálculo do mencionado fenômeno. O principal motivo disso é que o processo de estabelecimento de níveis de compatibilidade se torna mais complexo quando se emprega simultaneamente mais de um indicador para a caracterização do DT.

Na sequência (Capítulo 3), foram descritos o aparato laboratorial desenvolvido e os métodos e os procedimentos que viabilizaram i) a execução da avaliação crítica dos indicadores dedicados à quantificação do DT (Capítulo 4), e ii) a aplicação da metodologia proposta neste estudo (Capítulo 5). Foram também apresentados neste capítulo os dois bancos de dados (BD_1 e BD_2) constituídos por um abrangente conjunto de tensões equilibradas e desequilibradas. Tais tensões foram aplicadas, em laboratório, sobre o MIT analisado. As duas ferramentas que viabilizaram a obtenção das temperaturas do motor empregado nas investigações, a saber, o modelo térmico da máquina de indução e a técnica de otimização, foram também detalhadas. Esta última é baseada no método matemático de otimização dos mínimos quadrados.

Com base na medição do erro médio entre as temperaturas medidas e aquelas oriundas do modelo térmico, concluiu-se que as ferramentas utilizadas para a obtenção das temperaturas nos enrolamentos do estator do MIT são eficazes e precisas.

O Capítulo 4 teve como meta a realização de uma análise crítica dos métodos de quantificação do DT. Com este propósito, foram expostas uma avaliação do comportamento das tensões de fase e de linha frente a variação dos módulos e dos ângulos das componentes de sequência, e ainda, uma análise comparativa do desempenho de alguns dos indicadores utilizados para a quantificação do DT. Estes estudos permitiram a identificação das limitações dos atuais indicadores voltados à quantificação do DT.

Do primeiro estudo, constatou-se que as tensões de linha estão diretamente relacionadas ao V_2 . Dessa forma, se $V_2 = 0$ p.u., as tensões V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} formam um triângulo equilátero cujos módulos são iguais ao do V_1 . Caso contrário, pelo menos uma das tensões de linha será diferente das demais. Em contrapartida, o V_0 viabiliza a identificação da posição do ponto de neutro, o qual determina a origem das tensões de fase (V_A , V_B e V_C). Dessas análises, verificou-se que há inúmeras combinações de V_2 com V_1 que culminam

em um mesmo VUF. Por esta razão, concluiu-se que podem existir diferentes conjuntos de tensões que resultam em um mesmo VUF e geram diversificados efeitos em equipamento elétricos como, por exemplo, o MIT.

A segunda análise realizada no Capítulo 4 foi focada nos três principais indicadores empregados para a quantificação do DT, a saber, o VUF, o PVUR e o LVUR. Estes indicadores foram avaliados comparativamente por meio das faixas de variações da T e do η do MIT submetido em laboratório às 8244 combinações de tensões do BD₁. O indicador mais assertivo para quantificar o DT corresponde àquele que apresenta as menores faixas de variações.

Verificou-se que o VUF, o PVUR e o LVUR possuem escalas próprias, o que inviabiliza as suas comparações de forma direta. Por esta razão, neste estudo, também foi proposto um procedimento que consiste em aplicar mudanças nas escalas dos indicadores em questão e, com isso, viabilizar a comparação de seus desempenhos.

Uma vez efetuadas as mudanças de escalas e identificadas as faixas de variações da T e do η do MIT para o VUF, o PVUR e o LVUR, foi possível concluir que as faixas de variações do VUF, tanto da T como do η , são menores do que as encontradas quando do emprego do PVUR e do LVUR. Com base nesse resultado, o VUF foi selecionado neste trabalho para a realização da análise comparativa com o WVUF.

Os procedimentos voltados para a execução da metodologia proposta neste estudo foram exibidos passo a passo no Capítulo 5. Para tanto, inicialmente, modelou-se os comportamentos médios das variações da T e do η do MIT sob teste. Em seguida, foram obtidos os modelos que representam os comportamentos médios resultantes da abordagem ponderada conjunta das variações da T e do η em função de V_2 , V_1 e θ_2 . De posse desses modelos, foi possível obter a equação do $WVUF_{P_F, P_G, P_H}$. Para tanto, foi efetuada a escolha dos pesos da T e do η (P_F , P_G e P_H) para o V_2 , o V_1 e o θ_2 .

Para a avaliação comparativa entre o WVUF e o VUF, foram empregadas as faixas de variações da T e do η destes indicadores. No caso do WVUF, foram selecionados para análise os seguintes pesos: $WVUF_{50,50,50}$, $WVUF_{50,50,100}$, $WVUF_{50,50,0}$, $WVUF_{100,100,100}$ e

WVUF_{0,0,0}. Como estes indicadores possuem escalas próprias, foram necessárias algumas mudanças com a finalidade de viabilizar a avaliação comparativa entre eles e o VUF.

Efetuada as mudanças de escalas, verificou-se que, como esperado, o WVUF_{100,100,100} e o WVUF_{0,0,0}, respectivamente, apresentam os melhores desempenhos para avaliar individualmente a T e o η do MIT. Isso ocorre porque os pesos empregados no WVUF_{100,100,100} priorizam os efeitos da T, e os pesos utilizados no WVUF_{0,0,0} favorecem o η .

