



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DO
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO
A DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

MARIA LEONOR SILVA DE ALMEIDA

BRASÍLIA, FEVEREIRO DE 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DO
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO
A Desequilíbrios de Tensão

MARIA LEONOR SILVA DE ALMEIDA

ORIENTADOR: ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM – 515/2013

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO - 2013.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DO
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO
A DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

MARIA LEONOR SILVA DE ALMEIDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

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

Prof. Kleber Melo e Silva, Dr. (ENE - UnB)
(Examinador Interno)

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

BRASÍLIA/DF, 22 DE FEVEREIRO DE 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

ALMEIDA, MARIA LEONOR SILVA DE

Avaliação da Temperatura do Motor de Indução Trifásico submetido a

Desequilíbrios de Tensão. [Distrito Federal] 2013.

xvii, 137p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2013)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de
Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Qualidade da Energia Elétrica

2. Motor de Indução Trifásico

3. Desequilíbrio de tensão

4. Análise Térmica

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, M. L. S. (2013). Avaliação da Temperatura do Motor de Indução Trifásico submetido a Desequilíbrios de Tensão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEEDM - 515/2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Maria Leonor Silva de Almeida.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação da Temperatura do Motor de Indução Trifásico submetido a Desequilíbrios de Tensão.

GRAU / ANO: Mestre / 2013

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

Maria Leonor Silva de Almeida
Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica 70910-900
Brasília, Distrito Federal - Brasil.

Agradecimentos

Agradeço a Deus que é luz constante guiando meus passos.

Agradeço ao professor Anésio de Leles Ferreira Filho pela confiança depositada em mim, pela dedicação incansável e pelas orientações de vida que foram muito além da Engenharia Elétrica.

Agradeço aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília que estiveram disponíveis para auxiliar-me frente aos mais diversos desafios encontrados.

Agradeço também aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia que, com muita presteza, continuaram ajudando-me sempre que necessário.

Agradeço às minhas avós Doralice (*in memoriam*) e Zulmira (*in memoriam*) e aos meus avôs Sebastião (*in memoriam*) e Licodino que há muitos anos trabalharam arduamente para que hoje eu pudesse completar essa caminhada.

Agradeço aos meus pais, Dóris e Raulê, que sempre acreditaram em mim, acalentando-me e dando-me a certeza de que com meus esforços este dia, enfim chegaria. E assim como meus pais, agradeço também aos meus irmãos, Camilo, Pedro Henrique e Ana Luiza pelo alegria, amor, carinho e apoio incondicional na minha busca pelo saber.

Agradeço ao Renzo pela presença constante, amando-me do "jeitim" dele, torcendo por mim e principalmente avivando a esperança de que tudo daria certo.

Agradeço aos meus familiares que sempre estiveram disponíveis para escutar-me, abraçar-me, dar forças e sorrir para mim.

Agradeço as minhas lindas amigas que, nesta caminhada, estiveram permanentemente ao meu lado lembrando-me como a vida é bela e vale a pena ser vivida.

Agradeço aos amigos do Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica pelas risadas e paciência, pelo companheirismo e esforços despendidos à minha pessoa.

Enfim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a conclusão desta dissertação.

Aqui, no entanto, nós não olhamos
para trás por muito tempo.
Nós continuamos seguindo em frente,
abrindo novas portas e fazendo coisas novas,
porque somos curiosos... E a curiosidade continua
nos conduzindo por novos caminhos.
Walt Disney

Dedico este trabalho
à minha mãezinha, Dóris,
e ao meu paizinho, Raulê.

Resumo

Avaliação da Temperatura do Motor de Indução Trifásico submetido a Desequilíbrios de Tensão

Autor(a): Maria Leonor Silva de Almeida

Supervisor: Anésio de Leles Ferreira Filho

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, fevereiro de 2013

A Qualidade da Energia Elétrica está associada ao grupo de fatores capazes de alterar, ou até mesmo comprometer as características das tensões de alimentação fornecidas aos consumidores. Desse conjunto de elementos, destaca-se o desequilíbrio de tensão, cuja presença causa sobreaquecimentos elevados e, conseqüentemente, possíveis reduções na vida útil dos equipamentos. Em decorrência da importância do tema, atualmente, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas destinadas à identificação dos efeitos do mencionado fenômeno sobre os dispositivos elétricos e à determinação de índices que expressem adequadamente os possíveis prejuízos causados por uma rede com qualidade comprometida. Dentre os dispositivos afetados por uma alimentação com tensões desequilibradas, tem-se o motor de indução trifásico. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma avaliação do comportamento da temperatura do motor de indução trifásico submetido ao desequilíbrio de tensão, frente ao emprego de diferentes parâmetros. Dessa forma, descrevem-se as vantagens e desvantagens associadas a utilização de cada um dos índices estudados. Fundamentado nos resultados identificados, verifica-se que a alternativa mais adequada para se quantificar a temperatura se dá baseada no emprego conjunto do *Voltage Unbalance Factor* e da Componente de Sequência Positiva. Ademais, nota-se que o estabelecimento de limites aceitáveis para esses dois parâmetros restringe os aquecimentos máximos nos enrolamentos e, portanto, viabiliza a preservação da vida útil do motor. Ressalta-se que as análises supramencionadas são realizadas por meio do desenvolvimento de ensaios práticos e simulações computacionais.

Abstract

Temperature's Evaluation of Three Phase Induction Motor Subjected to Voltage Unbalances

Author: Maria Leonor Silva de Almeida

Advisor: Anésio de Leles Ferreira Filho

Electric Engineering Graduate Program

Brasília, February 2013

The term Power Quality is associated with the group of factors that can change, or even compromise the characteristics of the supply voltages provided to consumers. From this set of elements, it is emphasized the voltage unbalance, which presence causes high overheating and, consequently, can lead loss of useful life. Due to the importance of this issue, currently, many research have been carried out intending to verify the effects of that phenomenon on electric devices and aiming to determine indexes that express adequately the possible damage caused by a supply with compromised quality. Among the equipment affected by an unbalanced supply voltages, there is the three phase induction motor. In this context, this work presents an evaluation of the temperature behavior of a three phase induction motor supplied with voltage unbalance, against the use of different parameters. Thus, it is described the advantages and disadvantages of using each of the indexes studied. Based on the identified results, it is shown that the most appropriate alternative to quantify the temperature is using Voltage Unbalance Factor and the Positive Sequence Component simultaneously. In addition, it is noted that the establishment of acceptable limits for these two parameters restricts the maximum heating of the windings and, thus, enables the preservation of the machine useful life. It is highlight that the analyzes described are performed through the development of experimental tests and computer simulations.

Sumário

Lista de Tabelas	xviii
Lista de Figuras	xx
Lista de Símbolos, Nomenclaturas e Abreviações	xxii
1 Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Justificativas e Objetivos da Dissertação	2
1.3 Contribuições da Dissertação	3
1.4 Organização da Dissertação	4
2 Fundamentação Teórica	5
2.1 Considerações Iniciais	5
2.2 Desequilíbrio de Tensão	5
2.2.1 Definição de Desequilíbrio de Tensão	5
2.2.2 Causas do Desequilíbrio de Tensão	6
2.2.3 Efeitos do Desequilíbrio de Tensão	7
2.2.4 Métodos para Cálculo do Desequilíbrio de Tensão	7
2.2.5 Normas para Desequilíbrio de Tensão	10
2.3 Elevação de Temperatura em MITs	12
2.3.1 Constituição física do MIT	12
2.3.2 Sistemas Isolantes	14
2.3.3 Estimativa da redução de vida útil de MITs em função de um aumento adicional de temperatura	15
2.3.4 Fontes de Aquecimento	16
2.3.4.1 Perdas <i>Joule</i> nos Condutores	16
2.3.4.2 Perdas no Núcleo Magnético	17
2.3.4.3 Perdas Suplementares – <i>Stray-Losses</i>	18
2.3.4.4 Perdas por Atrito e Ventilação	19

2.4	Considerações Finais	19
3	Métodos e Metodologias	21
3.1	Considerações Iniciais	21
3.2	Estado da Arte	21
3.3	Materiais e Métodos	28
3.3.1	Validação Experimental	29
3.3.2	Simulações Computacionais empregando RNAs	32
3.4	Considerações Finais	34
4	Apresentação e Análise dos Resultados	35
4.1	Considerações Iniciais	35
4.2	Condição Ideal de Suprimento	36
4.3	Análise do VUF	37
4.4	Análise de V_1	45
4.5	Análise do VUF utilizado em conjunto com V_1	51
4.6	Análise de θ_u	58
4.7	Análise do VUF utilizado em conjunto com θ_u	63
4.8	Análise de V_1 utilizado em conjunto com θ_u	68
4.9	Principais aspectos observados na avaliação do comportamento dos índices	72
4.10	Considerações Finais	76
5	Conclusões	77
	Referências Bibliográficas	85
A	Redes Neurais Artificiais	87
B	Dados Experimentais	91

Lista de Tabelas

2.1	Classes de Isolamento	14
2.2	Temperaturas admissíveis, em função da classe de isolamento	15
3.1	Número de ensaios para treinamento e validação das RNAs desenvolvidas	34
4.1	Condição Ideal de Suprimento	36
4.2	Discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de VUF	39
4.3	Condições de desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$	40
4.4	Resultados da aplicação de tensões desequilibradas sob a ótica de VUF	42
4.5	Casos para análise do aumento do desvio padrão em função de VUF	44
4.6	Discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de V_1	47
4.7	Condições de desequilíbrios que culminam em $V_1 = 220 V$	48
4.8	Resultados da aplicação de tensões desequilibradas sob a ótica de V_1	49
4.9	Discrepância entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de V_1 , quando VUF é igual a 2%	53
4.10	Desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$ e $V_1 = 220 V$	54
4.11	Desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$ e diferentes valores de V_1	55
4.12	Discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de θ_u	60
4.13	Condições de desequilíbrios que culminam em $\theta_u = 120^\circ$	61
4.14	Resultados da aplicação de tensões desequilibradas sob a ótica de θ_u	62
4.15	Discrepância entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de θ_u , quando $VUF = 2\%$	65
4.16	Desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$ e $\theta_u = 120^\circ$	66
4.17	Desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$ e diferentes valores de θ_u	67
4.18	Discrepância entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de θ_u , quando $V_1 = 220 V$	69

4.19	Desequilíbrios que culminam em $V_1 = 220 V$ e $\theta_u = 120^\circ$	70
4.20	Desequilíbrios que culminam em $V_1 = 220 V$ e diferentes valores de θ_u	71
4.21	Resultados dos ensaios práticos e das RNAs desenvolvidas	73
4.22	Reduções na vida útil no MIT para diferentes valores de VUF e V_1	75

Lista de Figuras

2.1	Estrutura do Motor de Indução em Gaiola	12
2.2	Estrutura do material magnético, mostrando os domínios	18
2.3	Ciclo de histerese típico.	18
3.1	Esquema de conexão para realização dos experimentos	29
3.2	Fonte de alimentação especial da <i>California Instruments</i>	31
3.3	Conjunto formado pelo MIT, GCC e sistema de aquisição de dados .	31
4.1	Curva de elevação da temperatura no enrolamento da fase A do es- tator para a condição nominal	36
4.2	Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $VUF = 2\%$	37
4.3	Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de VUF . . .	38
4.4	Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de VUF	43
4.5	Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $V_1 = 220 V$	45
4.6	Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de V_1	46
4.7	Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de V_1	50
4.8	Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $VUF =$ 2% e $V_1 = 220 V$	51
4.9	Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de V_1 , para desequilíbrios com $VUF = 2\%$	52
4.10	Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de V_1 para desequilíbrios com $VUF = 2\%$	56
4.11	Gráfico das elevações de temperatura nas três fases em função de θ_u para desequilíbrios com $VUF = 2\%$ e $V_1 = 220 V$	57
4.12	Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para diferentes valores de θ_u	59
4.13	Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de θ_u	59

4.14	Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de θ_u	63
4.15	Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $VUF = 2\%$ e $\theta_u = 120^\circ$	63
4.16	Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de θ_u , para desequilíbrios com $VUF = 2\%$	64
4.17	Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de θ_u para desequilíbrios com $VUF = 2\%$	67
4.18	Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $V_1 = 220\text{ V}$ e $\theta_u = 120^\circ$	68
4.19	Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de θ_u , para desequilíbrios com $V_1 = 220\text{ V}$	69
4.20	Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de θ_u para desequilíbrios com $V_1 = 220\text{ V}$	72
4.21	Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de V_1 , para desequilíbrios com $VUF = 1, 2$ e 3%	74
A.1	Modelo de um neurônio artificial	88
A.2	Funções de Ativação	88
A.3	Camadas de entrada, intermediária e de saída de uma rede neural	89

Lista de Símbolos, Nomenclaturas e Abreviações

\bar{V}_A	Fasor de tensão na fase A
\bar{V}_B	Fasor de tensão na fase B
\bar{V}_C	Fasor de tensão na fase C
V_A	Módulo da tensão na Fase A
V_B	Módulo da tensão na Fase B
V_C	Módulo da tensão na Fase C
VUF_1	<i>Voltage Unbalance Factor</i> definido pelo Método CIGRÉ
β	Operador matemático do Método CIGRÉ
VUF_2	<i>Voltage Unbalance Factor</i> definido pelo Método NEMA
V_{ab}	Módulo da tensão trifásica entre as Fases A e B
V_{bc}	Módulo da tensão trifásica entre as Fases B e C
V_{ca}	Módulo da tensão trifásica entre as Fases C e A
$V_{linha,medio}$	Média das tensões de linha
$\Delta V_{linha,max}$	Máxima diferença entre as tensões medidas e a tensão de linha média
a	Operador de <i>Fortescue</i>
\bar{V}_0	Fasor da tensão de sequência zero
\bar{V}_1	Fasor da tensão de sequência positiva
\bar{V}_2	Fasor da tensão de sequência negativa
V_2	Módulo da tensão de sequência negativa
V_1	Módulo da tensão de sequência positiva
V_m	Média das tensões
V_n	Tensão nominal

k_u	Módulo de CVUF
θ_u	Ângulo de CVUF
λ	Tempo de vida útil do motor para $\theta = \theta_{nom} + \Delta\theta$
λ_{nom}	Tempo de vida útil nominal do motor para $\theta = \theta_{nom}$, considerado neste trabalho igual a 20 anos
E	Constante da energia de ativação, cujo valor é igual a 1,1 eV
k	Constante de Boltzmann, cujo valor é igual a $0,8617 * 10^4$ eV
$\Delta\theta$	Acréscimo de temperatura em relação a θ_{nom} em °C
θ_{nom}	Temperatura nominal do motor em Kelvin. Neste trabalho igual a 80°C que equivale a 353,15K
ε	Desvio padrão entre as temperaturas das três fases
\bar{x}	Valor médio das elevações de temperatura nas três fases
x_i	Valor da temperatura na fase A, B ou C
n	Número total de amostras (sempre igual a 3)
α_{VUF}	Valor de VUF em regressões lineares
α_{V_1}	Valor de V_1 em regressões lineares
Δ_{temp}	Elevação de temperatura máxima em regressões lineares
Δ_{desvio}	Valor do desvio padrão em regressões lineares
Δ	Diferença entre a maior e a menor elevação de temperatura obtidas nas fases

Siglas

QEE	Qualidade da Energia Elétrica
VUF	<i>Voltage Unbalance Factor</i> definido pelo Método das Componentes Simétricas
CVUF	<i>Complex Voltage Unbalance Factor</i>
LVUR	<i>Line Voltage unbalanced in Percent</i>
PVUR	<i>Phase Voltage Unbalance in Percent</i>
CIGRÉ	<i>Council on Large Electric Systems</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
RMS	<i>Rout Mean Square</i>
GCC	Gerador de Corrente Contínua
RNA	Rede Neural Artificial

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

O termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE) vincula-se a um conjunto de fatores capazes de afetar e (ou) comprometer o suprimento elétrico oferecido aos consumidores. A ocorrência dessas anomalias pode ser de natureza local – quando a perturbação ocorre dentro da instalação do consumidor – ou de natureza externa ou remota. Atualmente, várias pesquisas vêm sendo conduzidas com o intuito de conhecer, assegurar ou mesmo melhorar os padrões de qualidade requeridos ao bom funcionamento dos sistemas elétricos. Esses fatos contribuem para a destacada importância com a qual o assunto em questão tem sido discutido, não apenas pelas instituições de pesquisa e concessionárias de energia, mas também pelos consumidores finais (industriais, comerciais e residenciais) (SOUTO, 2001).

Dos problemas associados a uma rede cuja alimentação possui qualidade comprometida, pode-se citar o desequilíbrio de tensão. Este fenômeno ocorre quando as tensões de alimentação possuem características que diferem daquelas empregadas no suprimento ideal, constituído de tensões senoidais, perfeitamente balanceadas (defasagem angular de 120° entre si), e com módulos iguais nas três fases.

Hoje, sabe-se que a presença de altos níveis de desequilíbrio provoca, dentre outros problemas, perdas excessivas, sobreaquecimento, solicitação do isolamento e redução da vida útil de motores e transformadores. Indubitavelmente, dos efeitos do desequilíbrio sobre as cargas, a temperatura se destaca e deve ser, portanto, constantemente monitorada a fim de garantir o correto funcionamento dos equipamentos sem que haja a redução da sua vida útil.

Diante da relevância do tema desequilíbrio de tensão, atualmente diversos especialistas vêm desenvolvendo estudos vinculados a esse assunto. Dessas investigações, é possível observar que muitas delas são destinadas à determinação de índices de quan-

tificação do desequilíbrio, que expressem adequadamente os possíveis efeitos causados por uma rede com tensões desequilibradas. Em outra frente de pesquisa, pode-se afirmar que inúmeros trabalhos investigam as alterações causadas no comportamento de equipamentos submetidos a uma alimentação não ideal. Essas análises são importantes, pois os efeitos possíveis dependem fortemente das condições do mencionado distúrbio e das características intrínsecas de cada um dos dispositivos elétricos (DUGAN *et al.*, 1996).

Dos equipamentos presentes nos sistemas elétricos que são afetados por desequilíbrios de tensão, vale citar os motores de indução trifásicos que possuem seu comportamento alterado pelos efeitos do referido fenômeno. Visto que o motor elétrico é responsável por 25% do consumo total da energia elétrica no Brasil, nota-se a necessidade de estudos vinculados ao entendimento do comportamento deste equipamento quando alimentado com tensões desequilibradas (KAWAPHARA *et al.*, 2008).

Nesse contexto, propõe-se no presente trabalho uma avaliação do comportamento da temperatura do motor de indução trifásico submetido ao desequilíbrio de tensão, que será realizada por meio do desenvolvimento de ensaios práticos e simulações computacionais.

1.2 Justificativas e Objetivos da Dissertação

Segundo Lee *et al.* (1997), Siddique *et al.* (2004), Faiz *et al.* (2004), Kini *et al.* (2007) e Filho (2008), a quantificação do desequilíbrio de tensão baseada apenas no índice *Voltage Unbalance Factor* – VUF – é inadequada, pois um mesmo valor do referido parâmetro representa diferentes condições de desequilíbrios. Conseqüentemente, um único valor de VUF produz nos equipamentos diferentes comportamentos, cujas características diferem significativamente entre si. Essa constatação, a cerca do emprego de VUF, tem produzido um aumento no número de publicações que visam identificar a situação exata do funcionamento do sistema com relação aos desequilíbrios.

A fim de solucionar as falhas atreladas ao emprego de VUF, alguns autores como Anwari & Hiendro (2010), Mendes *et al.* (2010), Faiz & Ebrahimpour (2005) propõem a utilização do referido índice juntamente com a componente de sequência positiva (V_1). A utilização conjunta desses dois parâmetros se justifica, pois a definição de VUF traduz o nível de desequilíbrio de tensão e o conhecimento de V_1 torna possível contemplar as características dos três fasores de tensões aplicadas.

Conforme exposto por Wang (2001), Gnacinski (2008a), Gnacinski (2008b) e

Anwari & Hiendro (2010), além de VUF e de V_1 , deve-se utilizar o ângulo do índice *Complex Voltage Unbalance Factor* (CVUF) nas análises de MITs alimentados com tensões desequilibradas. Essa proposta se baseia no comportamento senoidal que as correntes desequilibradas apresentam em função do ângulo de CVUF (θ_u). Como consequência, as perdas e as elevações de temperatura, em cada uma das fases, igualmente apresentam comportamento senoidal. Assim, o conhecimento de θ_u permite a identificação exata das elevações de temperatura em cada uma das três fases, fazendo com que a utilização conjunta desses três parâmetros torne a análise do desequilíbrio de tensão a mais precisa possível.

Baseado nos aspectos mencionados e devido à atualidade do assunto, surgiu a ideia de desenvolvimento dessa dissertação que estabelece como principal objetivo, a avaliação dos índices – VUF, V_1 e θ_u – empregados na quantificação da temperatura de motores de indução trifásicos submetidos a desequilíbrios de tensão. Dessa forma, as metas do presente trabalho são descritas a seguir:

- Avaliar experimentalmente, de acordo com o emprego isolado ou em conjunto de VUF, V_1 e θ_u , o comportamento das elevações de temperatura nas fases de um MIT submetido a diferentes condições de desequilíbrio de tensão.
- Executar uma reflexão crítica sobre o emprego isolado ou em conjunto dos índices VUF, V_1 e θ_u , verificando quais são as vantagens e desvantagens da aplicação de cada um deles.

1.3 Contribuições da Dissertação

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

1. Determinação do índice que melhor quantifica a temperatura de MITs submetidos a desequilíbrio de tensão.
2. Avaliação do comportamento das elevações de temperatura nas fases de um MIT submetido a desequilíbrios de tensão, frente ao emprego isolado ou em conjunto dos índices VUF, V_1 e θ_u empregados para a quantificação do desequilíbrio de tensão.
3. Provimento de material didático com ampla e atual bibliografia a respeito dos assuntos pesquisados.

4. Desenvolvimento de um roteiro para execução de testes que possibilita, de forma adequada, a aquisição das temperaturas internas de um MIT submetido a desequilíbrios de tensão.

1.4 Organização da Dissertação

Tendo em mente os objetivos e as contribuições desta pesquisa, e mencionado o corrente capítulo, esta dissertação será estruturada conforme descrito a seguir.

O capítulo 2 é destinado a apresentação de um resumo dos principais fundamentos associados ao desequilíbrio de tensão, evidenciando com maior propriedade sua conceituação, suas causas e seus efeitos no comportamento de diferentes equipamentos que compõem o sistema elétrico. Exibem-se também os cálculos envolvidos na quantificação desse fenômeno e algumas normas regulamentadoras sobre o desequilíbrio de tensão. Ao final desse capítulo, descrevem-se, de forma sucinta, os aspectos construtivos dos MITs, informações relacionadas à vida útil e a respectiva correlação com as temperaturas de operação do motor.

No capítulo 3, expõe-se o estado da arte, onde são apresentados os estudos relevantes em relação ao tema em questão. Neste mesmo capítulo, são ainda descritos os materiais e métodos adotados para se concretizar os objetivos desta dissertação.

No capítulo 4, a fim de realizar uma avaliação comparativa entre diferentes índices empregados na quantificação do desequilíbrio de tensão, são exibidos os resultados experimentais decorrentes da alimentação do MIT com diversas combinações de tensões desequilibradas. Neste capítulo, apresentam-se ainda resultados de simulações computacionais com vistas a reprodução dos ensaios práticos, considerando uma quantidade significativamente maior de tensões desequilibradas.

Finalmente, o capítulo 5, destina-se a apresentar as principais discussões e conclusões finais desta dissertação. Além disso, serão ressaltadas questões associadas às contribuições efetivas deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos que proverão continuidade a esta pesquisa.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os principais tópicos relacionados ao termo de desequilíbrio de tensão, quais sejam: sua conceituação, suas causas, seus efeitos nos equipamentos da rede elétrica, os métodos de cálculo para sua quantificação, e as normas regulamentadoras que versam sobre seus limites.

Também são descritos, de forma geral, os aspectos construtivos dos motores de indução com rotor em gaiola. Tendo em vista a importância da temperatura para o presente trabalho, também são expostas as fontes de aquecimento e informações relacionadas à vida útil do MIT.

2.2 Desequilíbrio de Tensão

Neste item, apresentam-se os conceitos, as causas, os efeitos, os métodos de cálculo e as normas voltadas para o desequilíbrio de tensão, além de outras discussões a cerca desse tema.

2.2.1 Definição de Desequilíbrio de Tensão

Em um sistema trifásico ideal, as tensões nas três fases possuem a mesma amplitude e estão defasadas entre si de 120 graus. Dessa forma, um sistema equilibrado, com sequência de ABC, é representado conforme as equações 2.1, 2.2 e 2.3.

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

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

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

Onde:

\bar{V}_A , \bar{V}_B e \bar{V}_C são os fasores de tensão das fases A, B e C, respectivamente; e V_A , V_B e V_C são os valores eficazes das tensões das fases A, B e C, respectivamente.

Assim, o desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico ocorre quando as fases apresentam tensões com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120 graus ou, ainda, as duas condições simultaneamente, conforme ANEEL (2011).

2.2.2 Causas do Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão possui basicamente dois tipos de origem: uma relacionado à estrutura da rede elétrica, e outra relacionado à carga (MATOS, 2012).

O primeiro tipo de desequilíbrio origina-se pela assimetria da rede elétrica no nível de transmissão e de distribuição. Em decorrência da pequena variação dos parâmetros da rede elétrica, esse tipo de causa é praticamente constante. Pode-se listar as seguintes causas desse tipo:

- Distribuição irregular de cargas monofásicas entre as fases. Ademais, deve-se considerar a dinâmica no processo de conexão e o desligamento de elementos na rede;
- Linhas de distribuição extensas, essencialmente na distribuição rural;
- 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) fusíveis de proteção rompidos;
- Presença de interrupções, afundamentos, subtensões, sobretensões, transitórios, etc..

O outro tipo de desequilíbrio relaciona-se a natureza da carga, e, portanto, depende das características operacionais do próprio consumidor. Esse tipo de causa corresponde aos maiores responsáveis pelo comprometimento da rede elétrica em função do desequilíbrio de tensão. Pode-se listar as seguintes causas desse tipo:

- Motores elétricos com impedâncias desequilibradas;
- Emprego de controladores de velocidade da carga;
- Níveis divergentes de distorção harmônica nas fases do sistema elétrico;
- Variação nos ciclos de demanda de cada fase, etc..

2.2.3 Efeitos do Desequilíbrio de Tensão

A presença de tensões desequilibradas nas redes elétricas é um dos mais habituais itens de comprometimento do suprimento elétrico. Seus efeitos nos diversos equipamentos elétricos são considerados nocivos, uma vez que, um pequeno desequilíbrio nas tensões de alimentação resulta num elevado nível de desequilíbrio nas correntes absorvidas e, conseqüentemente, ocasiona o sobreaquecimento (FILHO, 2008).

Os efeitos mais frequentemente observados em equipamentos do sistema elétrico submetido a desequilíbrio de tensão são:

- Surgimento de correntes de sequência negativa, as quais são as principais causadores de conjugados amortecedores e sobreaquecimento adicional nas máquinas rotativas em corrente alternada síncronas e assíncronas;
- Sobreaquecimento nos condutores acarretando uma maior solicitação do isolante. Isso implica na diminuição da vida útil e no aumento das perdas;
- Mau funcionamento, sobreaquecimentos e falhas dos dispositivos de proteção com redução da vida útil;
- Manifestação de harmônicas não características devido a disparos desiguais nas válvulas retificadoras controladoras de equipamentos e cargas; e
- Desbalanço das correntes absorvidas pelos motores de indução e cabos isolados ocasionando sobreaquecimento e diminuição da vida útil.

2.2.4 Métodos para Cálculo do Desequilíbrio de Tensão

Na literatura atinente, existem diversas metodologias para a obtenção do fator de desequilíbrio de tensão. Os índices definidos por essas metodologias objetivam traduzir o desequilíbrio de tensão ao qual a rede elétrica é submetida, de forma a permitir a análise do fenômeno. Alguns desses métodos envolvem os módulos e os ângulos das tensões para a determinação do índice. Todavia, em virtude de alguns instrumentos de medição não disponibilizarem os ângulos das tensões, também existem métodos que consideram apenas os módulos das tensões em seus cálculos.

Descrevem-se a seguir as etapas para determinação dos índices de desequilíbrios de cada um dos principais métodos utilizados atualmente.

Método CIGRÉ

O método CIGRÉ, proposto pelo *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* (CIGRÉ), é empregado nos casos em que os aparelhos de medição realizam leituras apenas dos módulos das tensões (tensão eficaz). O índice desse método é intitulado *Voltage Unbalance Factor* (VUF_1) e é definido conforme as equações 2.4 e 2.5 (ANEEL, 2000).

$$VUF_1 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100\% \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (2.5)$$

Onde:

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são os módulos das tensões trifásicas.

Como o método CIGRÉ considera apenas os módulos das tensões medidas, o resultado obtido é um valor escalar. Ressalta-se que as equações 2.4 e 2.5 são válidas apenas para tensões de linha e se a componente de sequência zero do sistema for nula (IEEE, 2009). Ressalta-se que o método CIGRÉ é considerado equivalente ao método das componentes simétricas, pois ambos retornam o mesmo valor de VUF.

Métodos NEMA e ANSI

Segundo *American National Standards Institute* (ANSI) e *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), VUF_2 (ou também chamado de *Line Voltage unbalanced in Percent – LVUR*) é definido conforme a equação 2.6 (OLIVEIRA, 2012).

$$VUF_2 = \frac{\Delta V_{linha,max}}{V_{linha,medio}} * 100\% \quad (2.6)$$

Onde:

$\Delta V_{linha,max}$ é a máxima diferença entre as tensões medidas e $V_{linha,medio}$; e $V_{linha,medio}$ é a média das tensões de linha.

Ressalta-se que nesse método aplicam-se apenas as tensões de linha. Segundo (IEEE, 2009), os resultados dessa definição se aproximam daqueles fornecidos pelo

método das componentes simétricas se este utilizar tensões de linha, se o conteúdo harmônico do sinal for baixo e a componente de sequência zero for pequena.

De acordo com Pillay *et al.* (2002), essa definição assume que a tensão média é sempre igual à tensão nominal.

Método IEEE

Nos últimos anos, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) tem publicado diferentes trabalhos e normas sobre o desequilíbrio de tensão. Como consequência, o método de cálculo considerado por essa instituição sofreu modificações nesse período. Atualmente, O IEEE recomenda o método das componentes simétricas para o cálculo do VUF, sugerindo como alternativa o método CIGRÉ (IEEE, 2009).

Método das Componentes Simétricas

O método das Componentes Simétricas baseia-se na decomposição do sistema trifásico desequilibrado em três sistemas simétricos e equilibrados, sendo eles:

- Um sistema de fasores na mesma sequência de fases do sistema desequilibrado original, denominado sistema de sequência positiva (ou sistema de sequência direta);
- Um sistema de fasores na sequência de fases inversa ao sistema de fases do sistema desequilibrado original, denominado sistema de sequência negativa (ou sistema de sequência inversa); e
- Um sistema de fasores paralelos, denominado sistema de sequência zero.

Analiticamente, define-se as componentes simétricas por meio da Matriz de *Fortescue*, apresentada na equação 2.7.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Onde:

a é o operador rotacional, cujo módulo é 1 e o ângulo 120° ;

\bar{V}_0 é o fasor da tensão de sequência zero;

\bar{V}_1 é o fasor da tensão de sequência positiva; e

\bar{V}_2 é o fasor da tensão de sequência negativa.

Esse método pode ser aplicado tanto para tensões de linha quanto para tensões de fase, e seu índice é definido pela razão entre os módulos das tensões de sequência negativa e positiva, conforme as equações 2.8, 2.9 e 2.10, respectivamente.

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} * 100\% \quad (2.8)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{3} (\bar{V}_A + a^2\bar{V}_B + a\bar{V}_C) \quad (2.9)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{1}{3} (\bar{V}_A + a\bar{V}_B + a^2\bar{V}_C) \quad (2.10)$$

Onde:

V_2 é o módulo da tensão de sequência negativa; e

V_1 é o módulo da tensão de sequência positiva.

Segundo a ANEEL (2000), dos métodos de quantificação, o índice VUF é o que melhor representa o grau de desequilíbrio em virtude da abordagem simultânea das amplitudes e dos ângulos das tensões. Destaca-se que a razão entre os fasores de componente negativa e positiva resulta em um índice complexo (*Complex Voltage Unbalance Factor* – CVUF), descrito conforme 2.11.

$$CVUF = \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} * 100\% = k_u \angle \theta_u \quad (2.11)$$

Onde:

k_u é o parâmetro que descreve o módulo de CVUF; e

θ_u é o parâmetro que descreve o ângulo de CVUF.

O ângulo desse fator complexo, embora não seja citado nas normas e recomendações que versam sobre o desequilíbrio, tem sido objeto de algumas investigações para avaliação da sua aplicabilidade nas metodologias de quantificação do referido fenômeno (ALMEIDA; FREITAS, 1995). Ressalta-se que o índice CVUF pode ser empregado para tensões de linha e de fase. Entretanto, para tensões de fase, o índice é adiantado em 60° com relação ao fasor de CVUF de linha.

2.2.5 Normas para Desequilíbrio de Tensão

Neste item, são descritas as principais normas nacionais e internacionais que discorrem sobre a quantificação do desequilíbrio de tensão.

PRODIST

O Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL, 2010), elaborado pela ANEEL, define o fator de desequilíbrio conforme o método das componentes simétricas ou o método CIGRÉ. Segundo esse documento, para eliminar os possíveis efeitos das componentes de sequência zero, é necessário realizar medições considerando as tensões de linha. Ademais, essa norma estabelece que o valor de VUF nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 2 %.

Procedimentos de Rede

Os Procedimentos de Rede (ONS, 2011), elaborado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), estabelece o cálculo de VUF por meio do método das componentes simétricas. De acordo com esse documento, o limite global nos barramentos da rede básica e nos transformadores de fronteira é de 2 %, enquanto o limite individual nos pontos de conexão à rede básica ou aos barramentos dos transformadores de fronteira é de 1,5 %.

IEEE 1159-2009

Segundo a norma IEEE (2009), o fator de desequilíbrio deve ser calculado baseado no método das componentes simétricas ou no método CIGRÉ. O limite aceito para o índice de desequilíbrio é de 2 %, sendo desejável um valor menor que 1 %.

IEC 61000-4-30 e IEC 1000-2-2

A *International Electrotechnical Commission* (IEC) é uma instituição de renome na preparação e publicação de normas internacionais para as tecnologias elétricas e eletrônicas. Baseado na norma IEC (2008), deve-se priorizar o emprego dos métodos de cálculo das componentes simétricas ou do método CIGRÉ. Recomenda-se que em sistemas de baixa tensão o VUF não ultrapasse o limite de 2 % (IEC, 1990). Em alguns casos, valores elevados podem ocorrer durante períodos limitados, por exemplo, durante um curto-circuito.

ANSI

Segundo a norma ANSI (1995), recomenda-se que os sistemas elétricos sejam projetados e operados de modo a limitar o máximo desequilíbrio de tensão em 3 %, sob condições a vazio.

2.3 Elevação de Temperatura em MITs

O correto funcionamento dos equipamentos elétricos depende de diversas particularidades, dentre elas, cita-se a temperatura, que se destaca pois está diretamente relacionada a preservação da vida útil dos aparelhos.

Para a compreensão do comportamento da temperatura em motores de indução trifásicos com rotor em gaiola, descrevem-se nesta seção as características construtivas do MIT, os tipos de sistemas isolantes, as fontes de aquecimento interna desses motores, e os aspectos relacionados a redução de vida útil. Ressalta-se que essas propriedades do MIT serão, majoritariamente, expostas conforme Souto (2001).

2.3.1 Constituição física do MIT

A extrema simplicidade e a robustez da construção em gaiola de esquilo representam vantagens notáveis para esse tipo de motor de indução e, de longe, fazem dele o tipo de motor mais comumente usado, indo desde motores fracionários até os de grande porte (FITZGERALD *et al.*, 2006). Uma decorrência direta de sua robustez é alta confiabilidade em sua operação. No entanto, para que o MIT opere adequadamente, devem-se respeitar alguns cuidados referentes a sua instalação na rede elétrica.

Basicamente, a estrutura uma máquina de indução divide-se em duas partes: um elemento estacionário, chamado de estator e um corpo girante, chamado de rotor. A figura 2.1 ilustra os principais elementos constituintes de um motor elétrico trifásico com rotor em gaiola.

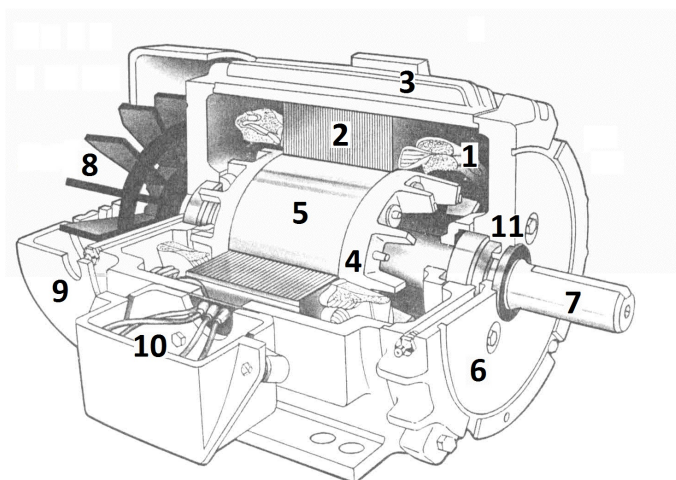


Figura 2.1: Estrutura do Motor de Indução em Gaiola

As partes constituintes do MIT são indicadas de acordo com a numeração adotada na Figura 2.1. As partes apontadas pelos números 1, 2 e 3 constituem o

estator. Já o rotor é formado pelas partes mostradas pelos números 4 e 5. Outras partes do MIT são designadas pelos números de 6 a 11. A seguir, descrevem-se as características das principais partes constituintes.

1. Enrolamento do estator: é composto por três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico a ser conectado à rede de alimentação. As bobinas são, geralmente, compostas por fios de cobre ou alumínio de seção circular e isolados com camadas de esmalte;
2. Núcleo magnético do estator: o núcleo do estator é, usualmente, constituído por um pacote de chapas de aço silício, isoladas por camadas de verniz. Com o objetivo de redução das perdas magnéticas, as chapas são tratadas termicamente e apresentam espessura reduzida;
3. Carcaça do estator: é a estrutura suporte do equipamento, apresentando construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado. Possui aletas em sua superfície externa, cujo objetivo é proporcionar uma maior área para a troca de calor entre o motor e o meio ambiente;
4. Enrolamento do rotor: no tipo em gaiola, o enrolamento é composto de barras de cobre inseridas nas ranhuras e curto-circuitadas nas duas extremidades;
5. Núcleo Magnético do rotor: possui as mesmas características do núcleo do estator;
6. Tampas laterais;
7. Eixo;
8. Proteção do ventilador;
9. Terminais; e
10. Rolamentos.

Observa-se que a máquina de indução apresenta em sua constituição vários elementos sujeitos a desgastes e deterioração. Geralmente as falhas nos MITs são: elétricas (ruptura do isolamento), mecânicas (deflexão das barras do rotor, desgastes do rolamento, etc) e estruturais (danos à carcaça, quebra na montagem, etc).

As falhas elétricas e mecânicas, salvo algumas exceções, estão associadas à sobrelevação da temperatura interna do motor. Esse aquecimento anormal causa deterioração no isolamento do enrolamento do estator, torção das barras do rotor e problemas do sistema de lubrificação dos rolamentos.

Ressalta-se que a isolação dos condutores do enrolamento do estator constitui o elemento mais sensível às variações de temperatura, sendo, portanto, um fator limitante na operação da máquina. Assim, o conhecimento das características do sistema isolante do MIT é essencial para que a máquina opere sempre respeitando os limites impostos pela isolação.

2.3.2 Sistemas Isolantes

Os sistemas isolantes são formados pelos materiais empregados na isolação dos condutores que formam os enrolamentos dos motores. Nesta seção, apresentam-se as características dos isolantes mais frequentemente usados nas máquinas elétricas.

Classificam-se os materiais isolantes de maneira que cada grupo possui um limite máximo de temperatura admissível. Este limite garante a integridade do sistema isolante, e conseqüentemente assegura suas características físicas, químicas e elétricas. A tabela 2.1, obtida de Alger (1951), apresenta a classificação dos isolantes de acordo com o tipo de material.

Tabela 2.1: Classes de Isolamento

Classe de Isolamento	Tipo de Isolante
Y*	Materiais fibrosos à base de celulose ou seda, não imersos em líquidos isolante
A*	Materiais fibrosos à base de celulose ou seda impregnados com líquidos isolantes
E*	Fibras orgânicas sintéticas e outros
B	Materiais à base de poliéster e poli-imídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com estes
F	Materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro aglutinado com materiais sintéticos, usualmente silicones, poliésteres ou epóxi
H	Materiais à base de mica, arbesto ou fibra de vidro aglutinada tipicamente com silicones de alta estabilidade térmica
C	Mica, vidro, cerâmica e quartzo sem aglutinante

* Estes tipos de materiais não são de uso corrente

Sabe-se que a isolação apresenta longa durabilidade quando a temperatura de operação é mantida abaixo daquela prejudicial ao isolante. Esse limite admissível depende da classe de isolamento, e refere-se ao ponto mais quente da isolação. As temperaturas envolvidas para a determinação do ponto mais quente nos enrolamentos do estator são apresentadas na Tabela 2.2.

Destaca-se que a temperatura máxima é associada a todo o enrolamento, sendo considerada a temperatura média do mesmo. Assim, se houver um ponto fraco

Tabela 2.2: Temperaturas admissíveis, em função da classe de isolamento

Classe de Isolamento	A	E	B	F	H
Elevação de temperatura média admissível, calculada pelo método da resistência [°C]	60	75	80	100	125
Diferença de temperatura entre o ponto mais quente e a temperatura média [°C]	5	5	10	15	15
Temperatura ambiente [°C]	40	40	40	40	40
Temperatura admissível do ponto mais quente [°C]	105	120	130	155	180

no interior da bobina, o enrolamento fica danificado, ou ainda, com o decorrer do tempo, ou devido a um distúrbio qualquer, o isolante pode ficar enfraquecido.

Diante do exposto, nota-se a importância de respeitar os limites das temperaturas máximas para cada tipo de isolante. Esses valores máximos também dependem da temperatura ambiente e da elevação de temperatura característica de cada classe de isolamento. Quanto à temperatura ambiente, quando não se têm maiores informações do local de instalação dos motores, assume-se que ela é igual a 40°C.

No tocante a confiabilidade da isolação, ela depende de fatores internos e externos que atuam sobre seu dielétrico. Os fatores externos que influenciam a isolação são: tipo de instalação, temperatura ambiente, umidade, solicitação mecânica, atmosfera agressiva, dentre outros. Estes fatores são variáveis para cada instalação e dificilmente se consegue quantificar a influência de cada um, visto que todos podem afetar simultaneamente o sistema de isolamento durante a vida útil do mesmo.

Quanto aos fatores internos, suas causas são de origem elétrica (diferença de potencial) ou térmica (elevação da temperatura). Nesses casos, um aumento da temperatura acima do admissível pela isolação, pode ocasionar mudanças estruturais no material isolante – fissuras, amolecimento, carbonização e outras modificações – que resultam na perda de certas propriedades, dentre elas seu poder de isolação.

2.3.3 Estimativa da redução de vida útil de MITs em função de um aumento adicional de temperatura

Para a avaliação da perda de vida útil, é necessário conhecer as elevações das temperaturas em áreas estratégicas localizadas no interior dos MITs. A região mais sensível a ser investigada consiste na isolação do enrolamento do estator, uma vez que esta sofre de forma direta os efeitos advindos de uma elevação de temperatura.

Neste trabalho, considera-se que o MIT operando com carregamento nominal e com tensões de alimentação puramente senoidais, equilibradas e simétricas possui a

vida útil da isolação nominal igual a 20 anos. Para essas condições, a temperatura nominal de operação é igual a 80°C (353,15K), que está em concordância com a classe de isolamento da máquina, qual seja classe F. Assim, qualquer situação operativa que não aquelas descritas, podem ocasionar redução da vida útil da máquina.

A durabilidade de um sistema isolante depende basicamente da temperatura e do tempo ao qual o MIT esta exposto àquela determinada condição de operação. A redução no tempo de vida útil da isolação, quando a temperatura sofre um aumento de $\Delta\theta$, é calculado conforme a equação 2.12.

$$\lambda = \lambda_{nom} e^{-\left(\frac{E}{k}\right)\left(\frac{\Delta\theta}{\theta_{nom}(\theta_{nom}+\Delta\theta)}\right)} \quad (2.12)$$

Onde:

λ é o tempo de vida útil do motor para $\theta = \theta_{nom} + \Delta\theta$;

λ_{nom} é o tempo de vida útil nominal do motor para $\theta = \theta_{nom}$;

E é a constante da energia de ativação, cujo valor é igual a 1,1 eV;

k é a constante de Boltzmann, cujo valor é igual a $0,8617 * 10^4$ eV;

$\Delta\theta$ é o acréscimo de temperatura em relação a θ_{nom} em °C; e

θ_{nom} é a temperatura nominal do motor em Kelvin.

Segundo (FUCHS *et al.*, 1986), um aumento de aproximadamente 7 a 10°C acima da temperatura nominal da isolação, reduz a vida útil do motor pela metade.

2.3.4 Fontes de Aquecimento

Sendo o foco central deste trabalho a temperatura dos motores de indução trifásicos, é imperativo o entendimento da origem das fontes de aquecimento internas do MIT. Diante dessas considerações, descrevem-se a seguir as fontes de calor intrínsecas desses motores.

2.3.4.1 Perdas *Joule* nos Condutores

As perdas *Joule* correspondem a maior fonte de calor da máquina e são geradas pela circulação de corrente nos elementos resistivos do motor, principalmente, nos condutores pertencentes ao enrolamento do estator e nas barras do rotor. Essas perdas sofrem grande influência do efeito Pelicular (ou *Skin Effect*) e do efeito proximidade.

O fenômeno chamado de Efeito Pelicular tem origem na variação da relutância do circuito magnético, principalmente nas proximidades do entreferro, causando um enlace maior de linhas de fluxo no centro do condutor do que em sua superfície.

Com isto, a indutância do centro é maior que a da superfície, o que reduz a corrente na parte central do condutor. Esta distribuição não uniforme de corrente faz com que a resistência em corrente alternada se torne maior.

O Efeito Proximidade é causado pela interação dos campos magnéticos dos condutores mais próximos que gera uma distorção na distribuição das densidades de correntes nos próprios condutores e altera o valor da resistência elétrica. Embora este efeito esteja intimamente associado à circulação de correntes alternadas em condutores, ele não é tão significativo quanto o efeito pelicular, principalmente, com relação ao circuito do rotor, por se tratar de barras, ou seja, seção transversal significativa.

2.3.4.2 Perdas no Núcleo Magnético

Sabe-se que qualquer material ferromagnético sujeito a densidades de fluxo variáveis no tempo apresenta um consumo de energia na forma de perdas magnéticas no ferro. Essas perdas no núcleo exercem influência significativa no aquecimento global do motor, e podem ser definidas como a soma das perdas pelas correntes parasitas e pelas perdas por Histerese.

As Perdas por *Foucault* ocorrem devido a variação do fluxo magnético que induz tensões no próprio núcleo. Essas tensões geram a circulação de correntes no ferro, e devido à resistência própria do material magnético, há uma geração de calor provocada por um efeito semelhante ao *Joule*. Para diminuir o efeito dessas correntes, os núcleos magnéticos de transformadores e das máquinas elétricas são construídos com laminações dispostas normalmente à direção das correntes induzidas, e isoladas entre si, de modo a não permitir a passagem da corrente de uma lâmina para a outra.