Já o WVUF_{50,50,50} corresponde à combinação de pesos mais apropriada para se quantificar os efeitos do DT quando se considera as faixas de variações da T e do η simultaneamente. O WVUF_{50,50,50}, quando comparado ao VUF, reduz significativamente as incertezas inerentes ao processo de quantificação do DT. Por esta razão, o WVUF_{50,50,50} foi estabelecido neste estudo como o mais apropriado para representar os efeitos do DT. Este indicador corresponde àquele em que a T e o η são ponderados na mesma proporção para o V_1 , V_2 e θ_2 .

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, é possível inferir que a metodologia proposta resultou em um indicador que pode representar os efeitos conjuntos de \bar{V}_2 e de \bar{V}_1 na T e no η de motores conectados ao sistema elétrico. As vantagens vinculadas ao WVUF o designam como uma alternativa potencial para aplicações industriais e também em substituição aos tradicionais métodos de quantificação do DT presentes nas principais normas que versam sobre o assunto.

Sabe-se que o WVUF encontrado neste estudo está relacionado com as características do MIT empregados nos testes. Por esta razão, como trabalhos futuros, recomenda-se realizar investigações que permitam a inclusão de outros MIT (com diferentes potências e (ou) condições de carregamento) para a elaboração do WVUF.

A metodologia proposta pode ser aplicada a um conjunto de T e η adquiridos de diversos motores. Neste caso, faz-se necessário obter as variações médias da T e do η em função de V_2 , V_1 e θ_2 , considerando-se os resultados das medições de todos eles simultaneamente. Dado que os comportamentos médios da T e do η são normalizados, espera-se que os resultados alcançados, empregando-se MIT com diferentes potências e

condições de carregamento, não sejam significativamente discrepantes dos resultados obtidos neste trabalho.

No presente estudo, desconsiderou-se a parcela do DT proveniente da componente de sequência zero, ou seja, o WVUF foi concebido com base na influência apenas do \bar{V}_2 e do \bar{V}_1 . Entretanto, a metodologia proposta neste estudo pode ser adaptada de forma a obter um indicador que seja eficaz na quantificação do DT em análises a quatro fios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbi, Y.P. e Jain, S. (2006). “Handbook on energy audit and environment management.” The Energy and Resources Institute (TERI).
- Abreu, J.P.G., Emanuel, A.E. (2002). “Induction Motor Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and Its Estimated Cost.” In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no 1.
- Agamloh, E.B., Peele, S. e Grappe J. (2017). “Operation of Variable-Frequency Drive Motor Systems with Source Voltage Unbalance,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 6, pp. 6038–6046, 2017.
- ANEEL (2000). “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.
- Anwari, M. e Hiendro, A. (2010). “New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under-and overvoltage unbalance,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 619–625.
- Bollen, Math H.J., Gu, Irene Y.H. (2006) “Signal Processing of Power Quality Disturbances.” IEEE Press Series on Power Engineering.
- Bousbaine, A., McCornick, M., Low, W.F. (1995) “In-Situ Determination of Thermal Coefficients for Electrical Machines.” In: *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 3, p. 385-391.
- Bronzeado, H.S. (2002) “Qualidade da Energia Elétrica - Conceitos, Problemas e Soluções”. Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da UFPE – FADE.
- Campbell, M. e Arce, G. (2018). “Effect of Motor Voltage Unbalance on Motor Vibration: Test and Evaluation,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 1, pp. 905–911.
- Chowdhury, S.K., Baski, P.K. (2010) “A Simple Lumped Parameter Thermal Model for Electrical machine of TEFC Design.” In: *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India*, p. 1-7.
- Gonzalez-Cordoba, J.L., Osornio-Rios, R.A. , Granados-Lieberman, D., Romero-Troncoso, R.D.J., e Valtierra-Rodriguez, M. (2017) “Correlation model between voltage unbalance and mechanical overload based on thermal effect at the induction

- motor stator,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, no. 4, pp. 1602–1610.
- Corres, J.M., Bravo, J., Arregui, F.J. e Matias, I.R. (2006) “Unbalance and harmonics detection in induction motors using an optical fiber sensor,” *IEEE Sens. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 605–612.
- Donolo, P., Bossio, G., Angelo, C., García, G. e Donolo, M. (2016). “Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 140, pp. 866–873.
- El-Kharashi, E., El-Dessouki, M., Massoud, J.G., Farid, A.W. e Al-Ahmar, M.A. (2018). “The use of the current complex factor to determine the precise output energy of the induction motor,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 154, pp. 23–36.
- EN 50160 (1995) “Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems.” European Committee for Electrotechnical Standardisation (CENELEC)
- Faiz, J., Ebrahimpour, H. e Pillay, P. (2004). “Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 4, pp. 657–662.
- Filho, A.L.F. (2008) “Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão.” Tese de Doutorado, Universidade de Brasília.
- Fortescue, C.L. (1918) “Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks.” In: *34th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineering*, Atlantic City, N. J., p. 1027-1140.
- Gnacinski, P. (2008) “Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine.” In: *ScienceDirect Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 4, p. 761-770.
- Gnacinski, P. (2009). “Derating of an induction machine under voltage unbalance combined with over or undervoltages,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 4, pp. 1101–1107.
- Gonzalez-Cordoba, J.L., Osornio-Rios, R.A., Granados-Lieberman, D., Romero-Troncoso, R.D.J., e Valtierra-Rodriguez, M. (2017). “Correlation Model between Voltage Unbalance and Mechanical Overload Based on Thermal Effect at the Induction Motor Stator,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, no. 4, pp. 1602–1610.
- IEC 61000-4-30 (2015) “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.”, International