As Perdas por Histerese estão associadas ao comportamento não linear do material constituinte do núcleo magnético. Quando um campo magnético alternado é aplicado, uma parcela do calor é gerada internamente como consequência de um fenômeno semelhante a um "atrito" entre os dipolos magnéticos que se movimentam no sentido de acompanhar as variações do campo alternado.

A Figura 2.2 ilustra os dipolos magnéticos dispostos aleatoriamente. Quando o material é submetido a um campo magnético, os dipolos se alinharão na mesma direção do campo, caracterizando o que se denomina por magnetização do material. Quanto mais intenso o campo aplicado, maior será o número de dipolos que estarão na mesma direção.

Devido as variações do campo magnético, quando ele muda a direção, os dipolos magnéticos irão seguir essa nova orientação. No entanto, uma parcela dos dipolos

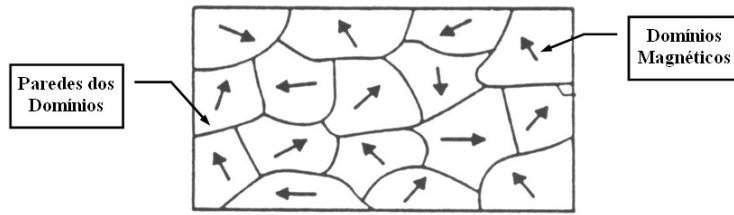


Figura 2.2: Estrutura do material magnético, mostrando os domínios

não segue essa direção e não retorna à situação inicial. Esse atraso na desmagnetização origina o conhecido laço de histerese. A Figura 2.3 mostra a curva de magnetização resultante da ação do campo magnético alternado em um núcleo.

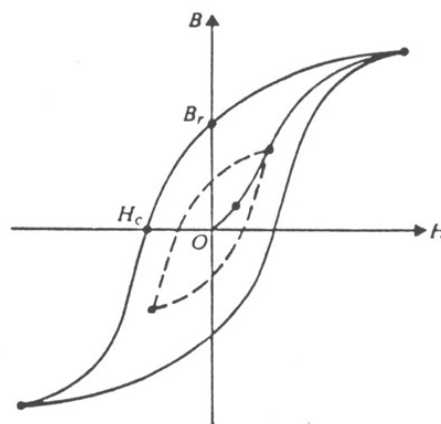


Figura 2.3: Ciclo de histerese típico.

A área interna ao laço de histerese significa as perdas inerentes ao processo, as quais são proporcionais a frequência do campo aplicado e a densidade de fluxo magnético (KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1974) (TORO, 1994).

2.3.4.3 Perdas Suplementares – *Stray-Losses*

As perdas adicionais na máquina de indução são compostas, basicamente, pelas seguintes componentes: perdas adicionais no núcleo magnético; perdas por correntes parasitas nos condutores do enrolamento do estator e nas barras do rotor e perdas ocasionadas nas demais estruturas metálicas do motor.

As causas desses efeitos são, essencialmente, a distribuição não uniforme de corrente nos condutores e as distorções presentes no fluxo magnético principal. Esses fatos geram perdas apreciáveis no núcleo magnético próximo à superfície do entreferro. Adicionalmente, com o carregamento do motor, o fluxo de dispersão aumenta significativamente, agravando os problemas acima citados, contribuindo para o surgimento de perdas complementares nas demais estruturas metálicas do motor.

O cálculo preciso desses efeitos é extremamente difícil em vista de suas naturezas,

e as formulações analíticas propostas exigem o conhecimento de detalhes inerentes à construção dos motores de indução. Diante disso, várias normas e recomendações nacionais e internacionais consideram as perdas suplementares como sendo iguais a 0,5 % da potência nominal da máquina (ABNT, 1982).

2.3.4.4 Perdas por Atrito e Ventilação

Por não estarem relacionadas com grandezas elétricas do motor, as perdas por atrito e ventilação são usualmente referenciadas como perdas mecânicas.

As perdas por atrito dependem da pressão dos rolamentos, da velocidade periférica do eixo e do coeficiente de atrito dos rolamentos. Via de regra, as mesmas não sofrem influência das condições operacionais do motor.

Assim como as perdas por atrito, as perdas por ventilação não dependem diretamente da qualidade do suprimento elétrico do motor. Essas perdas relacionam-se com a velocidade periférica do rotor, o diâmetro e o comprimento do núcleo. No entanto, deve-se ressaltar que a operação da máquina em velocidades abaixo da nominal resulta na redução da capacidade do ventilador em retirar calor da máquina, levando a mesma a um sobreaquecimento. Assim, na avaliação térmica de MITs, essa variável deve ser considerada nos cálculos de temperatura e de vida útil.

Para expressar essas perdas, pode-se empregar resultados experimentais – os quais permitem a separação das perdas por atrito e ventilação – ou, alternativamente, considerar essas perdas iguais a um determinado percentual da potência nominal do motor.

2.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os principais tópicos relacionados ao termo desequilíbrio de tensão, como sua conceituação, suas causas e seus efeitos nos equipamentos da rede elétrica. Foram expostos ainda os métodos de cálculo para sua quantificação e as normas regulamentadoras que versam sobre seus limites.

Também foram expostos, de forma sucinta, os principais aspectos construtivos de motores de indução com rotor em gaiola, bem como as fontes de aquecimento interna e informações relacionadas a sua vida útil.

Capítulo 3

Métodos e Metodologias

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, são citados e comentados no estado da arte os resultados de um levantamento bibliográfico referente à quantificação do desequilíbrio e seus efeitos sobre os motores de indução trifásicos. Também são explorados e descritos trabalhos envolvendo o comportamento térmico de motores de indução submetidos a condições não ideais de alimentação.

Este capítulo visa ainda apresentar os materiais e os métodos adotados para se concretizar os objetivos desta dissertação. Dessa forma, são elencadas e justificadas as ações e os materiais que viabilizaram a determinação dos resultados experimentais e computacionais presentes nas próximas etapas deste estudo.

3.2 Estado da Arte

Afim de contextualizar a dissertação a cerca dos trabalhos que discorrem sobre os efeitos do desequilíbrio de tensão nos motores de indução trifásicos, apresenta-se neste item, o estado da arte.

Em Lee *et al.* (1997), dois MITs foram submetidos a oito condições distintas de desequilíbrio que possuíam o mesmo valor do índice LVUR: (a) três com tensões desequilibradas abaixo da nominal, (b) três com tensões desequilibradas acima da nominal, (c) uma com alteração no ângulo de uma fase, e (d) uma com variação no ângulo de duas fases. Os resultados revelaram que apesar do valor de LVUR ser o mesmo, o MIT manifestou comportamentos diferentes em função das diferenças nas tensões aplicadas. Assim, o autor defende que a análise do desequilíbrio é mais precisa quando utiliza-se LVUR juntamente com V_1 , uma vez que a componente de sequência positiva possui uma relação estreita com as tensões de alimentação

desequilibradas e, por conseguinte, com a condição de desequilíbrio. Verifica-se que incrementos em V_1 , quando LVUR é mantido constante, causam aumento no rendimento e diminuição no fator de potência e nas temperaturas nos enrolamentos.

Em Lee (1999), a avaliação do comportamento do MIT submetido a tensões desequilibradas ocorreu por meio da utilização de uma carga real. Da análise das componentes de sequência positiva e negativa, verificou-se que os maiores níveis de V_1 correspondem aos maiores valores de rendimento e aos menores patamares de fator de potência. Pelos experimentos, notou-se que os desequilíbrios com tensões abaixo do nominal causam maiores elevações de temperatura e, conseqüentemente, maiores reduções na vida útil do MIT. Como para cada valor de LVUR existem pelo menos oito combinações de tensões desequilibradas, o autor defende que a determinação da elevação de temperatura e da curva de *derating* do MIT deve ser baseada no emprego conjunta de LVUR e V_1 .

Muito embora as contribuições advindas de Lee *et al.* (1997) e Lee (1999) sejam significativas, esses estudos são fundamentados em apenas oito condições de desequilíbrio muito específicas e que não representam as inúmeras possibilidades observadas na realidade, como por exemplo as combinações que contemplem simultaneamente tensões de alimentação abaixo e acima do patamar ideal.

Em Wang (2001), o autor defende que nas análises de motores alimentados com tensões desequilibradas, a utilização do índice CVUF é essencial para a correta compreensão do comportamento dos MITs. Para fundamentar essa afirmação, estabeleceram-se limites de temperatura com os quais criaram-se relações entre θ_u e os parâmetros estudados, quais sejam: fator *derating*, escorregamento e correntes do motor. Essas relações permitiram determinar os valores máximos de correntes e de fator *derating* de forma tal que o MIT pudesse operar com tensões desequilibradas sem comprometimento de sua vida útil. Conclui-se que para um valor constante do módulo de CVUF, a corrente no estator, o escorregamento e o fator *derating* variam em função de θ_u .

Em Abreu & Emanuel (2002), os estudos revelaram que, em função da intensa aplicação dos MITs em sistemas industriais, comerciais e residenciais, os Estados Unidos têm prejuízos de 1,8 bilhões de dólares por ano com os efeitos dos desequilíbrios de tensão e das distorções harmônicas na vida útil desses equipamentos. Neste trabalho, é apresentado um modelo térmico com o qual determina-se a perda de vida útil em função de desequilíbrios de até 3 % e de conteúdos harmônicos de até 13ª ordem. Dessa forma, verificou-se a redução de vida útil em cinco motores diferentes submetidos a diferentes combinações de desequilíbrios e de harmônicas. O autor ressalta que a sensibilidade dos motores com relação a harmônicas e de-

sequilíbrios, é dependente do tamanho e do tipo do motor, de forma que motores menores são menos sensíveis que os maiores.

Em Pillay *et al.* (2002), o autor efetua uma avaliação comparativa entre os métodos de quantificação do desequilíbrio empregados pelo NEMA, pelo IEEE e pelas componentes simétricas. Dessa análise, constatou-se que para desequilíbrios menores que 5 %, as diferenças decorrentes do emprego desses métodos são insignificantes. O autor examina também a presença de desequilíbrios juntamente com tensões acima (sobretensões) ou abaixo (subtensões) da nominal. Para tanto, comparam-se dois MITs – um de alto rendimento e outro de rendimento padrão – pelo aquecimento nos enrolamentos e por meio dos parâmetros do fator *derating*, do fator de potência, das perdas elétricas, do rendimento. O autor apresenta a necessidade de se adaptar a curva *derating* de NEMA a fim de incluir as influências de sobretensões ou de subtensões. Avaliando as perdas do MIT, concluiu-se que elas são menores em situações com sobretensões, pois essas condições apresentam maiores valores de V_1 . Mostrou-se também que V_2 é responsável por alguns prejuízos no funcionamento do motor, dentre eles a redução do conjugado.

Em Siddique *et al.* (2004), realizou-se uma avaliação comparativa entre três índices de quantificação do desequilíbrio: LVUR, PVUR (*Phase Voltage Unbalance in Percent*) e VUF. Realizaram-se simulações computacionais com vistas a identificação do comportamento do MIT submetido a desequilíbrios com VUF iguais a 4, 8 e 12 %. Ressalta-se que cada um desses níveis continham seis diferentes combinações de tensões de alimentação que se distinguiam pela quantidade de fases acima ou abaixo da nominal. Nesse estudo, os seguintes parâmetros foram avaliados: perdas no estator, perdas no cobre do rotor e perdas totais do cobre. Concluiu-se que as maiores perdas percentuais advêm de MITs com menores potências, e o emprego de V_1 e do fator *derating* são importantes para manutenção da vida útil desses equipamentos. Após a comparação entre os métodos empregados, o autor afirma que a análise mais precisa das condições do desequilíbrio ocorre com a utilização simultânea de VUF e de V_1 .

Em Faiz *et al.* (2004), investigaram-se a utilização dos atuais métodos de quantificação do desequilíbrio de tensão (NEMA, IEEE, componentes simétricas e CIGRÉ). Dessas análises, verifica-se que o emprego de nenhum deles é adequado para avaliação do comportamento do MIT. Demonstra-se, computacionalmente, que o conhecimento somente de VUF não especifica precisamente as condições do desequilíbrio, e conseqüentemente, gera amplas faixas de variação de conjugado e rendimento do MIT. Para mitigar esses erros, os autores propõem o emprego de V_1 em conjunto com VUF. Nota-se que nesse trabalho, os autores analisam condições de desequilíbrios

que contemplam apenas a variação dos módulos, não sendo considerados os desequilíbrios gerados pela variação dos ângulos.

Em Faiz & Ebrahimpour (2005), baseado em análises computacionais e observações de um caso real, o autor ressalta a importância do valor médio das tensões e do índice CVUF na determinação do fator *derating* de um MIT alimentado com tensões desequilibradas. Para tanto, investigaram-se a influência de θ_u nas correntes do estator, no fator *derating*, em V_1 e em V_2 . O autor destaca a importância de se determinar o fator *derating* considerando θ_u , pois somente assim é possível alterar corretamente a potência fornecida pelo motor de forma a melhorar seu rendimento e garantir sua operação segura, mesmo em condições de desequilíbrio de tensão.

Em Pillay & Manyage (2006), fundamentado em experimentos práticos e teóricos, estimou-se a vida útil de um MIT submetido a desequilíbrios de tensão. Realizaram-se experimentos aplicando ao motor cinco condições de desequilíbrio com tensões acima e abaixo da nominal. Dos casos analisados, observou-se que os motores com tensão de alimentação menores do que seu valor nominal, e que não foram submetidos ao fator *derating*, apresentaram maior redução na vida útil. Nos casos em que se utilizou o fator *derating*, observou-se que a vida útil do motor foi poupada. De um modo geral, verificou-se que a vida útil do motor é reduzida com o aumento do desequilíbrio de tensão.

Em Kini *et al.* (2007), o autor defende que a determinação do fator *derating* por meio apenas de VUF pode resultar em dimensionamentos equivocados do MIT e do seu sistema de proteção. A fim de mitigar essa falha, propõe-se a utilização do ângulo e do módulo do CVUF, juntamente com V_1 . Tendo em vista que os efeitos do desequilíbrio dependem diretamente de sua natureza, o autor sugere uma classificação por meio da qual as características do desequilíbrio são contempladas mais precisamente. Essa classificação baseia-se numa comparação entre V_1 e a tensão nominal. Comprova-se que o caso mais prejudicial ao MIT ocorre para V_1 maior que a tensão nominal. Ademais, a avaliação do fator VUF usado atualmente mostra que sua aplicação somente é correta quando V_1 é igual a tensão nominal.

Em Gnacinski (2008a), avaliou-se a influência de θ_u no aumento da temperatura e na determinação do fator *derating* de um MIT submetido a desequilíbrios de tensão. Por meio de um modelo térmico, realizaram-se simulações computacionais cujos resultados foram comparados com resultados experimentais. O autor mostra que o aumento de temperatura nos enrolamentos possui comportamento senoidal em função de θ_u . Prova-se que a mesma combinação de tensões desequilibradas pode gerar no MIT as maiores ou as menores elevações de temperatura possíveis em seus enrolamentos, a depender do tipo de ligação do equipamento, em delta ou em estrela.

Foi definido também o valor do fator *derating* para que o MIT pudesse operar sem exceder seu limite máximo de temperatura. Adicionalmente, estimou-se a influência da presença simultânea do desequilíbrio de tensão e de harmônicos na vida útil do MIT. Neste caso, conclui-se que a vida útil do motor sofre maior impacto com o desequilíbrio do que com a presença de harmônicos.

Em Gnacinski (2008b) propõe-se a consideração conjunta de VUF, de V_1 e de θ_u nas análises do MIT submetido a condições de desequilíbrio de tensão. O autor defende que o emprego θ_u é necessário, pois por meio dele é possível contemplar as propriedades do MIT, incluindo seu tipo de ligação. O autor afirma que uma mesma combinação de tensões desequilibradas pode resultar nas piores elevações de temperatura em determinado motor, e em outro, com propriedades diferentes, as elevações podem ser as mais amenas possíveis. Ademais, verifica-se a importância de contemplar nas análises as características das tensões de alimentação desequilibradas. O autor afirma que isso pode ser efetuado por meio de uma avaliação comparativa entre a V_1 e a tensão nominal.

Em Kini & Bansal (2010), apresentam-se os resultados de ensaios realizados em um sistema constituído por uma bomba centrífuga – com três carregamentos diferentes – acoplada a um MIT alimentado com tensões desequilibradas. O autor defende que apenas o conhecimento de VUF não é suficiente para estudar a eficiência do sistema submetido a desequilíbrios de tensão. Para uma análise mais fidedigna, propõe-se a utilização do fator CVUF juntamente com índices capazes de especificar com maior precisão a natureza e o tipo do desequilíbrio. Esses índices baseiam-se na relação entre V_1 e a tensão nominal. Verificou-se que o rendimento total do sistema possui uma relação estreita com o rendimento da bomba. Concluiu-se ainda que o desequilíbrio de tensão e as variações da carga devem ser considerados simultaneamente para que se tenha o melhor rendimento de operação.

Em Anwari & Hiendro (2010), para aprimorar as avaliações a cerca do desequilíbrio de tensão, os autores propõem o emprego de CVUF e de um novo coeficiente de quantificação do referido fenômeno. Este coeficiente traduz as características da natureza do desequilíbrio e é definido pela razão entre V_1 e a média das tensões de alimentação. Recomenda-se, portanto, que esse coeficiente seja utilizado na avaliação de todos os parâmetros do MIT, uma vez que todos eles são influenciados pelas peculiaridades das tensões de alimentação. Conclui-se que apenas o módulo de CVUF é suficiente para definir a potência de entrada, as perdas totais nos enrolamentos do motor, o fator de potência e o conjugado de saída. Para determinar o valor de pico de corrente, o valor de pico das perdas nos enrolamentos e o fator *derating*, além do módulo do CVUF, é necessário considerar θ_u .

Em Mendes *et al.* (2010), por meio de ensaios experimentais e simulações computacionais, são analisados o emprego de PVU e de V_1 na quantificação da temperatura do motor de indução. É afirmado pelos autores que o conhecimento do índice PVU não determina com precisão os valores das tensões terminais da máquina, havendo uma infinita possibilidade de combinações de tensões de linha que resultam em um mesmo nível do referido índice. Dessa forma, o emprego de PVU não é recomendável em análises do comportamento térmico de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão. Com o intuito de contemplar a natureza do desequilíbrio de tensão, propõe-se uma classificação que relaciona V_1 e a tensão nominal. Observou-se que o emprego de V_1 apresentou uma maior relação com o aumento de temperatura, e assim o autor concluiu que a determinação do fator derating deve ser baseada nos valores de PVU e de V_1 simultaneamente.

Em Quispe *et al.* (2011) os autores evidenciam a influência de V_1 na potência de saída do MIT, de forma tal que fica clara a necessidade de se utilizar esse parâmetro na determinação do fator *derating*. Os autores comprovam que essa influência não é considerada nos índices de quantificação empregados atualmente. Comparando-se os valores do fator *derating* encontrados nos experimentos e os valores determinados pela curva de *derating* definido por NEMA, afirmou-se que a mencionada curva superprotege o motor em grande parte das situações, mas em outras, a referida curva deve ser reavaliada para que limites mais adequados sejam propostos. Assim, concluiu-se que o índice de desequilíbrio proposto por NEMA deve ser utilizado conjuntamente com a V_1 .

Em Almeida (1999) o autor propôs um modelo térmico por meio do qual é possível avaliar a influência do desequilíbrio no comportamento térmico do MIT. Com esse modelo, efetua-se um balanço energético das correntes variantes no motor e, conseqüentemente, pode-se definir a potência dissipada em cada fase do estator. Assim, o modelo térmico apresentado viabiliza o cálculo do aumento de temperatura dos enrolamentos do estator e permite o desenvolvimento de uma função densidade de probabilidade da duração da vida útil do motor. Essas análises propiciaram uma forma alternativa de se avaliar as condições máximas de operação de motores de potência elevada em condições de desequilíbrio.

Em Souto (2001), apresenta-se um estudo do desempenho de motores de indução com rotor em gaiola, cuja alimentação possui a presença de harmônicas e desequilíbrios de tensão. Avaliaram-se os comportamentos elétrico, mecânico e térmico da máquina, assim como sua vida útil. Para a modelagem elétrica empregaram-se técnicas no domínio da frequência e do tempo. Para a modelagem térmica, o autor propôs três modelos diferentes, que se distinguiram pelo grau de complexidade.

Ademais, realizou-se um tratamento das informações pertinentes às condições de alimentação do motor de forma determinística e estatística/ probabilística. As comparações entre os resultados computacionais e experimentais fomentaram análises sobre a precisão dos modelos empregados, mostrando que os modelos computacionais propostos são viáveis para determinação das condições operativas sob os pontos de vista elétrico, mecânico e térmico. O trabalho ainda aborda os prejuízos decorrentes da alimentação com qualidade comprometida, descrevendo sobre as perdas adicionais, a redução da vida útil e o aumento dos custos operacionais da máquina.

Em Filho (2008) efetua-se uma análise crítica do comportamento do fator de desequilíbrio, de V_2 , de V_1 frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões. Para tanto, identificaram-se os lugares geométricos das amplitudes e dos ângulos das tensões que culminam em fatores K iguais. Ressalta-se que o fator K é definido pela razão entre V_2 e V_1 e as avaliações do referido trabalho basearam-se no comportamento da temperatura de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão. Fundamentado nos resultados experimentais, o autor mostra que para um mesmo valor de fator K, o MIT apresenta elevações distintas de temperatura. O autor apresenta ainda a existência de combinações de tensões desequilibradas com fator K próximo de 0 %, onde o comportamento da temperatura deveria ser semelhante ao nominal, que geram aquecimentos maiores que o esperado. Ademais, ilustram-se situações nas quais fatores de desequilíbrio menores ocasionaram elevações de temperatura superiores àquelas obtidas para índices maiores.

Em Hollanda (2012), baseado em simulações computacionais e experimentos laboratoriais, o autor analisa as variações no conjugado e no rendimento de MITs submetidos a diferentes desequilíbrios de tensão. Defende-se que essas variações são reduzidas quando são especificados os valores de V_1 juntamente com VUF. Como o processo de identificação de limites utilizando-se esses dois índices simultaneamente é mais complexo, o autor apresenta um método alternativo que emprega a média aritmética das amplitudes das tensões. Assim, demonstra-se que a tensão média (V_m) é suficiente para a avaliação do desempenho de motores submetidos a desequilíbrios de tensão.

Por meio das análises de diferentes características do comportamento dos MITs, os trabalhos mencionados, em sua grande maioria, identificaram lacunas decorrentes do emprego isolado de VUF. A fim de sanar essas falhas, os autores sugeriram alternativas para a quantificação do desequilíbrio de tensão. Dentre elas, a utilização conjunta de VUF e V_1 foi apontada como a maneira mais adequada para se obter resultados precisos. Alguns estudos também sugeriram o emprego de θ_u e de índices que basicamente são definidos pela relação entre V_1 e a tensão nominal do sistema.

3.3 Materiais e Métodos

Este item apresenta os materiais e métodos adotados para o desenvolvimento da avaliação comparativa entre os índices VUF, V_1 e θ_u , empregados para a quantificação da temperatura de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão.

A análise desses índices se dará por meio da definição de seis diferentes configurações, que correspondem as combinações possíveis de adoção dos parâmetros supramencionados. Deste modo, serão efetuadas as avaliações de: VUF, V_1 , VUF em conjunto com V_1 , θ_u , VUF em conjunto com θ_u e V_1 em conjunto com θ_u .

As análises supramencionadas serão executadas por meio das seguintes etapas:

1. Identificação do lugar geométrico correspondente ao(s) índice(s) empregado(s);
2. Avaliação do comportamento da elevação de temperatura máxima – selecionada dentre as três fases em cada condição de desequilíbrio – em função do(s) índice(s) avaliado(s); e
3. Avaliação simultânea dos aquecimentos nas três fases em função do(s) índice(s) avaliado(s). Para tanto, observa-se também o desvio padrão entre os aquecimentos obtidos nas três fases em cada situação de desequilíbrio.

Sobre as tensões de alimentação, optou-se, no primeiro instante, pela avaliação do MIT submetido a um conjunto trifásico de tensões equilibradas. Estes resultados se prestam como referência para a análise da elevação da temperatura do motor submetido a condições não ideais de operação. Posteriormente, analisou-se o motor submetido a diversos fasores de tensões desequilibradas.

Neste trabalho, os desequilíbrios foram criados pela variação das três tensões de linha na faixa entre 201 e 231 V (com passos de 0,25 V). Na verdade, gerou-se um banco de dados composto por 1 786 202 condições de desequilíbrios nas quais os módulos e os ângulos das tensões variam simultaneamente. Ressalta-se que a faixa de variação das tensões foi adotada respeitando-se os limites aceitáveis para um sistema com tensão nominal igual a 220 V (ANEEL, 2010).

Desse banco de dados geral, selecionaram-se as combinações de tensões utilizadas para a execução dos ensaios experimentais e para o desenvolvimento das simulações computacionais. Os requisitos e critérios considerados para realização dos experimentos e das simulações computacionais são expostos nos subitens 3.3.1 e 3.3.2, respectivamente.

3.3.1 Validação Experimental

A análise experimental desempenha um papel importante em qualquer estudo de engenharia que se faça, haja vista a possibilidade de comprovação de suposições teóricas por meio do desenvolvimento de ensaios reais em laboratório.

Dessa forma, a execução dos experimentos propostos neste trabalho objetiva avaliar a temperatura de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão de acordo com VUF, V_1 e θ_u . Essas constatações práticas viabilizam a quantificação dos erros decorrentes da utilização de cada um dos parâmetros estudados. Sendo assim, neste item, descrevem-se todas as informações necessárias para o entendimento de como os ensaios experimentais foram efetuados.

Os ensaios realizados utilizaram um motor de indução trifásico em gaiola com as seguintes especificações fornecidas pelo fabricante: 2 CV, 220/380 V, 4 polos, 60 Hz, 1755 RPM, classe de isolamento F, conjugado nominal de operação igual a 8,13 N.m e corrente nominal igual a 6,15 A.

A Figura 3.1 exhibe, de forma esquemática, o arranjo experimental empregado nos ensaios experimentais. Nessa figura, observam-se os equipamentos utilizados e suas conexões ao motor trifásico de indução.

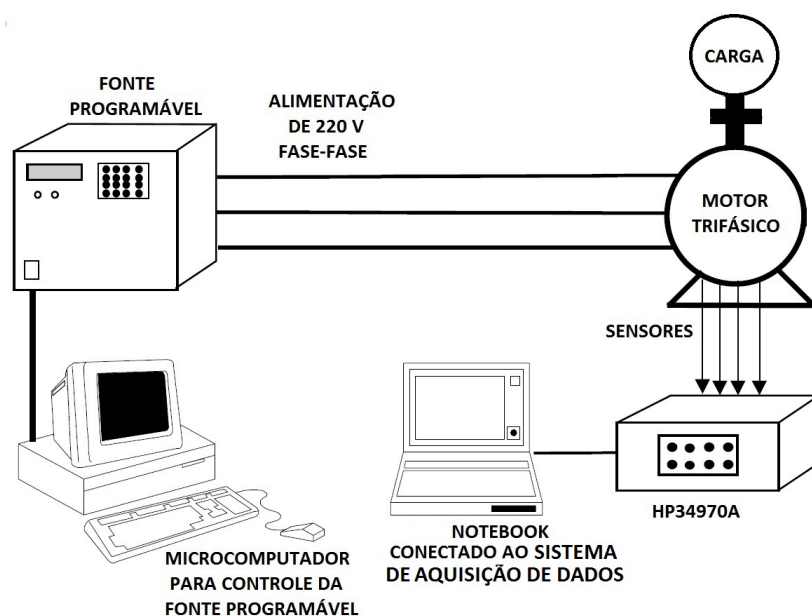


Figura 3.1: Esquema de conexão para realização dos experimentos

As unidades que compõem o circuito elétrico da montagem experimental são:

- Fonte programável – alimenta o motor de indução por meio de um sinal de tensão controlável;
- Microcomputador – para o controle da fonte programável, o armazenamento

e o processamento dos sinais derivados do sistema de medição da mesma;

- Sistema de aquisição de dados (HP34970A) – destinado à medição dos sinais de temperatura;
- Notebook – para processamento e armazenamento dos sinais de temperatura;
- Motor de indução trifásico, rotor em gaiola de esquilo, conectado em delta, potência nominal de 2 CV, tensão de 220 V e 60 Hz; e
- Gerador de corrente contínua (GCC) funcionando como carga.

Os níveis de desequilíbrio aos quais o dispositivo analisado é submetido são providos por uma fonte de alimentação especial da *California Instruments*, modelo 30003 *ix*, trifásica, com potência de 30 kVA.

A Figura 3.2 exibe uma foto da fonte trifásica utilizada e do microcomputador para o controle da mesma, indicados pelos números 1 e 2, respectivamente. A Figura 3.3 apresenta uma foto do conjunto formado pelo sistema de aquisição de dados, do motor de indução trifásico e do gerador de corrente contínua, indicados pelos números 3 e 4 e 5, respectivamente.

Na literatura atinente, há trabalhos que ressaltam a importância do controle das condições ambientais para a realização de ensaios envolvendo a análise de temperatura (GNACINSKI, 2008b). Neste sentido, estabeleceram-se alguns critérios com o intuito de mitigar as diferenças ambientais entre cada um dos ensaios. A seguir, apresentam-se estes cuidados.

1. O ambiente no qual o MIT se encontrava foi isolado a fim de evitar o trânsito de pessoas e o fluxo de ar. A isolação ocorreu para minimizar a influência de agentes ambientais na elevação de temperatura nos enrolamentos do MIT.
2. Por se tratar da análise da temperatura, que se caracteriza como um parâmetro de transição lenta, tornou-se necessária a aquisição das medições em regime permanente. Por esta razão, calculou-se a constante de decaimento do processo para, assim, se determinar o tempo equivalente ao regime permanente (OGATTA, 1998). A constante de decaimento é igual a aproximadamente 17 minutos. Tendo considerado que o regime permanente equivale a 5 vezes a constante de decaimento, adotou-se como período do ensaio o intervalo de tempo igual a 1h30.
3. A obtenção das temperaturas deu-se por meio de três sensores de temperatura do tipo PT100, instalados em cada um dos enrolamentos das fases do



Figura 3.2: Fonte de alimentação especial da *California Instruments*

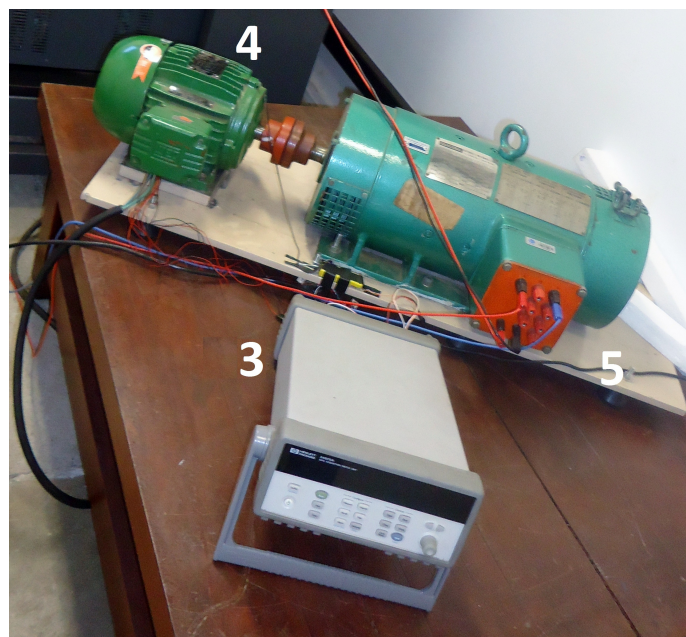


Figura 3.3: Conjunto formado pelo MIT, GCC e sistema de aquisição de dados

estator. A aquisição das temperaturas ocorreu a cada dez segundos. Este processo iniciava-se juntamente com a energização do MIT, e finalizava-se com a desenergização do mesmo.

4. Todos os ensaios começaram com a temperatura do motor na faixa entre $29,5^{\circ}\text{C}$ e $30,5^{\circ}\text{C}$. Para que isso fosse possível, controlou-se a temperatura do motor com o auxílio de ventiladores e de um ar condicionado (mantidos desligados durante os ensaios). Este procedimento foi rigorosamente praticado, a fim de se evitar que um possível gradiente de temperatura pré-existente influenciasse os resultados finais.
5. A carga do motor de indução trifásico foi mantida constante e igual a nominal em todos os ensaios realizados. Esse controle da carga do MIT ocorreu por meio da conexão do mesmo ao gerador de corrente contínua.

Respeitado todos os critérios supramencionados, realizaram-se um total de 235 ensaios que culminaram em VUF entre 0 % e 5 %. Ressalta-se que as elevações de temperatura obtidas, em cada uma das fases, nos 235 ensaios realizados são descritas na Tabela 1 presente no Apêndice B.

3.3.2 Simulações Computacionais empregando RNAs

Diante da possibilidade dos resultados experimentais conduzirem a conclusões equivocadas – em decorrência da quantidade de ensaios realizados – avaliou-se o comportamento térmico do MIT submetido a uma quantidade significativamente maior de condições de desequilíbrio. Dessa maneira, foram realizadas simulações computacionais, por meio do emprego de redes neurais artificiais (RNAs), que permitiram a verificação das elevações de temperatura nas fases do MIT, considerando um grupo mais completo de combinações de tensões. Os critérios envolvidos para o desenvolvimento das RNAs utilizadas são descritos a seguir.

Neste trabalho, as redes neurais são do tipo *perceptron* de múltiplas camadas. O Apêndice A fornece informações mais específicas sobre as RNAs.

Visando ao melhor resultado das redes, optou-se pelo desenvolvimento de uma RNA para cada uma das três fases do MIT. Assim, nas análises considerando apenas a maior elevação de temperatura para determinado desequilíbrio, as três RNAs foram simuladas e as três elevações de temperatura foram determinadas. Todavia, apenas o resultado correspondente ao maior aquecimento foi considerado.

Optou-se também pelo desenvolvimento de redes diferenciadas de acordo com as seis configurações propostas. Dessa forma, o sistema de RNA adotado neste

trabalho possui no total dezoito redes. Destaca-se que todas elas foram desenvolvidas seguindo os mesmos critérios.

Para a criação das RNAs, os parâmetros de entrada são compostos pela matriz P, constituída pelos módulos e ângulos dos fasores de tensão, e pela matriz T, correspondente as elevações de temperatura em uma das fases. Desse modo, cinco colunas são inseridas na matriz P e uma na matriz T, arranjadas da seguinte maneira:

- 1^a Coluna da matriz P: Módulo da tensão de linha AB;
- 2^a Coluna da matriz P: Módulo da tensão de linha BC;
- 3^a Coluna da matriz P: Ângulo da tensão de linha BC;
- 4^a Coluna da matriz P: Módulo da tensão de linha CA;
- 5^a Coluna da matriz P: Ângulo da tensão de linha CA;
- 1^a Coluna da matriz T: Elevação de temperatura em uma das fases.

Ressalta-se que o ângulo da tensão de linha AB não foi contemplado nas matrizes de entrada, uma vez que ele é igual a 0° em todos os desequilíbrios.

O treinamento das redes neurais foi efetuado por meio das matrizes P e T descritas anteriormente, e o critério de parada do treinamento considerado foi de 0,01. Para a verificação das redes treinadas, aproveitaram-se de 10 % a 25 % das amostras de entrada das RNAs.

Os parâmetros de entrada que compõem as estruturas das RNAs foram obtidos por meio dos ensaios experimentais. Posto que o número de testes executados em cada uma das seis configurações foram variados, as matrizes de treinamento e validação consideradas também possuíram dimensões diferenciadas. A Tabela 3.1 apresenta o total de experimentos empregados para treinamento e validação de cada um dos grupos analisados.

O erro médio e o desvio padrão considerados aceitáveis para comprovação da eficiência de uma rede devem possuir, no máximo, valores iguais a 5 % da amostra de validação (GOEDTEL, 2003). Neste trabalho, todas as dezoito RNAs desenvolvidas atendem a essa condição, sendo o erro médio e o desvio padrão máximos iguais a 4,32 % e 2,52, respectivamente.

Tabela 3.1: Número de ensaios para treinamento e validação das RNAs desenvolvidas

Índice(s) Empregado(s)	Total de ensaios para Treinamento	Total de ensaios para Validação
$VUF = 2 \%$	63	15
$V_1 = 220 V$	53	14
$VUF = 2 \%$ e $V_1 = 220 V$	22	5
$\theta_u = 120^\circ$	39	8
$VUF = 2 \%$ e $\theta_u = 120^\circ$	14	5
$V_1 = 220 V$ e $\theta_u = 120^\circ$	9	3

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foi descrita uma extensa revisão bibliográfica composta por estudos relacionados aos efeitos do desequilíbrio de tensão aplicados em MITs e sobre a quantificação do referido fenômeno. Desses trabalhos, verificaram-se falhas atreladas ao emprego de VUF e também as alternativas propostas por diversos autores para a quantificação adequada do desequilíbrio de tensão em MITs.

Ademais, evidenciaram-se os procedimentos e os materiais necessários para se concretizar os objetivos desta dissertação. Sendo assim, foram expostas as propostas de análise adotadas para efetuação dos experimentos e das simulações computacionais com o MIT submetido a diversos patamares de desequilíbrios de tensão.

Capítulo 4

Apresentação e Análise dos Resultados

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, são apresentadas as análises dos resultados das medições efetuadas em laboratório visando a avaliação do desempenho dos índices VUF, V_1 e θ_u , empregados isoladamente ou em conjunto, para a quantificação da temperatura de motores de indução submetidos a desequilíbrios de tensão.

Considerando-se o mencionado objetivo, este capítulo inicia-se com a apresentação dos resultados obtidos para a condição nominal. O comportamento da temperatura para a situação nominal de operação presta-se como referência para as demais combinações de tensões desequilibradas ensaiadas.

Em seguida, têm-se as discussões a cerca dos resultados oriundos da aplicação de 235 diferentes conjuntos de tensões desequilibradas. Essas avaliações são ordenadas de acordo com o emprego dos índices VUF, V_1 e θ_u . Além das análises considerando a maior elevação de temperatura para cada um dos ensaios, também são avaliados os aquecimentos separadamente nas três fases.

O presente capítulo apresenta ainda uma avaliação de algumas características observadas durante a análise dos dados experimentais. São descritos os resultados de simulações computacionais empregando-se redes neurais artificiais que viabilizam a reprodução dos ensaios laboratoriais, considerando-se um número significativamente maior de combinações de tensões desequilibradas. Finalmente, e visando a identificação dos prejuízos causados pela alimentação com tensões desequilibradas, são apresentados os efeitos nocivos das temperaturas na vida útil do motor avaliado.

4.2 Condição Ideal de Suprimento

Neste trabalho, estabeleceu-se elevação de temperatura à diferença entre as temperaturas final e inicial no enrolamento entre duas fases do estator. A Tabela 4.1 ilustra os resultados oriundos da aplicação da tensão nominal (220 V) sobre cada fase do MIT, e as respectivas elevações de temperatura, quando a alimentação é equilibrada e sem distúrbios.

Tabela 4.1: Condição Ideal de Suprimento

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
1	0,11	$-38,00^\circ$	220,20	$\bar{V}_{AB} = 220,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00 \angle -119,97^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,20 \angle 120,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,20$ $\Delta_{bc} = 50,70$ $\Delta_{ca} = 49,70$

Da Tabela 4.1, observa-se que cada uma das elevações de temperatura é aproximadamente igual a 50°C – valor adotado como elevação de temperatura nominal nas fases.

Ressalta-se que, sendo a temperatura inicial dos ensaios realizados igual a 30°C , a temperatura máxima é de 80°C . Trata-se de um valor inferior àquele relacionado a classe de isolamento do motor, qual seja a classe F, que permite uma temperatura máxima da ordem de 155°C , quando o ambiente é igual a 40°C (SOUTO, 2001).

A Figura 4.1 ilustra a elevação de temperatura obtida experimentalmente no enrolamento da fase A na condição de alimentação nominal.

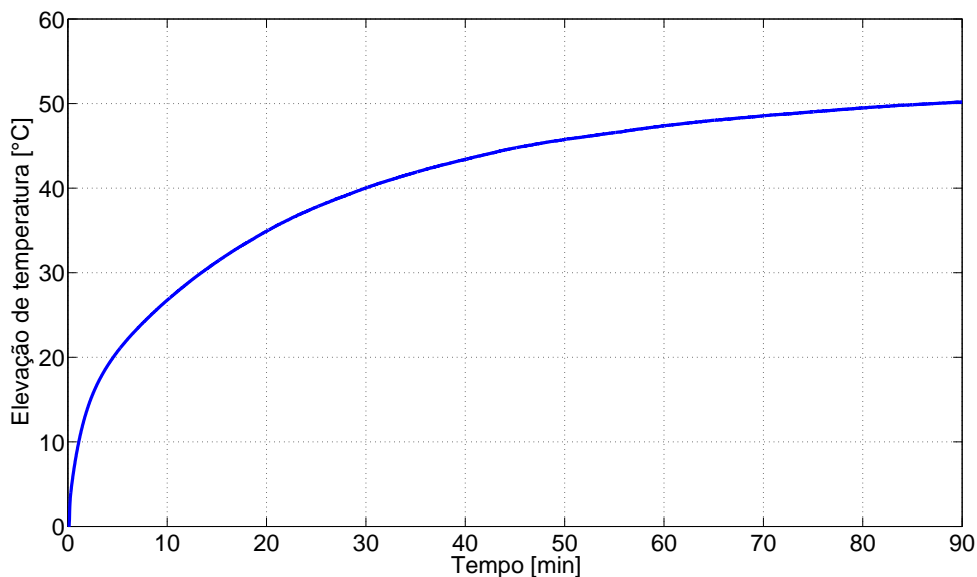


Figura 4.1: Curva de elevação da temperatura no enrolamento da fase A do estator para a condição nominal

Da Figura 4.1, verifica-se que depois de um período de aquecimento, a elevação de temperatura do motor tende a se estabilizar, para a condição nominal de alimentação, em um patamar próximo de 50°C .

4.3 Análise do VUF

Nesta seção, são exibidas as análises voltadas à identificação da eficácia do VUF na quantificação do desequilíbrio no que diz respeito a temperatura. Para tanto, avaliam-se as temperaturas em função do aumento de VUF, e também quando esse índice é mantido constante.

A Figura 4.2 corresponde ao lugar geométrico de todas as combinações possíveis de tensões de linha desequilibradas que culminam em VUF igual a 2 %. Neste caso, os ângulos das tensões de linha são mantidos constantes e nominais – iguais a 0° , 120° e 240° – e as amplitudes são variadas entre 180 e 290 volts.

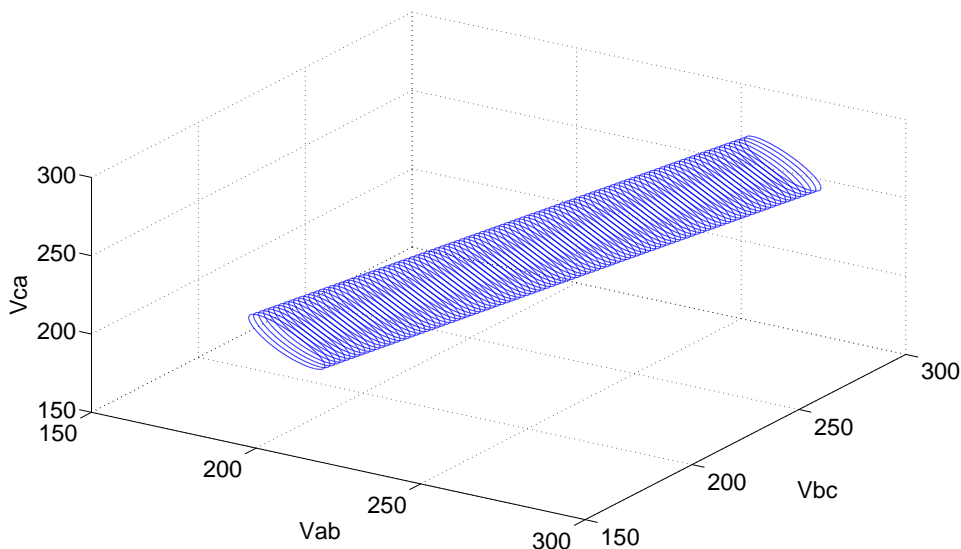


Figura 4.2: Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $VUF = 2\%$

Na Figura 4.2 verifica-se que a variação das amplitudes das tensões para $VUF = 2\%$ culmina em um lugar geométrico correspondente a um cilindro cujo comprimento está vinculado à faixa de variação das tensões. Caso o limite das tensões reduza ou aumente, a quantidade de fasores reduzirá ou aumentará, respectivamente.

Destaca-se que no interior desse cilindro encontram-se os valores de tensão que geram VUFs menores que 2 %, assim como a parte externa do cilindro acomoda os fasores correspondentes a VUFs maiores que 2 %.

Uma vez que o cilindro na Figura 4.2 apresenta inúmeras combinações de tensões

que resultam em um mesmo VUF, é possível que um conjunto de tensões de uma das extremidades do cilindro gere temperaturas no motor completamente diferentes de outras tensões pertencentes à extremidade oposta. A variação da temperatura para um mesmo valor de VUF pode comprometer o emprego desse índice para a quantificação do desequilíbrio.

A Figura 4.3 apresenta as elevações de temperatura máximas em função de VUF.

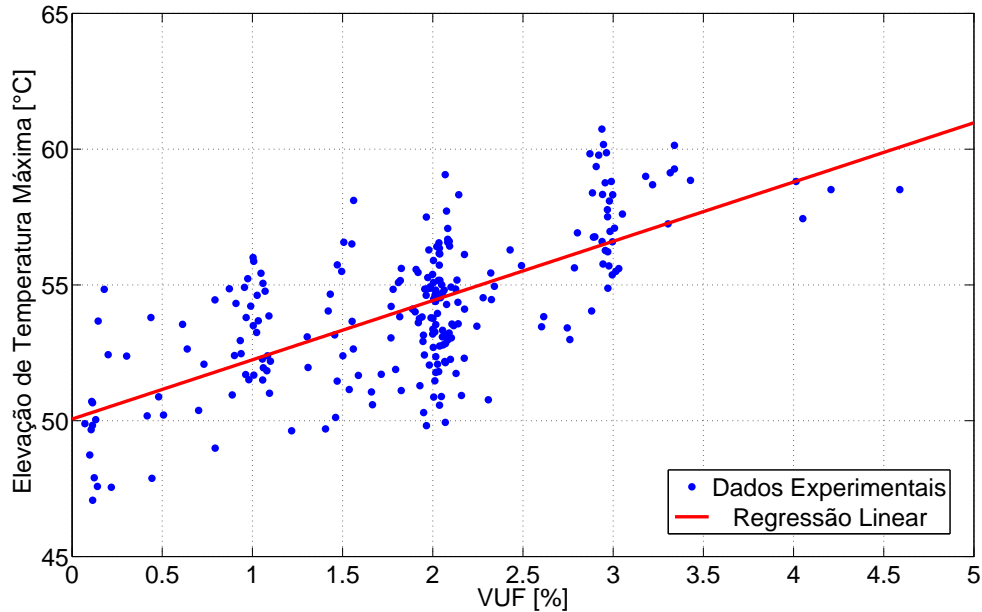


Figura 4.3: Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de VUF

Da Figura 4.3 ressaltam-se dois aspectos: o aumento das elevações de temperaturas com o acréscimo de VUF e a existência de inúmeros patamares de temperatura para um mesmo valor do mencionado índice.