Standard.

- IEEE std. 1159 (2019) “IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.” Power Systems Engineering Committee of the Industrial and Commercial Power Systems Department of the IEEE Industry Applications Society.
- Kini, P.G., Bansal, R.C. e Aithal, R.S. (2007) “A novel approach toward interpretation and application of voltage unbalance factor,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2315–2322.
- Lee, C.Y. (1999). “Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 2, pp. 202–208.
- Mellor, P.H., Roberts D., Turner D.R. (1991) “Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design.” In: *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, vol. 138, no. 5, p. 205-218.
- Moazen, M., Kazemzadeh, R. e Azizian, M.R. (2016). “Mathematical modeling and analysis of brushless doubly fed reluctance generator under unbalanced grid voltage condition,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 83, pp. 547–559.
- Mortazavian, S., Shabestary, M.M. e Mohamed, Y.A.R.I. (2017). “Analysis and Dynamic Performance Improvement of Grid-Connected Voltage-Source Converters under Unbalanced Network Conditions,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 10, pp. 8134–8149.
- NRS 048-2 (2003) “Electricity Supply – Quality of Supply – Part 2: Voltage Characteristics, Compatibility Levels, Limits and Assessment Methods.” Printed by Standards South Africa.
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico (2011) “Procedimentos De Rede, Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes.” Revisão 2.0, data de vigência 01 de janeiro de 2017.
- Oraee, H. (2000) “A Quantitative Approach to Estimate the Life Expectancy of Motor Insulation Systems.” In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, no. 6, p. 790-796.
- Pillay, P., Hofmann, P. (2001) “Derating of Induction Motors Operating with a Combination of Unbalanced Voltages and Over- or Undervoltages.” In: *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, p. 1365–1371.

- Pillay, P., Manyage, M. (2006) “Loss of Life in Induction Machines Operating With Unbalanced Supplies.” In: *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 4, p. 813–822.
- PRODIST, ANEEL (2018) “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.” Revisão 10, vigente a partir de 01 de janeiro de 2018.
- Sen Kurt, M., Balci, M.E. e Abdel S.H.E.A. (2017). “Algorithm for estimating derating of induction motors supplied with under/over unbalanced voltages using response surface methodology,” *The Journal of Engineering.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7.
- Shenkman A., Chertkov M (1999) “Heat conditions of a three-phase induction motor by a one-phase supply.” In: *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 146, no. 4, p. 361-367.
- Silva, M.D.C. (2014). “Análise da influência das componentes de sequência positiva, negativa e zero sobre as temperaturas de um motor de indução trifásico.” Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília.
- Silva, M.D.C, Filho, A.L.F., Neves, A.B.F., e Mendonça, M.V.B. (2016). “Effects of sequence voltage components on torque and efficiency of a three-phase induction motor,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 140, pp. 942–949.
- Silva, M.D.C., Filho, A.L.F., Rosa, G.Z. e Abada, C.C. (2018). “Evaluation of the performance of a simplified thermal model of a three-phase induction motor submitted to voltage imbalances,” in *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, vol. 2018–May, pp. 1–6.
- Singh, R.R., Selvaraj, R., Mohan, H. e Chelliah, T.R. (2018). “Dynamic Performance of Doubly Fed Hydroelectric Machines under Voltage Unbalance - A Relative Electrothermomechanical Analysis,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 5, pp. 4156–4166.
- Souto, O.C.N., Oliveira, J.C. e Neto, L.M. (2000) “Induction motors thermal behaviour and life expectancy under non-ideal supply conditions,” *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 3, pp. 899–904.
- Souto, O.C.N. (2001) “Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de Indução sob Condições não Ideias de Alimentação.” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Wang, Y.J. (2001). “Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor,” *IEEE*

Trans. Energy Convers., vol. 16, no. 3, pp. 270–275.

Wikipédia (2020a). “Condução Térmica” Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Condução_térmica>. Acesso em janeiro de 2020.

Wikipédia (2020b). “Convecção” Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Convecção>>. Acesso em janeiro de 2020.

Wikipédia (2020c). “Irradiação Térmica” Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Irradiação_térmica>. Acesso em janeiro de 2020.

Xu, T., Pan, J., Jiang, Y., Hou, H. e Li, Y. (2015). “The effect of three-phase voltage imbalance at PCC on solar panel output power,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 1218–1224.