A curva em vermelho na Figura 4.3 é resultante de uma regressão linear, cujo comportamento é definido pela equação 4.1.

$$\Delta_{temp} = 2,2 * \alpha_{VUF} + 50 \quad (4.1)$$

Onde:

Δ_{temp} é a elevação de temperatura máxima; e

α_{VUF} é o valor do parâmetro VUF.

Com a curva em vermelho e sua equação correspondente é possível comprovar uma tendência de aumento nas elevações das temperaturas máximas com o incremento nos valores de VUF. De acordo com o coeficiente angular da equação 4.1, nota-se que para o incremento de 1 % em VUF, a temperatura aumenta 2,2°C.

Entretanto, é importante mencionar que há exceções decorrentes da existência de inúmeros patamares de temperatura para um mesmo VUF. Afim de se determinar a taxa de variação máxima da temperatura de acordo com VUF, calcularam-se as discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para alguns valores de VUF. Os resultados dessas análises são expostos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de VUF

VUF [%]	Faixa considerada	Discrepância em [°C]	Total de ensaios	Porcentagem da elevação nominal (50°C)
0,5	entre 0,4 e 0,6	5,92	5	11,84
1,0	entre 0,9 e 1,1	5,00	28	10,00
1,5	entre 1,4 e 1,6	8,41	16	16,82
2,0	entre 1,9 e 2,1	9,24	78	18,48
3,0	entre 2,9 e 3,1	5,89	25	11,78

Da Tabela 4.2, observa-se que o total de ensaios para cada valor de VUF é variável. Não se identifica uma correlação entre o número de ensaios por faixa de VUF e a elevação de temperatura. Entretanto, independente da quantidade de ensaios, nota-se que as diferenças entre as maiores e as menores temperaturas implicam em discrepâncias da ordem de 10 a 18,48 % da elevação nominal. Isso significa, por exemplo, para $VUF = 2\%$ a possibilidade de temperaturas que diferem entre si em quase 10°C.

Além das análises considerando-se apenas a temperatura máxima para cada condição de desequilíbrio, são explorados neste estudo os aquecimentos constatados em cada uma das três fases do motor.

A Tabela 4.3 apresenta as elevações de temperatura por fase para condições de desequilíbrio onde tem-se $VUF = 2\%$ (na verdade, entre 1,9 e 2,1 %). É preciso ressaltar que, por se ter VUF constante, espera-se que as temperaturas entre os mencionados casos assemelhem-se entre si, inclusive entre as fases. O número de cada caso segue a ordem estabelecida quando da exposição dos 235 casos resultantes da realização dos ensaios laboratoriais. Esses ensaios são apresentados na Tabela 1 presente no Apêndice B.

Para cada um dos casos expostos na Tabela 4.3, calculou-se a diferença entre a maior e a menor elevação de temperatura obtidas nas fases – chamada de Δ .

Da Tabela 4.3, nota-se:

1. Das diferenças entre o maior e o menor aquecimentos por situação de desequilíbrio, verifica-se uma variação entre 3,73 e 7,21°C, obtidas nos ensaios 126

Tabela 4.3: Condições de desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]	Δ entre fases [°C]
102	1,96	112, 18°	230,14	$\bar{V}_{AB} = 228,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 234,60\angle -121,20^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,40\angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,16$ $\Delta_{bc} = 57,50$ $\Delta_{ca} = 51,11$	6,39
103	1,96	119, 83°	207,01	$\bar{V}_{AB} = 205,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 211,10\angle -120,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,00\angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,49$ $\Delta_{bc} = 49,82$ $\Delta_{ca} = 44,33$	5,49
116	2,00	52, 69°	219,98	$\bar{V}_{AB} = 222,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 221,70\angle -121,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,60\angle 119,24^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,09$ $\Delta_{bc} = 52,68$ $\Delta_{ca} = 48,60$	6,49
117	2,00	83, 86°	225,31	$\bar{V}_{AB} = 225,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,00\angle -121,81^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,20\angle 118,40^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,30$ $\Delta_{bc} = 55,90$ $\Delta_{ca} = 50,01$	5,89
120	2,01	107, 91°	220,24	$\bar{V}_{AB} = 218,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,60\angle -121,34^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,30\angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,44$ $\Delta_{bc} = 53,27$ $\Delta_{ca} = 47,17$	6,10
121	2,01	121, 96°	204,48	$\bar{V}_{AB} = 202,30\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,60\angle -120,96^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,60\angle 117,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,06$ $\Delta_{bc} = 51,47$ $\Delta_{ca} = 46,22$	5,25
126	2,02	-146, 87°	211,04	$\bar{V}_{AB} = 207,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,90\angle -118,18^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 214,80\angle 120,15^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,05$ $\Delta_{bc} = 51,73$ $\Delta_{ca} = 51,78$	3,73
161	2,08	56, 44°	229,04	$\bar{V}_{AB} = 231,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 231,20\angle -122,05^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,30\angle 119,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 57,08$ $\Delta_{bc} = 55,04$ $\Delta_{ca} = 49,87$	7,21

e 161, respectivamente. Ressalta-se que esses extremos são definidos considerando não apenas os casos da Tabela 4.3, mas todos os 78 conjuntos de tensões que culminam em $VUF = 2\%$.

2. Se tomada a temperatura $\Delta_{ca} = 44,33^\circ\text{C}$ no ensaio 103 e $\Delta_{bc} = 57,50^\circ\text{C}$ do caso 102, verifica-se que para um mesmo valor de VUF, neste caso igual a 2%, as fases variam até 13,17°C, o que equivale a 26,3% da elevação nominal.
3. Apesar de todas as condições expostas possuírem $VUF = 2\%$, em alguns casos as tensões de alimentação apresentam características com diferenças expressivas. Os testes 116 e 120 apresentam tensões com valores acima e abaixo de 220 V, e os aquecimentos nas fases são superiores e inferiores ao nominal. Nos casos 103, 121 e 126, as três tensões de alimentação possuem valores abaixo do nominal. Para esses casos, observam-se os menores aquecimentos gerados.

Nas situações 102, 117 e 161, todas as tensões de alimentação são maiores que o valor nominal. Para esses ensaios, são verificadas as maiores elevações de temperatura.

4. Das oito situações descritas, e também de todos os desequilíbrios com $VUF = 2\%$, observa-se que as maiores temperaturas ocorrem nas fases submetidas aos maiores valores de tensão.

Assim como as análises realizadas para $VUF = 2\%$, investigaram-se o comportamento das elevações de temperatura por fase para desequilíbrios com $VUF = 1\%$ (entre 0,9 e 1,1 %) e 3 % (entre 2,9 e 3,1 %). Dessas análises, nota-se que em todos os 28 desequilíbrios com $VUF = 1\%$ os aquecimentos nas fases diferem entre si em no máximo $7,5^{\circ}\text{C}$, e nos 25 desequilíbrios com $VUF = 3\%$ essa diferença alcança o patamar de $11,2^{\circ}\text{C}$. Ademais, observa-se que – independente do valor no qual VUF é mantido constante – um mesmo VUF representa distintas combinações de tensões correspondentes a diferentes elevações de temperatura nas fases do MIT.

A Tabela 4.4 apresenta alguns dos resultados das temperaturas nas três fases decorrentes da aplicação sobre o motor de tensões desequilibradas nas quais o índice VUF varia entre 0,14 e 2,97 %.

Da Tabela 4.4, observa-se:

1. A existência de condições de tensão com VUF próximo de 0% que culminam em elevações de temperatura superiores às obtidas para VUF acima de 2%. Por exemplo, no caso 13, é possível identificar elevações de temperatura da ordem de 52°C para $VUF=0,20\%$, quando se verifica para $VUF=2,16\%$ (caso 177), elevações nas três fases inferiores a 51°C . Este mesmo tipo de ocorrência pode também ser identificado comparando-se os casos 13 e 153.
2. Nesta mesma linha de análise, têm-se ainda a citar condições de desequilíbrio com valores de VUF inferiores produzindo elevações de temperatura maiores que àquelas medidas para valores de VUF superiores. Avaliando-se o caso 27, onde o $VUF=0,87\%$, têm-se elevações nas três fases superiores às encontradas para o caso 171, onde o $VUF=2,13\%$. Exemplificam também este tipo de ocorrência os pares 41 e 213, bem como 59 e 153.
3. Apesar de se constatar no item 3 decorrente da Tabela 4.3 que lá, maiores tensões culminaram em maiores temperaturas, agora da Tabela 4.4 onde tem-se VUF entre 0,14 e 2,97 %, percebe-se que valores de tensão mais elevados nem sempre são garantia de temperatura superiores aos casos onde as tensões são menores. Para exemplificar este aspecto, veja os casos 57 e 13, para os

Tabela 4.4: Resultados da aplicação de tensões desequilibradas sob a ótica de VUF

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ$ C]
10	0,14	$31,14^\circ$	213,17	$\bar{V}_{AB} = 213,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,20 \angle -120,12^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 212,90 \angle 120,01^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,58$ $\Delta_{bc} = 47,36$ $\Delta_{ca} = 46,69$
13	0,20	$24,75^\circ$	200,93	$\bar{V}_{AB} = 201,30 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 200,90 \angle -120,16^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 200,60 \angle 120,02^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,43$ $\Delta_{bc} = 51,94$ $\Delta_{ca} = 51,47$
16	0,42	$-148,96^\circ$	215,03	$\bar{V}_{AB} = 214,30 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,00 \angle -119,63^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,80 \angle 120,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,48$ $\Delta_{bc} = 50,18$ $\Delta_{ca} = 49,55$
27	0,87	$120,38^\circ$	227,60	$\bar{V}_{AB} = 226,60 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,60 \angle -120,42^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 226,60 \angle 119,14^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,50$ $\Delta_{bc} = 54,86$ $\Delta_{ca} = 51,51$
41	1,01	$-151,48^\circ$	228,13	$\bar{V}_{AB} = 226,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,20 \angle -119,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 230,10 \angle 119,98^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,09$ $\Delta_{bc} = 55,87$ $\Delta_{ca} = 55,61$
57	1,22	$-11,03^\circ$	218,62	$\bar{V}_{AB} = 221,20 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,90 \angle -120,41^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,80 \angle 120,80^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,63$ $\Delta_{bc} = 46,33$ $\Delta_{ca} = 47,06$
59	1,31	$-121,77^\circ$	202,56	$\bar{V}_{AB} = 201,20 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 201,30 \angle -118,69^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,20 \angle 120,61^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,25$ $\Delta_{bc} = 50,59$ $\Delta_{ca} = 51,96$
148	2,05	$-138,04^\circ$	204,51	$\bar{V}_{AB} = 201,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 203,70 \angle -118,04^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,50 \angle 120,45^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,91$ $\Delta_{bc} = 52,24$ $\Delta_{ca} = 53,33$
153	2,07	$123,81^\circ$	206,14	$\bar{V}_{AB} = 203,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,40 \angle -120,92^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,30 \angle 117,93^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,12$ $\Delta_{bc} = 49,94$ $\Delta_{ca} = 44,31$
171	2,13	$148,44^\circ$	215,98	$\bar{V}_{AB} = 212,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00 \angle -120,08^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,90 \angle 118,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,44$ $\Delta_{bc} = 54,85$ $\Delta_{ca} = 49,78$
177	2,16	$-156,60^\circ$	223,91	$\bar{V}_{AB} = 219,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,50 \angle -118,27^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,80 \angle 119,77^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,59$ $\Delta_{bc} = 50,93$ $\Delta_{ca} = 50,65$
192	2,76	$-122,22^\circ$	204,16	$\bar{V}_{AB} = 201,20 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 201,60 \angle -117,23^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 209,80 \angle 121,30^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,00$ $\Delta_{bc} = 49,68$ $\Delta_{ca} = 52,99$
213	2,97	$109,18^\circ$	205,95	$\bar{V}_{AB} = 204,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 212,00 \angle -121,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,00 \angle 117,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,41$ $\Delta_{bc} = 54,88$ $\Delta_{ca} = 46,93$

quais têm-se, respectivamente, VUF iguais a 1,22 % e 0,20 %. É possível perceber que em duas das três fases, as elevações de temperatura são menores às encontradas para as condições onde os valores das tensões são maiores. Isso também ocorre para os casos 10 e 192.

Na Figura 4.4 são exibidos os desvios padrões entre as elevações de temperatura das três fases (veja equação 4.2) em função de VUF. A curva em vermelho representa o resultado da aplicação da regressão linear, cujo comportamento é definido pela equação 4.3.

$$\varepsilon = \sqrt{\sum \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{n}} \quad (4.2)$$

Onde:

ε é o desvio padrão entre as elevações de temperatura das três fases;

\bar{x} é o valor médio das elevações de temperatura nas três fases;

x_i é o valor da temperatura nas fases A, B ou C; e

n é o número total de amostras, que no presente estudo, será sempre igual a 3.

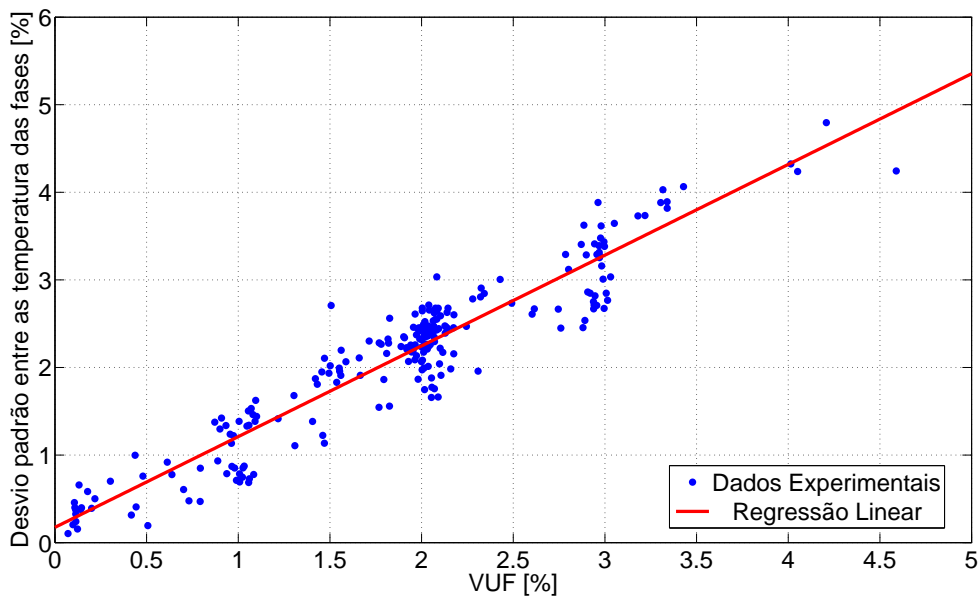


Figura 4.4: Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de VUF

$$\Delta_{desvio} = 1 * \alpha_{VUF} + 0,17 \quad (4.3)$$

Onde:

Δ_{desvio} é o valor do desvio padrão.

Alicerçado na Figura 4.4 e na equação 4.3, verifica-se que o desvio padrão entre as temperaturas de cada fase aumenta linearmente com o acréscimo de VUF. O coeficiente angular da equação 4.3 mostra que um aumento de 1 % no valor de VUF acarreta um incremento também de 1 % no desvio padrão.

Da Figura 4.4, percebe-se que para condições com VUF menores, os enrolamentos têm aquecimentos mais semelhantes entre si, e para situações nas quais o VUF possui patamares mais elevados, os aquecimentos entre os enrolamentos são mais discrepantes entre si.

As observações verificadas no gráfico da Figura 4.4 são comprovadas pelas condições de desequilíbrio apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Casos para análise do aumento do desvio padrão em função de VUF

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]	Δ entre fases [°C]
10	0,14	31,14°	213,17	$\bar{V}_{AB} = 213,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,20\angle -120,12^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 212,90\angle 120,01^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,587$ $\Delta_{bc} = 47,36$ $\Delta_{ca} = 46,69$	0,89
40	1,00	58,51°	204,96	$\bar{V}_{AB} = 206,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 206,00\angle -120,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,90\angle 119,55^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,50$ $\Delta_{bc} = 52,39$ $\Delta_{ca} = 50,17$	3,33
118	2,00	119,58°	204,01	$\bar{V}_{AB} = 202,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,10\angle -121,03^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,00\angle 117,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,43$ $\Delta_{bc} = 54,48$ $\Delta_{ca} = 48,78$	5,7
220	3,00	119,61°	205,52	$\bar{V}_{AB} = 202,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 211,70\angle -121,54^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,50\angle 116,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,54$ $\Delta_{bc} = 58,32$ $\Delta_{ca} = 50,07$	8,25
232	4,01	-68,65°	221,78	$\bar{V}_{AB} = 225,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,00\angle -117,51^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,40\angle 123,87^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,87$ $\Delta_{bc} = 48,41$ $\Delta_{ca} = 58,81$	10,4

Das diferenças, entre o maior e o menor aquecimentos por situação de desequilíbrio, expostos na Tabela 4.5, nota-se um aumento gradativo da diferença de temperatura entre as fases em função do incremento no valor de VUF.

Das análises a cerca da utilização de VUF, afirma-se que o emprego desse índice é insuficiente para traduzir as características das tensões de alimentação. Isso ocorre porque um mesmo valor de VUF representa diferentes condições de desequilíbrio. Todavia, para as análises de temperatura, VUF apresenta-se como um indicador capaz de evidenciar quais desequilíbrios são mais nocivos ao MIT. Essa última característica decorre do fato de que maiores valores de VUF causam maiores temperaturas máximas e maiores diferenças entre os aquecimentos nas fases.

4.4 Análise de V_1

Nesta seção são apresentados os principais resultados das investigações a cerca da eficiência do emprego isolado de V_1 na quantificação da temperatura de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão.

A Figura 4.5 apresenta o lugar geométrico de todas as combinações possíveis de tensões de linha entre 201 e 231 V para V_1 igual a 220 V.

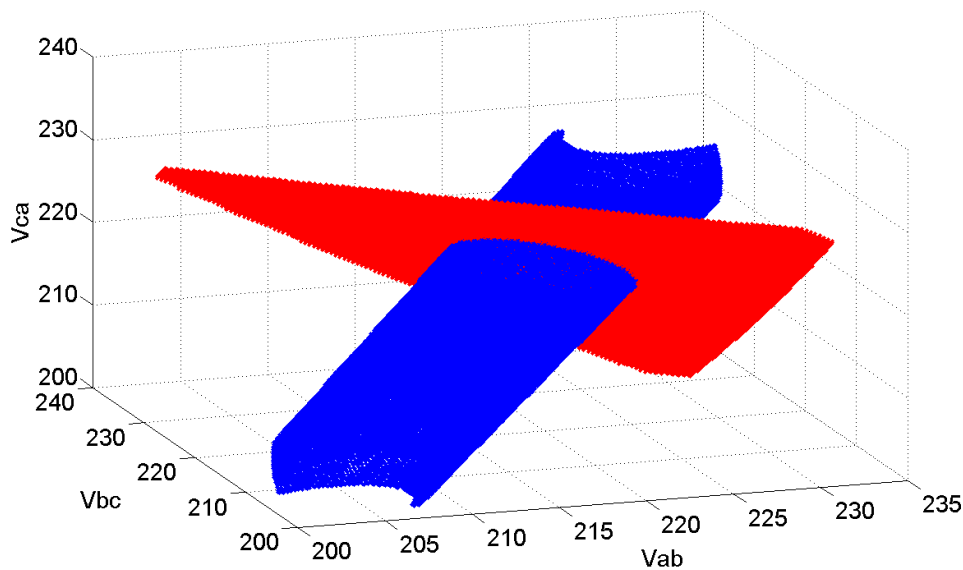


Figura 4.5: Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $V_1 = 220$ V

Da Figura 4.5, verifica-se que a variação das amplitudes das tensões para $V_1 = 220$ V culmina em um lugar geométrico correspondente a um plano inclinado – em vermelho – que transpassa transversalmente o cilindro de $VUF = 2$ %. Caso o limite das tensões reduza ou aumente, a quantidade de fasores pertencentes a esse plano reduzirá ou aumentará, respectivamente.

Ressalta-se que acima do plano vermelho, encontram-se as combinações de tensões que possuem valores de V_1 maiores que 220 V, bem como abaixo estão os conjuntos das tensões com V_1 menores que o nominal.

Sabe-se que o plano em vermelho corresponde a inúmeras combinações de tensões que resultam em um mesmo valor de V_1 . É possível que um conjunto de tensões de uma determinada região desse plano produza aquecimentos no motor significativamente diferentes das tensões referentes a outra região do mesmo plano. Dessa forma, a variação de temperatura para um mesmo valor de V_1 pode comprometer o emprego desse índice para a quantificação do desequilíbrio.

A Figura 4.6 apresenta as elevações de temperatura máximas em função de V_1 .

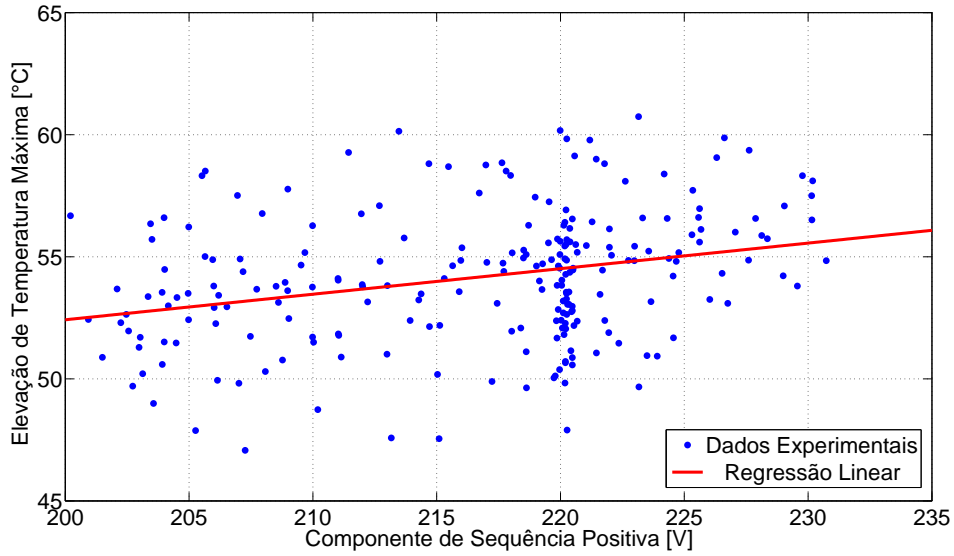


Figura 4.6: Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de V_1

A Figura 4.6 mostra que apenas três experimentos com V_1 superior ao nominal apresentam elevações de temperatura máximas menores que 50°C . Diante disso, e dos outros aquecimentos plotados, nota-se que as elevações de temperatura aumentam com o acréscimo de V_1 , apesar do espalhamento na faixa entre 50°C e 60°C .

Da aplicação da regressão linear nos dados da Figura 4.6, obtém-se a curva em vermelho, cujo comportamento é definido pela equação 4.4.

$$\Delta_{temp} = 0,1 * \alpha_{V_1} + 31 \quad (4.4)$$

Onde:

α_{V_1} é o valor de V_1 .

Da equação 4.4, verifica-se que o incremento de 1 V em V_1 resulta no acréscimo de $0,1^\circ\text{C}$ na elevação da temperatura máxima. Trata-se de uma pequena capacidade de aumento das elevações de temperaturas máximas com o acréscimo de V_1 .

Adicionalmente, a Figura 4.6 indica que um mesmo valor de V_1 reflete diferentes elevações de temperatura máximas. A fim de identificar a taxa de variação máxima da temperatura de acordo com V_1 , calcularam-se as discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para alguns valores fixos da componente de sequência positiva. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 4.6.

Da Tabela 4.6, observa-se que independente da quantidade de experimentos, as diferenças entre as maiores e as menores temperaturas máximas causam discrepâncias da ordem de 9,04 a 24,54 % da elevação nominal. Dessa forma, conclui-se que o motor pode ser submetido a temperaturas máximas que variam em quase

Tabela 4.6: Discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de V_1

V_1 [V]	Faixa considerada	Discrepância em [°C]	Total de ensaios	Porcentagem da elevação nominal (50°C)
205	entre 204 e 206 V	10,63	13	21,26
210	entre 209 e 211 V	7,53	8	15,06
215	entre 214 e 216 V	11,26	12	22,52
220	entre 219 e 221 V	12,27	67	24,54
225	entre 224 e 226 V	6,71	13	13,42
230	entre 229 e 231 V	4,52	7	9,04

12,5°C para $V_1 = 220 V$.

Para os estudos de V_1 , também são avaliadas as elevações de temperatura obtidas em cada uma das três fases. A Tabela 4.7 apresenta as elevações de temperatura por fase para condições de desequilíbrio que possuem V_1 próximo de 220 V – entre 219 e 221 V. Ressalta-se que o número de cada caso segue a ordem estabelecida na Tabela 1 do Apêndice B, na qual encontram-se descritos todos os 67 experimentos com $V_1 = 220 V$.

Da Tabela 4.7, nota-se:

1. Das diferenças entre o maior e o menor aquecimentos por situação de desequilíbrio, verifica-se uma variação entre 0,79 e 9,76°C, obtidas nos ensaios 6 e 228, respectivamente.
2. Considerando-se a temperatura $\Delta_{ca} = 47,65^\circ\text{C}$ do ensaio 185 e $\Delta_{bc} = 59,83^\circ\text{C}$ do caso 195, verifica-se que para $V_1 = 220 V$, as temperaturas entre as fases variam em até 12,18°C, o que equivale a 24,36 % da elevação nominal.
3. Todas as tensões empregadas nesses experimentos possuem pelo menos uma tensão acima do valor nominal e outra abaixo da nominal. Apesar disso, dos treze ensaios descritos, observa-se que apenas as condições 15, 21, 67 e 195 possuem as três elevações de temperatura com valores superiores ao nominal. Todos os outros ensaios apresentam pelo menos um aquecimento abaixo de 50°C e pelo menos um acima.
4. Em 91 % dos 67 desequilíbrios que culminam em $V_1 = 220 V$, a fase com maior aquecimento é aquela submetida ao maior valor de tensão. Nos casos em que isso não ocorre, por exemplo no ensaio 185, nota-se que dois fasores de tensão possuem módulos próximos entre si e causam em suas fases correspondentes os maiores aquecimentos.

Tabela 4.7: Condições de desequilíbrios que culminam em $V_1 = 220 V$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]	Δ entre fases [°C]
6	0,11	$-32,55^\circ$	220,20	$\bar{V}_{AB} = 220,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00\angle -119,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,20\angle 120,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,66$ $\Delta_{bc} = 50,16$ $\Delta_{ca} = 49,87$	0,79
15	0,30	$120,00^\circ$	219,83	$\bar{V}_{AB} = 219,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,50\angle -120,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,50\angle 119,70^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,17$ $\Delta_{bc} = 52,38$ $\Delta_{ca} = 50,80$	1,58
21	0,61	$117,68^\circ$	220,23	$\bar{V}_{AB} = 219,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 221,60\angle -120,32^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,50\angle 119,40^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,60$ $\Delta_{bc} = 53,55$ $\Delta_{ca} = 51,31$	2,24
47	1,06	$118,65^\circ$	220,19	$\bar{V}_{AB} = 219,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,50\angle -120,55^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,00\angle 118,94^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,55$ $\Delta_{bc} = 52,27$ $\Delta_{ca} = 48,59$	3,68
67	1,49	$120,00^\circ$	220,22	$\bar{V}_{AB} = 218,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,50\angle -120,75^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,60\angle 118,50^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,91$ $\Delta_{bc} = 55,50$ $\Delta_{ca} = 50,77$	4,73
79	1,77	$-133,29^\circ$	220,28	$\bar{V}_{AB} = 217,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,20\angle -118,29^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,10\angle 120,52^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,30$ $\Delta_{bc} = 51,61$ $\Delta_{ca} = 53,05$	3,75
115	2,00	$-73,64^\circ$	220,11	$\bar{V}_{AB} = 221,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,80\angle -118,64^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,20\angle 121,90^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,69$ $\Delta_{bc} = 47,89$ $\Delta_{ca} = 52,70$	4,81
185	2,32	$63,92^\circ$	220,50	$\bar{V}_{AB} = 222,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,40\angle -122,28^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,40\angle 118,72^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,46$ $\Delta_{bc} = 52,85$ $\Delta_{ca} = 47,65$	6,81
195	2,87	$119,50^\circ$	220,25	$\bar{V}_{AB} = 217,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,60\angle -121,46^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,10\angle 117,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,59$ $\Delta_{bc} = 59,83$ $\Delta_{ca} = 51,59$	8,24
222	3,01	$-104,32^\circ$	220,62	$\bar{V}_{AB} = 219,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,80\angle -117,07^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,00\angle 122,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,83$ $\Delta_{bc} = 49,45$ $\Delta_{ca} = 55,50$	6,05
228	3,32	$119,90^\circ$	220,57	$\bar{V}_{AB} = 217,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 227,90\angle -121,68^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,00\angle 116,66^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,98$ $\Delta_{bc} = 59,13$ $\Delta_{ca} = 49,37$	9,76

5. Nota-se que para $V_1 = 220 V$, com exceção dos casos 79 e 222, a diferença entre os aquecimentos nas fases aumenta com o incremento de VUF.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados da aplicação de diferentes conjuntos de tensões desequilibradas com vários valores da componente de sequência positiva, expostos em ordem crescente.

Tabela 4.8: Resultados da aplicação de tensões desequilibradas sob a ótica de V_1

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ$ C]
60	1,41	-172,02 $^\circ$	202,72	$\bar{V}_{AB} = 199,90 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 203,80 \angle -119,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,50 \angle 119,48^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,33$ $\Delta_{bc} = 49,70$ $\Delta_{ca} = 48,33$
212	2,97	119,89 $^\circ$	204,99	$\bar{V}_{AB} = 202,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 211,10 \angle -121,50^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,00 \angle 117,02^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,59$ $\Delta_{bc} = 56,22$ $\Delta_{ca} = 48,22$
33	0,96	57,25 $^\circ$	207,06	$\bar{V}_{AB} = 208,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,00 \angle -120,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,10 \angle 119,58^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,91$ $\Delta_{bc} = 54,08$ $\Delta_{ca} = 51,97$
62	1,43	118,75 $^\circ$	209,52	$\bar{V}_{AB} = 208,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 212,50 \angle -120,75^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,00 \angle 118,56^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,49$ $\Delta_{bc} = 54,66$ $\Delta_{ca} = 50,23$
196	2,88	-108,97 $^\circ$	211,02	$\bar{V}_{AB} = 209,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 207,10 \angle -117,16^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,00 \angle 121,89^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,51$ $\Delta_{bc} = 49,23$ $\Delta_{ca} = 54,04$
217	2,99	-87,09 $^\circ$	214,69	$\bar{V}_{AB} = 215,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 209,00 \angle -117,49^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,10 \angle 122,62^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,85$ $\Delta_{bc} = 51,61$ $\Delta_{ca} = 58,81$
56	1,10	90,59 $^\circ$	215,13	$\bar{V}_{AB} = 215,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,20 \angle -120,94^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 213,10 \angle 119,05^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,73$ $\Delta_{bc} = 52,19$ $\Delta_{ca} = 48,93$
129	2,02	120,08 $^\circ$	217,68	$\bar{V}_{AB} = 215,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,10 \angle -121,00^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,50 \angle 117,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,23$ $\Delta_{bc} = 54,74$ $\Delta_{ca} = 48,58$
225	3,18	119,90 $^\circ$	221,44	$\bar{V}_{AB} = 218,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,50 \angle -121,61^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,00 \angle 116,80^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,04$ $\Delta_{bc} = 59,00$ $\Delta_{ca} = 50,02$
36	0,97	148,60 $^\circ$	223,56	$\bar{V}_{AB} = 221,70 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,50 \angle -120,02^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,50 \angle 119,16^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,82$ $\Delta_{bc} = 55,23$ $\Delta_{ca} = 52,49$
179	2,18	-67,91 $^\circ$	225,67	$\bar{V}_{AB} = 227,60 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,80 \angle -118,67^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 228,70 \angle 122,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,09$ $\Delta_{bc} = 51,12$ $\Delta_{ca} = 56,12$
39	1,00	-148,66 $^\circ$	227,06	$\bar{V}_{AB} = 225,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 227,00 \angle -119,14^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 229,10 \angle 120,02^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,41$ $\Delta_{bc} = 56,01$ $\Delta_{ca} = 55,80$
17	0,44	116,82 $^\circ$	229,57	$\bar{V}_{AB} = 229,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 230,60 \angle -120,23^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 229,00 \angle 119,58^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,42$ $\Delta_{bc} = 53,80$ $\Delta_{ca} = 51,52$

Da Tabela 4.8, nota-se:

1. Nos ensaios 36, 179, 39 e 17, as tensões desequilibradas apresentam módulos acima do valor nominal, de forma tal que os valores de V_1 são maiores que o nominal. Em todos esses ensaios os aquecimentos nas três fases são maiores que o nominal.
2. Os ensaios 212, 196 e 56 contêm as três fases com módulos abaixo da tensão nominal. Em consequência, os valores de V_1 são menores que 220 V. Diferente ao que se poderia supor, verificam-se fases nas quais os aquecimentos são superiores à nominal. Os mencionados ensaios apresentam pelo menos uma das fases com aquecimento menor que o nominal.
3. Nos ensaios 33 e 62, cujas tensões de alimentação e V_1 são todos menores que 220 V, os seis aquecimentos são maiores que 50°C.
4. Com exceção do caso 39, a fase com maior aquecimento é aquela submetida ao maior valor de tensão.

Da Tabela 4.8 e suas análises, observa-se que os aquecimentos mais nocivos ao MIT ocorrem nas fases submetidas aos maiores módulos de tensões aplicadas. Ademais, verifica-se a capacidade das tensões menores que a nominal de gerarem elevações de temperatura acima de 50°C.

Na Figura 4.7 são expostos os desvios entre os aquecimentos das três fases em função de V_1 .

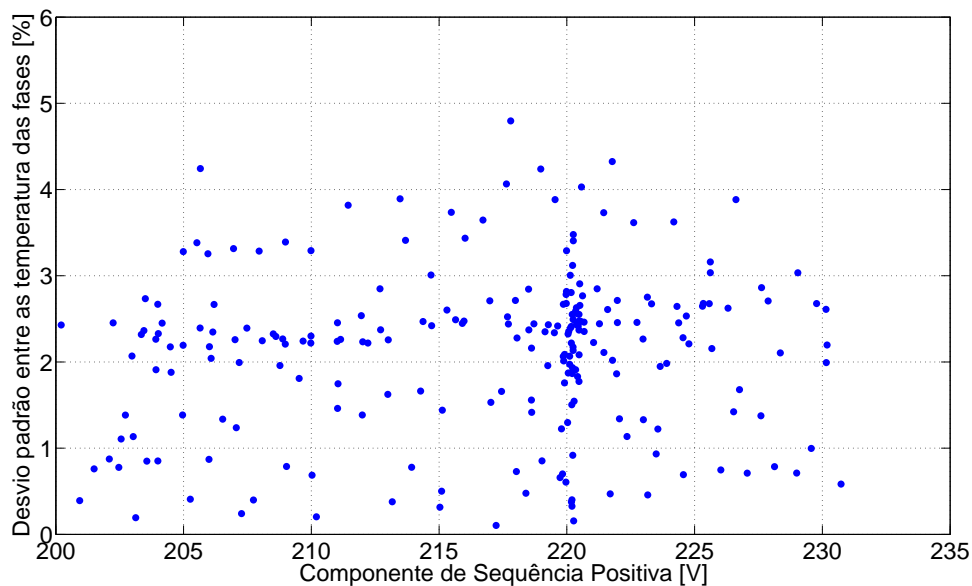


Figura 4.7: Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de V_1

Fundamentado na Figura 4.7, nota-se que os desvios padrões não seguem nenhum padrão em função de V_1 . Portanto, não existe correlação entre esses dois parâmetros.

4.5 Análise do VUF utilizado em conjunto com V_1

Além das análises baseadas nas utilizações isoladas de VUF e V_1 , foram pesquisadas as implicações no estudo da temperatura do mprego do índice VUF juntamente com a componente de sequência positiva. Os principais resultados dessas investigações são apresentados a seguir.

Na Figura 4.8, assinalada em vermelho, encontra-se a elipse correspondente ao lugar geométrico de todas as combinações possíveis de tensões de linha desequilibradas que culminam em VUF igual a 2 % e V_1 igual a 220 V.

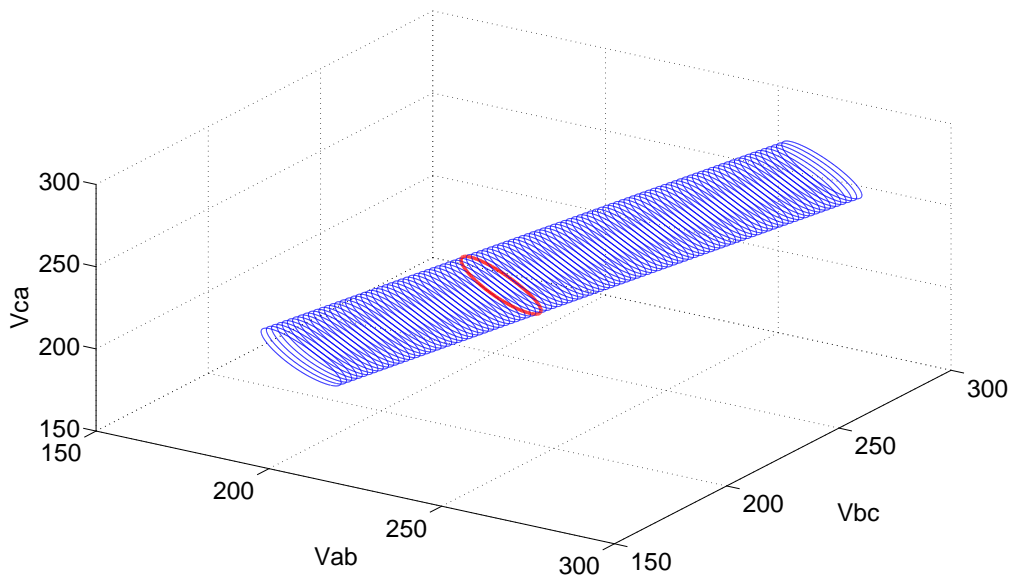


Figura 4.8: Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $VUF = 2\%$ e $V_1 = 220\text{ V}$

Além da elipse em vermelho, o cilindro da Figura 4.8 apresenta outras diferentes elipses que são definidas em função do valor de V_1 . Ressalta-se que elipses à direita à supramencionada correspondem aos maiores valores de V_1 , bem como aquelas à esquerda resultam em V_1 menores.

Qualquer uma das elipses da Figura 4.8 corresponde a inúmeras combinações de tensão que resultam em um mesmo valor de VUF e de V_1 . É possível que um conjunto de tensões de um determinado ponto da elipse produza aquecimentos no motor diferentes das tensões referentes a outro ponto da elipse. Dessa forma, a variação da temperatura para um mesmo valor de VUF e de V_1 pode comprometer

o emprego simultâneo desses índices para a quantificação do desequilíbrio.

A Figura 4.9 apresenta as elevações de temperaturas máximas em função de V_1 , apenas para as condições de desequilíbrio com VUF constante e próximo de 2 % (entre 1,9 e 2,1 %).

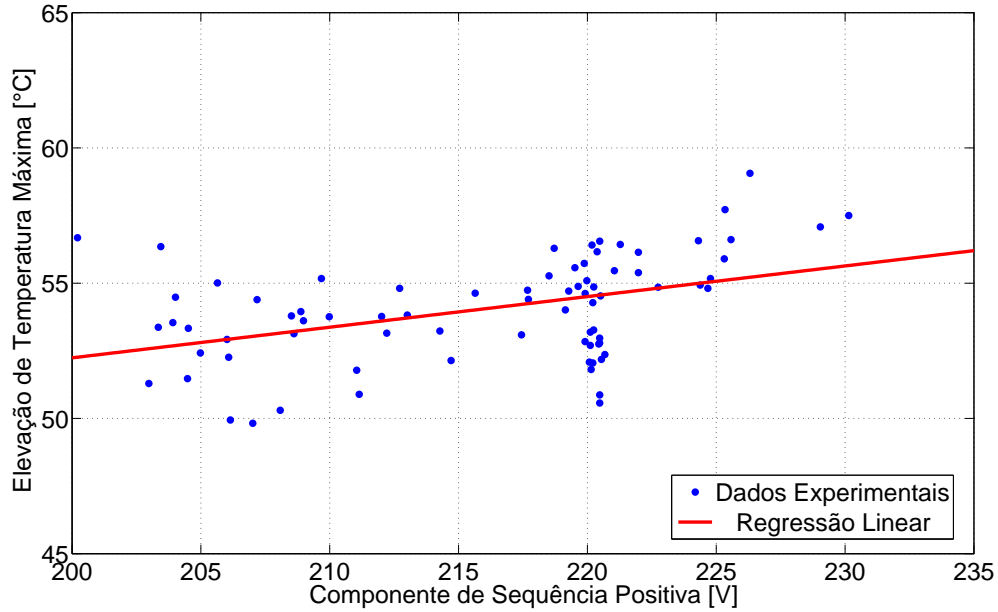


Figura 4.9: Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de V_1 , para desequilíbrios com $VUF = 2\%$

Nota-se na Figura 4.9 que, com exceção de duas condições, todos as situações de desequilíbrios apresentam elevações de temperaturas máximas acima do valor nominal, independente do valor de V_1 .

Apesar da distribuição aleatória das elevações de temperaturas em função do incremento de V_1 , calculou-se a regressão linear para os resultados dos ensaios com VUF igual a 2 %. A curva em vermelho na Figura 4.9 é resultante dessa regressão linear, cujo comportamento é definido pela equação 4.5.

$$\Delta_{desvio} = 0,11 * \alpha_{V_1} + 30 \quad (4.5)$$

Com esta curva é possível verificar uma tendência, ainda que tênue, do aumento das elevações de temperatura com o crescimento de V_1 . Observa-se, pela equação 4.5, que o incremento de 1 V em V_1 resulta no aumento de 0,11°C na elevação de temperatura máxima.

Ademais, da Figura 4.9, nota-se que um mesmo valor de V_1 corresponde a diferentes patamares de elevações de temperatura. Com vistas a identificação da taxa de variação máxima da temperatura quando VUF e V_1 são fixos, calculou-se a dis-

crepância entre a maior e a menor temperaturas máximas para $VUF = 2\%$ e alguns valores de V_1 . Os valores encontrados são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Discrepância entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de V_1 , quando VUF é igual a 2 %

V_1 [V]	Faixa considerada	Discrepância em [°C]	Total de ensaios	Porcentagem da elevação nominal (50°C)
203	entre 202 e 204 V	5,06	4	10,12
209	entre 208 e 210 V	4,87	7	9,74
213	entre 212 e 214 V	1,66	4	3,32
220	entre 219 e 221 V	5,98	27	11,96
225	entre 224 e 226 V	2,91	7	5,92

Da Tabela 4.9, verifica-se que para $VUF = 2\%$ e $V_1 = 220\text{ V}$, a diferença entre a maior e a menor temperaturas máximas causa uma discrepância igual a 11,96 % da elevação nominal.

Nesta etapa, são também analisados os aquecimentos obtidos nas três fases do motor. A Tabela 4.10 expõe as elevações de temperatura por fase para seis diferentes condições de desequilíbrio com $VUF = 2\%$ (entre 1,9 e 2,1 %) e $V_1 = 220\text{ V}$ (entre 219 e 221 V). Ressalta-se que os 27 experimentos se adequam a essas especificações encontram-se descritos na Tabela 1 presente no Apêndice B.

Da Tabela 4.10, nota-se:

1. Das diferenças entre o maior e o menor aquecimentos por situação de desequilíbrio, verifica-se uma variação entre 3,98 e 6,49°C, obtidas nos ensaios 155 e 116, respectivamente.
2. Considerando-se a temperatura $\Delta_{ca} = 45,09^\circ\text{C}$ no ensaio 139 e $\Delta_{ab} = 55,09^\circ\text{C}$ do caso 116, verifica-se que para um mesmo valor de VUF e V_1 , iguais a 2 % e 220 V, respectivamente, as fases variam até 10°C, o que equivale a 20 % da elevação nominal.
3. Nota-se que todos os ensaios apresentam fases com temperaturas acima e abaixo da nominal, e os aquecimentos possuem valores próximos da elevação nominal (50°C).
4. Todas as tensões empregadas nesses experimentos possuem pelo menos uma tensão acima da nominal e outra abaixo do valor nominal.
5. Em 63 % dos desequilíbrios com $VUF = 2\%$ e $V_1 = 220\text{ V}$, observa-se que as fases submetidas a tensões acima do valor nominal causam aquecimentos

Tabela 4.10: Desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$ e $V_1 = 220\text{ V}$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]	Δ entre fases [°C]
101	1,96	178,31°	219,91	$\bar{V}_{AB} = 215,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,20\angle -119,09^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,00\angle 118,98^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,51$ $\Delta_{bc} = 54,62$ $\Delta_{ca} = 51,95$	5,11
105	1,97	174,65°	220,25	$\bar{V}_{AB} = 215,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,80\angle -119,20^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,10\angle 118,88^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,67$ $\Delta_{bc} = 54,86$ $\Delta_{ca} = 51,73$	5,19
112	2,00	-49,57°	220,11	$\bar{V}_{AB} = 223,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,80\angle -119,34^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,60\angle 121,94^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,19$ $\Delta_{bc} = 48,66$ $\Delta_{ca} = 52,88$	4,53
116	2,00	52,69°	219,98	$\bar{V}_{AB} = 222,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 221,70\angle -121,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,60\angle 119,24^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,09$ $\Delta_{bc} = 52,68$ $\Delta_{ca} = 48,60$	6,49
119	2,01	-47,45°	220,48	$\bar{V}_{AB} = 223,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,20\angle -119,40^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,80\angle 121,94^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,87$ $\Delta_{bc} = 46,29$ $\Delta_{ca} = 50,53$	4,58
127	2,02	127,41°	220,68	$\bar{V}_{AB} = 218,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,10\angle -120,78^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,00\angle 118,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,41$ $\Delta_{bc} = 52,36$ $\Delta_{ca} = 46,75$	5,61
132	2,03	138,43°	220,08	$\bar{V}_{AB} = 216,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,30\angle -120,41^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,20\angle 118,07^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,33$ $\Delta_{bc} = 52,08$ $\Delta_{ca} = 46,87$	5,21
134	2,03	141,00°	220,14	$\bar{V}_{AB} = 216,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,30\angle -120,34^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,50\angle 118,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,94$ $\Delta_{bc} = 51,81$ $\Delta_{ca} = 46,54$	4,94
139	2,04	72,97°	220,48	$\bar{V}_{AB} = 221,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,60\angle -121,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,10\angle 118,64^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,57$ $\Delta_{bc} = 50,07$ $\Delta_{ca} = 45,09$	5,48
155	2,07	-111,70°	219,91	$\bar{V}_{AB} = 218,30\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,10\angle -117,94^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,40\angle 121,27^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,86$ $\Delta_{bc} = 49,43$ $\Delta_{ca} = 52,84$	3,98

superiores a 50°C, e as fases alimentadas com tensões menores que 220 V têm aquecimentos menores que o nominal. Essa característica é observada nas dez situações descritas.

6. Dos 27 ensaios com VUF e V_1 constantes, apenas em um deles – ensaio 139 – a fase com maior aquecimento não é aquela submetida ao maior valor de tensão.

Ainda avaliando desequilíbrios com $V_1 = 220\text{ V}$, também foram efetuadas análises semelhantes para outros valores de VUF. Nestes casos, para $VUF = 1\%$ (ensaios

29, 44 e 47) e $VUF = 3\%$ (ensaios 206, 214 e 222) as discrepâncias determinadas entre as maiores e as menores temperaturas máximas foram $2,35^\circ\text{C}$ e $4,67^\circ\text{C}$, respectivamente.

A Tabela 4.11 apresenta condições de desequilíbrio de tensão com VUF próximo de 2% e com diferentes valores de V_1 . Ressalta-se que os experimentos dessa Tabela estão expostos em ordem crescente de V_1 , e percorrem toda a faixa de variação desse parâmetro (entre 201 e 231 V).

Tabela 4.11: Desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$ e diferentes valores de V_1

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ\text{C}$]
94	1,93	$119,14^\circ$	202,98	$\bar{V}_{AB} = 201,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 206,90\angle -120,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 201,00\angle 118,07^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,13$ $\Delta_{bc} = 51,29$ $\Delta_{ca} = 46,28$
123	2,01	$-39,57^\circ$	207,18	$\bar{V}_{AB} = 210,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 203,30\angle -119,68^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 207,90\angle 121,87^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,39$ $\Delta_{bc} = 49,89$ $\Delta_{ca} = 53,78$
126	2,02	$-146,87^\circ$	211,04	$\bar{V}_{AB} = 207,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,90\angle -118,18^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 214,80\angle 120,15^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,05$ $\Delta_{bc} = 51,73$ $\Delta_{ca} = 51,78$
95	1,94	$135,18^\circ$	213,01	$\bar{V}_{AB} = 211,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,00\angle -120,09^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 211,10\angle 118,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,60$ $\Delta_{bc} = 53,82$ $\Delta_{ca} = 48,32$
129	2,02	$120,08^\circ$	217,68	$\bar{V}_{AB} = 215,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,10\angle -121,00^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,50\angle 117,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,23$ $\Delta_{bc} = 54,74$ $\Delta_{ca} = 48,58$
165	2,09	$160,73^\circ$	221,28	$\bar{V}_{AB} = 216,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,80\angle -119,64^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,20\angle 118,42^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,74$ $\Delta_{bc} = 56,43$ $\Delta_{ca} = 51,98$
133	2,03	$-50,54^\circ$	224,78	$\bar{V}_{AB} = 227,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,30\angle -119,30^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 226,40\angle 121,98^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,17$ $\Delta_{bc} = 50,30$ $\Delta_{ca} = 54,78$
152	2,07	$119,60^\circ$	226,31	$\bar{V}_{AB} = 224,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 231,00\angle -121,06^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,00\angle 117,93^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,08$ $\Delta_{bc} = 59,06$ $\Delta_{ca} = 52,70$
102	1,96	$112,18^\circ$	230,14	$\bar{V}_{AB} = 228,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 234,60\angle -121,20^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,40\angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,16$ $\Delta_{bc} = 57,50$ $\Delta_{ca} = 51,11$

Da Tabela 4.11, verifica-se:

1. Nos ensaios 133, 152 e 102, as tensões desequilibradas e V_1 apresentam módulos acima do valor nominal. Em todos esses ensaios, os aquecimentos nas três fases

são maiores que o nominal.

2. Os ensaios 94, 123, 126 e 95 contêm as três fases e V_1 com módulos abaixo da tensão nominal. Para esses casos, observa-se que pelo menos duas fases possuem aquecimentos maiores que o nominal.
3. A fase com maior aquecimento é aquela submetida ao maior valor de tensão.

Das análises a cerca da utilização conjunta de VUF e V_1 , verifica-se que para valores fixos desses dois parâmetros, as diferenças das tensões de alimentação são traduzidas e observadas em θ_u , que apresenta valor distinto em cada um dos experimentos analisados.

A Figura 4.10 apresenta os desvios padrões entre as elevações de temperatura das três fases em função de V_1 , quando VUF é limitado entre 1,9 a 2,1 %.

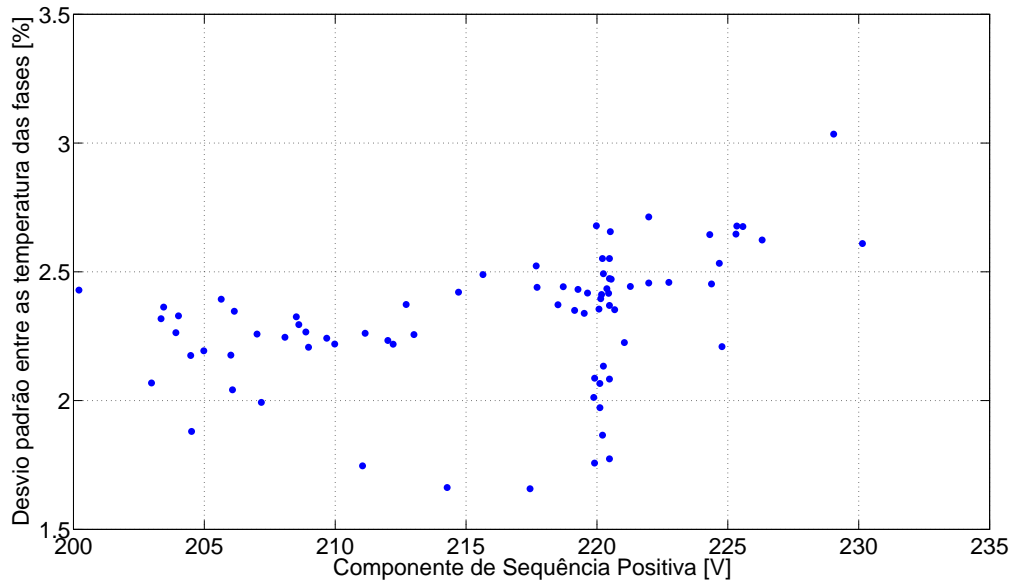


Figura 4.10: Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de V_1 para desequilíbrios com $VUF = 2\%$

Da Figura 4.10, nota-se que a determinação de $VUF = 2\%$ e $V_1 = 220\text{ V}$ faz com que a faixa de variação do desvio padrão seja igual a 1,6 %. Isso significa que, nessas condições, os desequilíbrios de tensão podem causar uma diferença máxima entre os aquecimentos nas fases igual a $6,5^\circ\text{C}$ – conforme ensaio 116 da Tabela 4.10.

Alguns trabalhos como Wang (2001), Gnacinski (2008a) e Gnacinski (2008b) sustentam que as correntes nas três fases variam senoidalmente em função de θ_u quando VUF e V_1 são constantes. Dessa forma, também possuem comportamento senoidal em função do ângulo de CVUF todos os parâmetros relacionados com a corrente, a saber: perdas e elevações de temperatura no MIT.

A Figura 4.11 apresenta as elevações de temperatura nas três fases em função de θ_u para as condições de desequilíbrios de tensão com $VUF = 2\%$ e $V_1 = 220\text{ V}$. Na Figura 4.11 também são expostas as curvas para as elevações de temperatura nas três fases definidas pelo método dos mínimos quadrados. Ressalta-se que, fundamentado nesse método, é possível ajustar e determinar a curva que melhor se adequa a um determinado conjunto de dados.

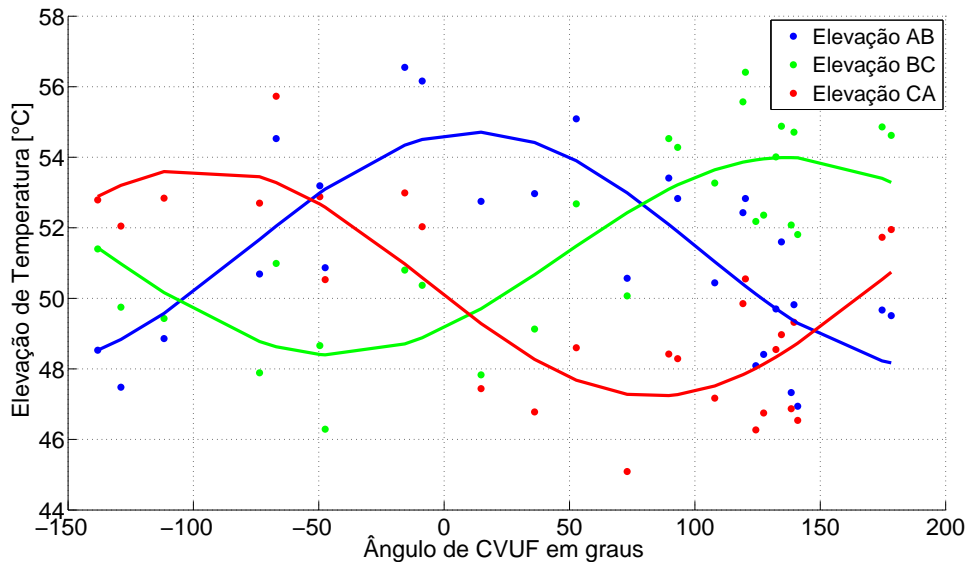


Figura 4.11: Gráfico das elevações de temperatura nas três fases em função de θ_u para desequilíbrios com $VUF = 2\%$ e $V_1 = 220\text{ V}$

Na Figura 4.11, as senoides em azul, verde e vermelho correspondem as curvas calculadas por meio do método dos mínimos quadrados para as elevações de temperatura nas fases A, B e C, respectivamente. Para cada uma das fases, calcularam-se também os erros referentes a distância entre os dados experimentais e as senoides propostas. Os maiores erros encontrados entre cada um das senoides e seus respectivos resultados experimentais é da ordem de $2,5^\circ\text{C}$, o que significa que as curvas calculadas apresentam ajuste aceitável.

Baseado na Figura 4.11 e no comportamento senoidal das temperaturas em função de θ_u , nota-se:

1. Uma vez que VUF e V_1 são definidos, a determinação do valor de θ_u implica no conhecimento preciso da elevação de temperatura em cada uma das fases.
2. As elevações de temperatura em cada uma das fases apresentam comportamentos variantes em função de θ_u . Ressalta-se que para as fases A, B e C, as discrepâncias entre os maiores e os menores aquecimentos são de $9,61^\circ\text{C}$, $10,12^\circ\text{C}$

e $10,64^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Essas variações possuem valores próximos entre si, e da ordem de 10°C .

3. As três senoides estão deslocadas em relação ao eixo referente a elevação de temperatura nominal. Essas curvas encontram-se acima do eixo de referência de forma tal que a maioria dos aquecimentos nas fases são superiores ao valor nominal (50°C).
4. As senoides das fases A, B e C estão defasadas entre si em torno de 120° . Dessa forma, não é possível que as três fases tenham o aquecimento máximo para uma mesma condição de desequilíbrio.
5. Nota-se que as três senoides analisadas obedecem a sequência de fases positiva (ou ABC), que é a mesma sequência utilizada na alimentação de todos os ensaios realizados no presente trabalho.
6. Em função de θ_u , é possível verificar as condições de desequilíbrio que são mais ou menos prejudiciais ao motor. Por exemplo, para $\theta_u = -50^{\circ}$ e $\theta_u = 79^{\circ}$ os desequilíbrios possuem duas fases com aquecimentos acima do nominal, e a outra fase apresenta a menor elevação de temperatura possível. Diferentemente, para $\theta_u = 10^{\circ}$ e $\theta_u = 148^{\circ}$, os desequilíbrios causam aquecimentos menores que o nominal em duas das fases, e geram a maior elevação de temperatura possível na fase remanescente.

4.6 Análise de θ_u

Assim como VUF e V_1 foram analisados isoladamente, têm-se a seguir os resultados da investigação da eficácia do emprego de θ_u na quantificação do desequilíbrio no que diz respeito a temperatura do MIT.

A Figura 4.12 corresponde ao lugar geométrico de todas as combinações possíveis de tensões de linha desequilibradas que culminam em θ_u igual a 120° .

Da Figura 4.12, verifica-se que a variação das amplitudes das tensões para $\theta_u = 120^{\circ}$ culmina em lugar geométrico correspondente a semiplano inclinado – assinalado em vermelho – que transpassa longitudinalmente o cilindro de $VUF = 2\%$ e cuja origem é o eixo correspondente ao lugar geométrico de $VUF = 0\%$ – em preto.

Nota-se que a quantidade de fasores pertencentes ao plano vermelho, da Figura 4.12, reduzirá ou aumentará, caso o limite das tensões desequilibradas reduza ou aumente, respectivamente.

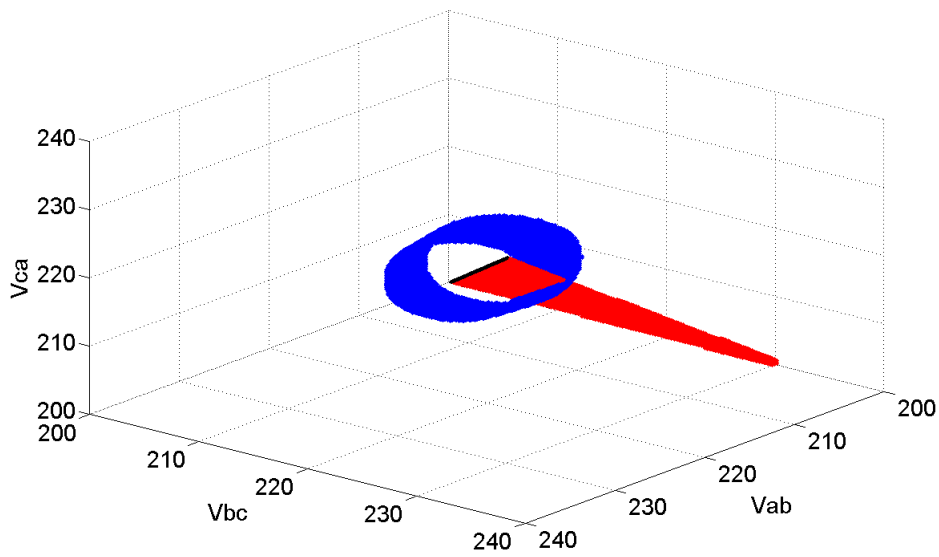


Figura 4.12: Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para diferentes valores de θ_u

Uma vez que o semiplano vermelho na Figura 4.2 apresenta inúmeras combinações de tensões que resultam em um mesmo θ_u , é possível que um conjunto de tensões de uma determinada região desse semiplano cause aquecimentos no motor completamente distintos de outras tensões pertencentes a outra região do mesmo semiplano. Assim, a variação da temperatura para um mesmo valor de θ_u pode comprometer o emprego desse índice para a quantificação do desequilíbrio.

A Figura 4.13 apresenta as elevações de temperatura máximas em função de θ_u .

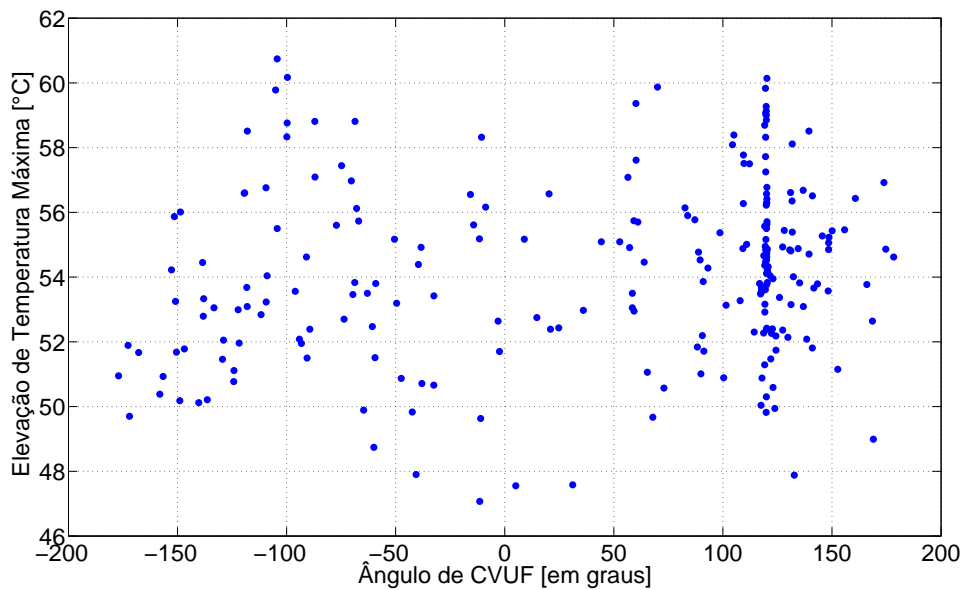


Figura 4.13: Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de θ_u

Da Figura 4.13, ressaltam-se dois aspectos: o comportamento aleatório das elevações de temperatura máxima em função de θ_u e a existência de inúmeros valores de temperatura para um mesmo valor do mencionado índice.

Afim de se determinar a taxa de variação máxima da temperatura de acordo com θ_u , calcularam-se as discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas deste índice. Os resultados dessas análises são expostos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de θ_u

θ_u	Faixa considerada	Discrepância em [°C]	Total de ensaios	Porcentagem da elevação nominal (50°C)
-120°	entre -122° e -118°	6,65	6	13,30
-90°	entre -92° e -88°	3,12	3	6,24
-60°	entre -62° e -58°	5,06	4	10,12
60°	entre 58° e 62°	6,41	7	12,82
90°	entre 88° e 92°	3,76	7	7,52
120°	entre 119° e 121°	10,32	47	20,64

Da Tabela 4.12, observa-se que independente da quantidade de ensaios, as diferenças entre as maiores e as menores temperaturas implicam em discrepâncias da ordem de 6,24 a 20,64 % da elevação nominal. Isso significa, por exemplo, para $\theta_u = 120^\circ$ a possibilidade de temperaturas que diferem entre si em quase 11°C.

A Tabela 4.13 apresenta as elevações de temperatura por fase para condições de desequilíbrio com $\theta_u = 120^\circ$ (na verdade, entre 119° e 121°). Na Tabela 1 do Apêndice B, encontram-se descritos todos os 47 experimentos com $\theta_u = 120^\circ$ observados neste estudo.

Da Tabela 4.13, nota-se:

1. Das diferenças entre o maior e o menor aquecimentos por situação de desequilíbrio, verifica-se uma variação entre 1,58 e 9,86°C, obtidas nos ensaios 15 e 231, respectivamente.
2. Se tomada a temperatura $\Delta_{ca} = 47,62^\circ\text{C}$ no ensaio 96 e $\Delta_{bc} = 60,14^\circ\text{C}$ do caso 229, verifica-se que para um mesmo valor de θ_u , neste caso igual a 120°, as fases variam em até 12,52°C, o que equivale a 25,04 % da elevação nominal.
3. Apesar de todas as condições expostas possuírem $\theta_u = 120^\circ$, em alguns casos, as tensões de alimentação apresentam características com diferenças expressivas. Observam-se desequilíbrios com tensões acima e abaixo de 220 V cujos aquecimentos nas fases são superiores e inferiores ao nominal. Em outros casos, as três tensões de alimentação possuem valores abaixo do nominal. Para

Tabela 4.13: Condições de desequilíbrios que culminam em $\theta_u = 120^\circ$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]	Δ entre fases [°C]
15	0,30	120,00°	219,83	$\bar{V}_{AB} = 219,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,50\angle -120,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,50\angle 119,70^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,17$ $\Delta_{bc} = 52,38$ $\Delta_{ca} = 50,80$	1,58
30	0,91	120,73°	226,53	$\bar{V}_{AB} = 225,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,60\angle -120,43^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 225,50\angle 119,10^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,01$ $\Delta_{bc} = 54,32$ $\Delta_{ca} = 50,87$	3,45
80	1,77	120,38°	224,55	$\bar{V}_{AB} = 222,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,50\angle -120,87^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,60\angle 118,22^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,04$ $\Delta_{bc} = 54,21$ $\Delta_{ca} = 48,64$	5,57
88	1,89	120,68°	211,01	$\bar{V}_{AB} = 209,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,00\angle -120,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 209,10\angle 118,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,79$ $\Delta_{bc} = 54,11$ $\Delta_{ca} = 48,67$	5,44
96	1,95	119,24°	206,01	$\bar{V}_{AB} = 204,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,00\angle -121,00^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,00\angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,77$ $\Delta_{bc} = 52,92$ $\Delta_{ca} = 47,62$	5,3
180	2,18	120,00°	215,31	$\bar{V}_{AB} = 213,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,10\angle -121,09^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 213,00\angle 117,82^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,58$ $\Delta_{bc} = 54,11$ $\Delta_{ca} = 47,75$	6,36
186	2,34	119,43°	218,50	$\bar{V}_{AB} = 216,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,60\angle -121,22^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,00\angle 117,64^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,94$ $\Delta_{bc} = 54,95$ $\Delta_{ca} = 48,01$	6,94
188	2,49	120,20°	203,50	$\bar{V}_{AB} = 201,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,60\angle -121,23^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 201,00\angle 117,51^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,64$ $\Delta_{bc} = 55,71$ $\Delta_{ca} = 49,07$	6,64
229	3,34	120,15°	213,47	$\bar{V}_{AB} = 210,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,60\angle -121,67^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,00\angle 116,63^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,33$ $\Delta_{bc} = 60,14$ $\Delta_{ca} = 50,69$	9,45
231	3,43	119,90°	217,63	$\bar{V}_{AB} = 214,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,10\angle -121,74^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 214,00\angle 116,54^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,73$ $\Delta_{bc} = 58,85$ $\Delta_{ca} = 48,99$	9,86

essas condições, nota-se que pelo menos uma das fases possui aquecimento inferior ao nominal. Verificam-se ainda desequilíbrios nos quais as três tensões são maiores que 220 V, cujos aquecimentos são superiores a 50°C.

4. Em todas as situações expostas, a fase com maior aquecimento é aquela submetida ao maior valor de tensão.

A Tabela 4.14 descreve, em ordem crescente de θ_u , os resultados de determinados desequilíbrios de tensão.

Tabela 4.14: Resultados da aplicação de tensões desequilibradas sob a ótica de θ_u

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ$ C]
28	0,89	$-177,03^\circ$	223,50	$\bar{V}_{AB} = 221,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,40 \angle -119,53^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,60 \angle 119,60^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,69$ $\Delta_{bc} = 50,95$ $\Delta_{ca} = 49,52$
203	2,94	$-119,21^\circ$	203,99	$\bar{V}_{AB} = 201,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 201,00 \angle -117,05^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,00 \angle 121,52^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,12$ $\Delta_{bc} = 52,61$ $\Delta_{ca} = 56,60$
198	2,89	$-109,45^\circ$	211,96	$\bar{V}_{AB} = 210,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,00 \angle -117,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,00 \angle 121,86^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,00$ $\Delta_{bc} = 51,86$ $\Delta_{ca} = 56,76$
191	2,75	$-32,49^\circ$	206,19	$\bar{V}_{AB} = 211,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 201,20 \angle -119,91^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 206,50 \angle 122,40^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,42$ $\Delta_{bc} = 47,25$ $\Delta_{ca} = 52,19$
34	0,96	$-2,41^\circ$	203,03	$\bar{V}_{AB} = 205,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 202,00 \angle -120,43^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,10 \angle 120,52^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,70$ $\Delta_{bc} = 49,12$ $\Delta_{ca} = 49,52$
83	1,81	$44,28^\circ$	218,62	$\bar{V}_{AB} = 221,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,60 \angle -121,71^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 214,80 \angle 119,56^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,09$ $\Delta_{bc} = 52,34$ $\Delta_{ca} = 49,80$
209	2,96	$70,03^\circ$	226,62	$\bar{V}_{AB} = 229,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 231,00 \angle -122,85^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,00 \angle 118,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 59,87$ $\Delta_{bc} = 58,57$ $\Delta_{ca} = 51,06$
26	0,79	$168,95^\circ$	203,56	$\bar{V}_{AB} = 202,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 204,60 \angle -119,75^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,10 \angle 119,47^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,08$ $\Delta_{bc} = 48,99$ $\Delta_{ca} = 47,32$

Da Tabela 4.14, observa-se que os ensaios nos quais as três tensões de alimentação e V_1 são superiores ao valor nominal, as fases possuem aquecimentos maiores que 50°C . Verificam-se nos ensaios cujas tensões de alimentação e V_1 são todos menores que 220 V, que os aquecimentos são maiores que o nominal em pelo menos duas fases. Ademais, com exceção do caso 209, observa-se que a fase com maior aquecimento é aquela submetida ao maior valor de tensão.

Das avaliações realizadas a cerca do emprego isolado de θ_u , verifica-se que a utilização única desse parâmetro não contribui para o conhecimento de nenhuma das características das tensões de alimentação.

Na Figura 4.14 são exibidos os desvios padrões entre as elevações de temperatura das três fases.

Baseado na Figura 4.14, nota-se que os desvios não seguem nenhum padrão em função de θ_u . Portanto, não existe correlação entre esses dois parâmetros.

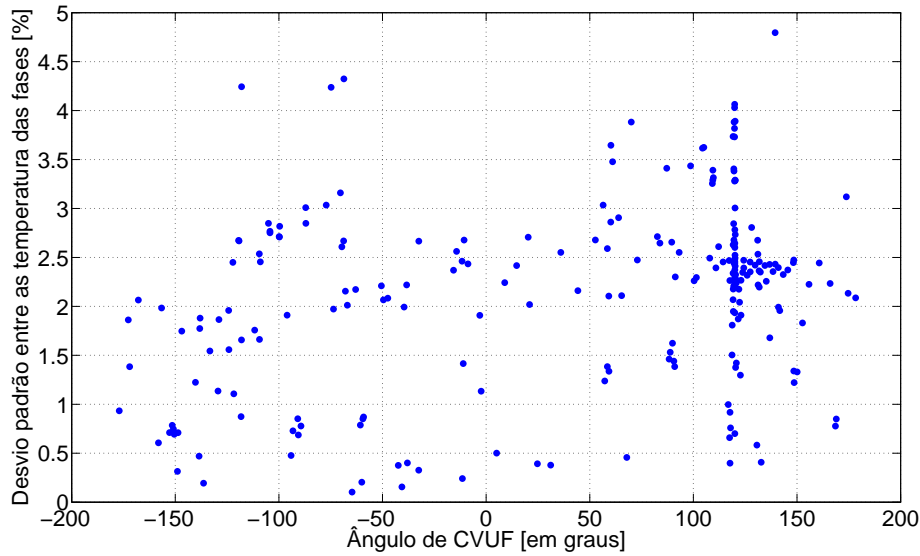


Figura 4.14: Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de θ_u

4.7 Análise do VUF utilizado em conjunto com θ_u

Além das análises baseadas na utilização isolada de VUF e θ_u , foram pesquisadas as implicações da utilização do índice VUF juntamente com o ângulo de CVUF no estudo da temperatura do MIT. Os principais resultados dessas investigações são apresentados a seguir.

Na Figura 4.15, a reta destacada em vermelho correspondente ao lugar geométrico de todas as combinações possíveis de tensões de linha desequilibradas que culminam em VUF igual a 2 % e θ_u igual a 120° .

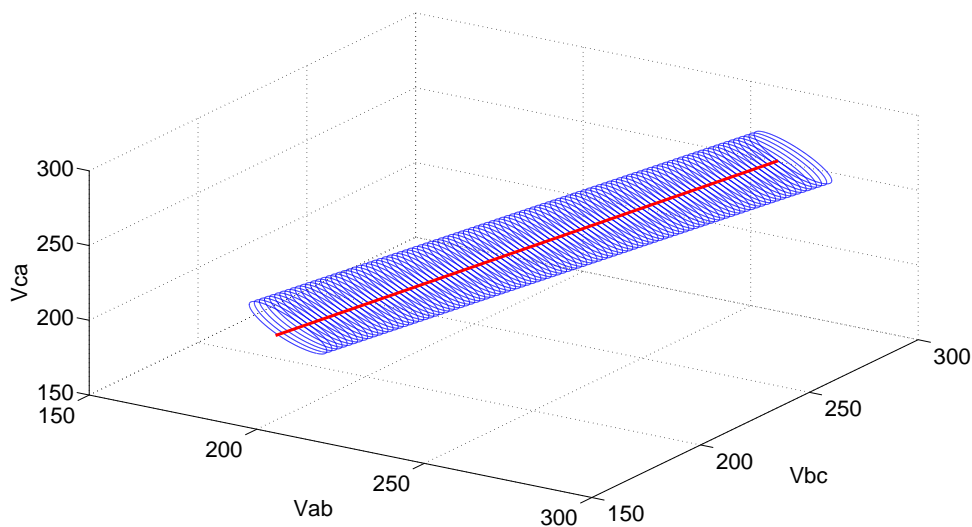


Figura 4.15: Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $VUF = 2\%$ e $\theta_u = 120^\circ$

A variação de θ_u no intervalo entre 0° e 360° gera infinitas retas, todas elas paralelas a em vermelho. A junção dessas retas constitui a superfície do cilindro correspondente ao lugar geométrico de $VUF = 2\%$.

Qualquer uma das retas que compõem o cilindro da Figura 4.15, possui inúmeras combinações de tensão que resultam em um mesmo valor de VUF e de θ_u . Dessa forma, a variação da temperatura para um mesmo valor de VUF e de θ_u pode comprometer o emprego simultâneo desses índices para a quantificação do desequilíbrio.

A Figura 4.16 apresenta as máximas elevações de temperaturas em função de θ_u , apenas para as condições de desequilíbrio com VUF constante e próximo de 2% (entre 1,9 e 2,1%).

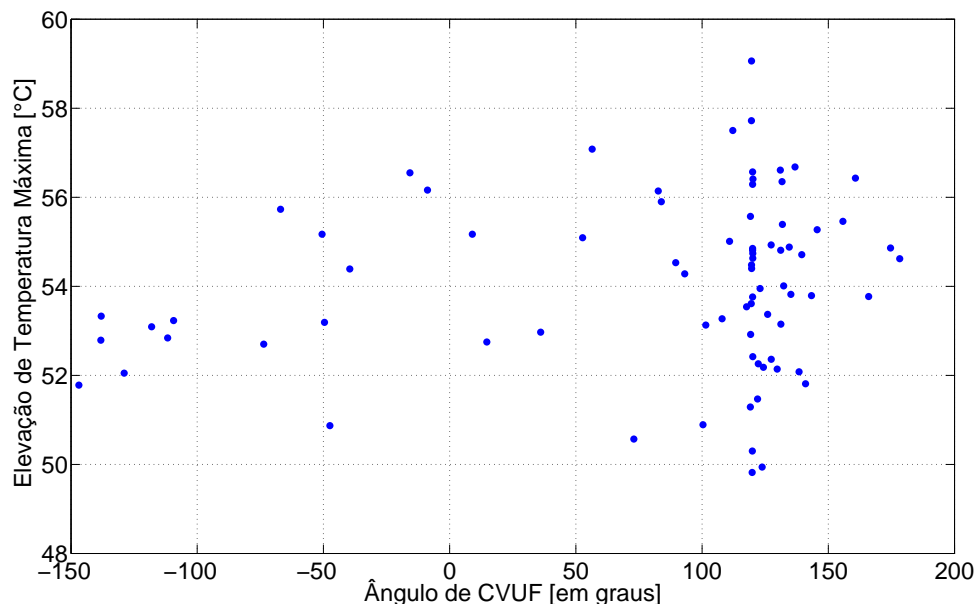


Figura 4.16: Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de θ_u , para desequilíbrios com $VUF = 2\%$

Nota-se na Figura 4.16 que, com exceção de duas condições, todas as situações de desequilíbrios apresentam elevações de temperaturas máximas acima do valor nominal, independente do valor de θ_u .

Ademais, da Figura 4.16 destacam-se dois aspectos: o comportamento aleatório das elevações de temperatura máxima em função de θ_u e a existência de inúmeros valores de temperatura para um mesmo valor do mencionado índice.

Afim de se determinar a taxa de variação máxima da temperatura de acordo com θ_u , calcularam-se as discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para alguns valores de θ_u quando $VUF = 2\%$. Os resultados dessas análises são expostos na Tabela 4.15.

Da Tabela 4.15, verifica-se que para $VUF = 2\%$ e $\theta_u = 120^\circ$ a diferença entre

Tabela 4.15: Discrepância entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de θ_u , quando $VUF = 2\%$

θ_u	Faixa considerada	Discrepância em [°C]	Total de ensaios	Porcentagem da elevação nominal (50°C)
-49°	entre -51° e -47°	4,30	3	8,60
12°	entre 8° e 16°	2,42	2	4,84
54°	entre 51° e 57°	1,99	2	3,98
120°	entre 119° e 121°	9,24	19	18,48
164°	entre 160° e 168°	2,66	2	5,32

a maior e a menor temperaturas máximas causa uma discrepância igual a 18,48 % da elevação nominal.

A Tabela 4.16 expõe as elevações de temperatura por fase para oito diferentes condições de desequilíbrio onde têm-se $VUF = 2\%$ (entre 1,9 e 2,1 %) e $\theta_u = 120^\circ$ (entre 119° e 121°). Ressalta-se que os 19 experimentos que se adequam a essas especificações encontram-se descritos na Tabela 1 presente no Apêndice B.

Da Tabela 4.16, nota-se:

1. Das diferenças entre o maior e o menor aquecimentos por situação de desequilíbrio, verifica-se uma variação entre 5,01 e 6,53°C, obtidas nos ensaios 93 e 157, respectivamente.
2. Considerando-se a temperatura $\Delta_{ca} = 44,83^\circ\text{C}$ no ensaio 98 e $\Delta_{bc} = 57,72^\circ\text{C}$ do caso 157, verifica-se que para um mesmo valor de VUF e θ_u , neste caso iguais a 2 % e 120°, respectivamente, as fases variam até 12,89°C, o que equivale a 25,78 % da elevação nominal.
3. Apesar de todas as condições expostas possuírem $VUF = 2\%$ e $\theta_u = 120^\circ$, em alguns casos, as tensões de alimentação apresentam características com diferenças expressivas. Observam-se desequilíbrios com tensões acima e abaixo de 220 V cujos aquecimentos nas fases são superiores e inferiores ao nominal. Em outros casos, as três tensões de alimentação possuem valores abaixo do nominal. Para essas condições, nota-se que pelo menos uma das fases possui aquecimento inferior ao nominal. Verificam-se ainda desequilíbrios nos quais as três tensões são maiores que 220 V, cujos aquecimentos são superiores a 50°C.
4. Em todas as situações expostas, a fase com maior aquecimento é aquela submetida ao maior valor de tensão.

Tabela 4.16: Desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$ e $\theta_u = 120^\circ$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]	Δ entre fases [°C]
93	1,93	120,00°	209,98	$\bar{V}_{AB} = 208,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 214,00\angle -120,97^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,00\angle 118,06^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,45$ $\Delta_{bc} = 53,76$ $\Delta_{ca} = 48,37$	5,01
98	1,95	119,91°	208,08	$\bar{V}_{AB} = 206,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 212,10\angle -120,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 206,10\angle 118,03^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,06$ $\Delta_{bc} = 50,30$ $\Delta_{ca} = 44,83$	5,47
99	1,95	120,09°	204,98	$\bar{V}_{AB} = 203,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 209,00\angle -120,97^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 203,00\angle 118,05^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,17$ $\Delta_{bc} = 52,42$ $\Delta_{ca} = 47,09$	5,49
100	1,96	120,00°	222,75	$\bar{V}_{AB} = 220,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 227,10\angle -120,98^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,60\angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,31$ $\Delta_{bc} = 54,85$ $\Delta_{ca} = 48,86$	5,99
106	1,98	120,00°	218,71	$\bar{V}_{AB} = 216,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,00\angle -121,00^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,60\angle 118,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,87$ $\Delta_{bc} = 56,29$ $\Delta_{ca} = 50,33$	5,96
125	2,02	120,00°	212,71	$\bar{V}_{AB} = 210,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,00\angle -121,01^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,60\angle 117,98^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,58$ $\Delta_{bc} = 54,81$ $\Delta_{ca} = 49,01$	5,8
157	2,08	119,56°	225,34	$\bar{V}_{AB} = 223,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 230,00\angle -121,05^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,00\angle 117,91^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,92$ $\Delta_{bc} = 57,72$ $\Delta_{ca} = 51,19$	6,53
160	2,08	120,00°	224,31	$\bar{V}_{AB} = 222,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,00\angle -121,04^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,00\angle 117,92^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,75$ $\Delta_{bc} = 56,57$ $\Delta_{ca} = 50,13$	6,44

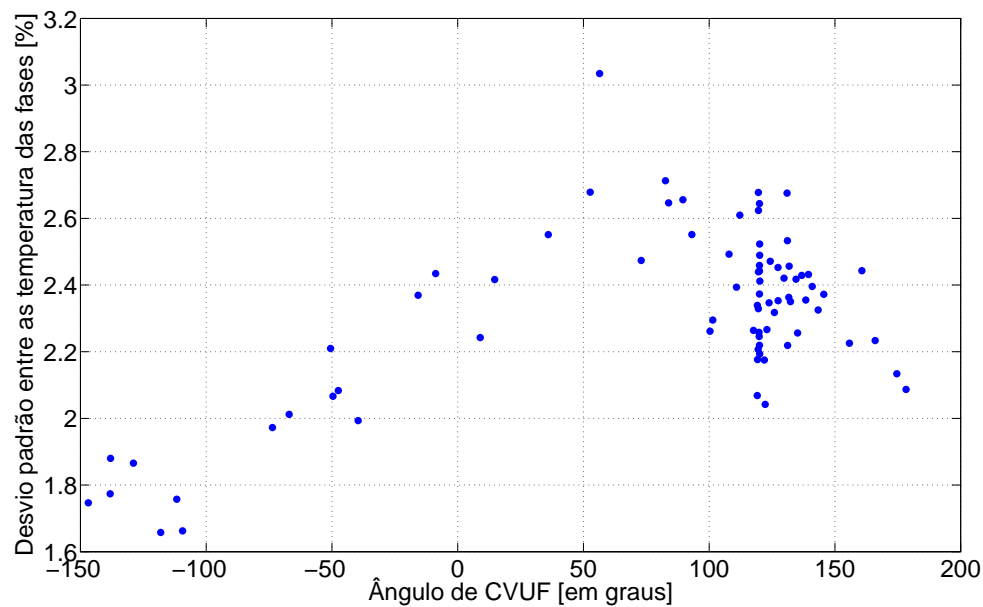
A Tabela 4.17 apresenta condições de desequilíbrio de tensão com VUF próximo de 2% e com diferentes valores de θ_u . Ressalta-se que os experimentos dessa Tabela estão dispostos em ordem crescente de θ_u , e percorrem toda a faixa de variação desse parâmetro (entre -150° e 210°).

Da Tabela 4.17, observa-se que os ensaios nos quais as três tensões de alimentação e V_1 são superiores ao valor nominal, as fases possuem aquecimentos maiores que 50°C . Verificam-se nos ensaios cujas tensões de alimentação e V_1 são todos menores que 220 V, que os aquecimentos são maiores que o nominal em pelo menos duas fases. Ademais, observa-se que a fase com maior aquecimento é aquela submetida ao maior valor de tensão.

A Figura 4.17 apresenta os desvios padrões entre as elevações de temperatura das três fases em função de θ_u , quando VUF é limitado entre 1,9 a 2,1%.

Tabela 4.17: Desequilíbrios que culminam em $VUF = 2\%$ e diferentes valores de θ_u

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
148	2,05	-138,04°	204,51	$\bar{V}_{AB} = 201,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 203,70 \angle -118,04^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,50 \angle 120,45^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,91$ $\Delta_{bc} = 52,24$ $\Delta_{ca} = 53,33$
140	2,04	14,71°	220,44	$\bar{V}_{AB} = 224,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,30 \angle -121,42^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,30 \angle 120,55^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,75$ $\Delta_{bc} = 47,83$ $\Delta_{ca} = 47,44$
161	2,08	56,44°	229,04	$\bar{V}_{AB} = 231,70 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 231,20 \angle -122,05^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,30 \angle 119,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 57,08$ $\Delta_{bc} = 55,04$ $\Delta_{ca} = 49,87$
128	2,02	117,62°	203,91	$\bar{V}_{AB} = 202,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,00 \angle -121,11^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 201,80 \angle 117,97^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,42$ $\Delta_{bc} = 53,54$ $\Delta_{ca} = 48,01$
108	1,98	127,38°	224,38	$\bar{V}_{AB} = 221,70 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,80 \angle -120,77^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,70 \angle 118,03^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,57$ $\Delta_{bc} = 54,93$ $\Delta_{ca} = 49,17$
91	1,92	155,78°	221,05	$\bar{V}_{AB} = 217,20 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,50 \angle -119,82^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,50 \angle 118,45^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,34$ $\Delta_{bc} = 55,46$ $\Delta_{ca} = 51,28$

Figura 4.17: Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de θ_u para desequilíbrios com $VUF = 2\%$

Da Figura 4.17, nota-se que a determinação de $VUF = 2\%$ e $\theta_u = 120^\circ$ faz com que a faixa de variação do desvio padrão seja igual a 1,6%. Isso significa que, nessas condições, os desequilíbrios de tensão podem causar uma diferença máxima entre os

aquecimentos nas fases igual a $6,44^\circ\text{C}$ – conforme ensaio 157 da Tabela 4.16.

4.8 Análise de V_1 utilizado em conjunto com θ_u

Além das análises baseadas na utilização isolada de V_1 e θ_u , foram pesquisadas as implicações da utilização do índice V_1 juntamente com o ângulo de CVUF no estudo da temperatura do MIT. Os principais resultados dessas investigações são apresentados a seguir.

Na Figura 4.18 a reta em vermelho correspondente ao lugar geométrico de todas as combinações possíveis de tensões de linha desequilibradas que culminam em V_1 igual a 220 V e θ_u igual a 120° . Essa reta vermelha corresponde a intercessão do plano azul, correspondente a $V_1 = 220\text{ V}$, e o semiplano verde, referente a $\theta_u = 120^\circ$.

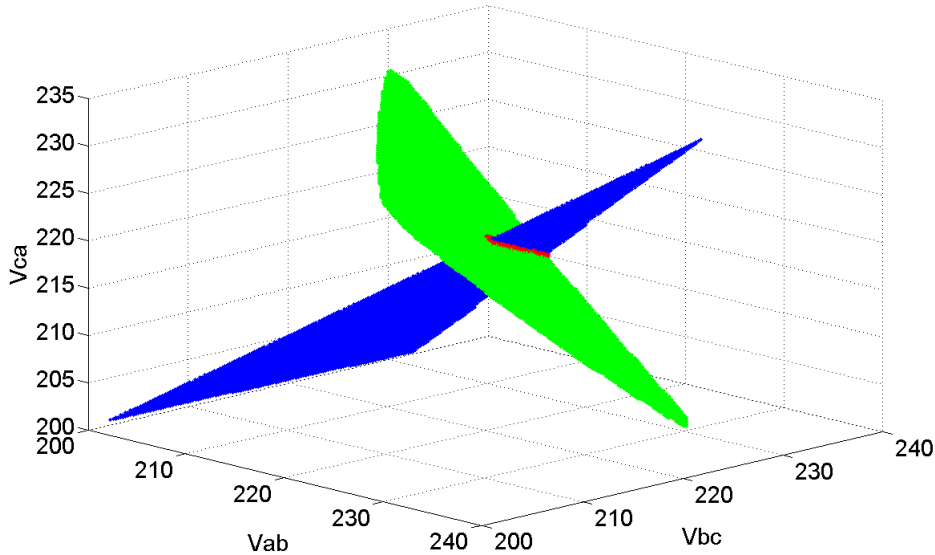


Figura 4.18: Lugar geométrico das amplitudes das tensões de linha para $V_1 = 220\text{ V}$ e $\theta_u = 120^\circ$

A variação de θ_u no intervalo entre 0° e 360° gera infinitas retas, todas elas interceptam o plano azul de $V_1 = 220\text{ V}$.

Qualquer uma das retas que intercepta os planos azul e verde da Figura 4.18, possui inúmeras combinações de tensões que resultam em um mesmo valor de V_1 e θ_u . Dessa forma, a variação da temperatura para um mesmo valor de V_1 e de θ_u pode comprometer o emprego simultâneo desses índices para a quantificação do desequilíbrio.

A Figura 4.19 apresenta as máximas elevações de temperaturas em função de θ_u , apenas para as condições de desequilíbrio com V_1 constante e próximo de 220 V (entre 219 e 221 V).

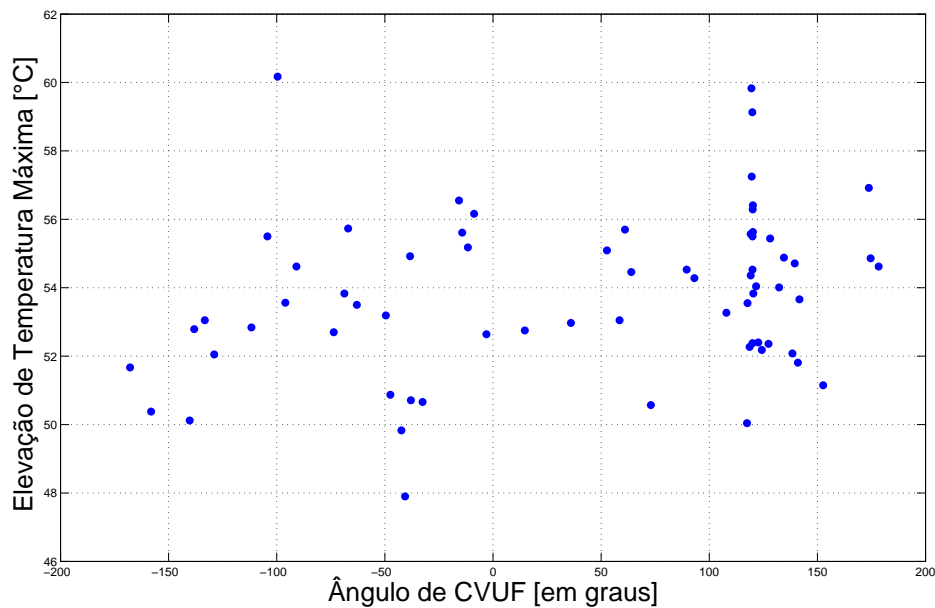


Figura 4.19: Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de θ_u , para desequilíbrios com $V_1 = 220 V$

Nota-se na Figura 4.19 que, com exceção de duas condições, todas as situações de desequilíbrios apresentam elevações de temperaturas máximas acima do valor nominal, independente do valor de θ_u .

Ademais, da Figura 4.19 destacam-se dois aspectos: o comportamento aleatório das elevações de temperatura máxima em função de θ_u e a existência de inúmeros valores de temperatura para um mesmo valor do mencionado índice.

Afim de se determinar a taxa de variação máxima da temperatura de acordo com θ_u , calcularam-se as discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas para alguns valores de θ_u quando $V_1 = 220 V$. Os resultados dessas análises são expostos na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Discrepância entre as maiores e as menores temperaturas máximas para diferentes valores de θ_u , quando $V_1 = 220 V$

θ_u	Faixa considerada	Discrepância em [°C]	Total de ensaios	Porcentagem da elevação nominal (50°C)
-100°	entre -105° e -95°	6,61	3	13,22
-40°	entre -43° e -37°	7,02	4	14,04
60°	entre 58° e 62°	2,65	2	5,30
120°	entre 119° e 121°	7,45	12	14,90
176°	entre 173° e 179°	2,30	3	4,60

Da Tabela 4.18, verifica-se que para $V_1 = 220 V$ e $\theta_u = 120^\circ$ a diferença entre a maior e a menor temperaturas máximas causa uma discrepância igual a 14,90 % da

elevação nominal.

A Tabela 4.19 expõe as elevações de temperatura por fase para seis diferentes condições de desequilíbrio onde têm-se $V_1 = 220 V$ (entre 219 e 221 V) e $\theta_u = 120^\circ$ (entre 119° e 121°). Ressalta-se que os 12 experimentos que se adequam a essas especificações encontram-se na Tabela 1 presente no Apêndice B.

Tabela 4.19: Desequilíbrios que culminam em $V_1 = 220 V$ e $\theta_u = 120^\circ$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ\text{C}$]	Δ entre fases [$^\circ\text{C}$]
15	0,30	$120,00^\circ$	219,83	$\bar{V}_{AB} = 219,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,50\angle -120,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,50\angle 119,70^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,17$ $\Delta_{bc} = 52,38$ $\Delta_{ca} = 50,80$	1,58
84	1,82	$120,37^\circ$	220,05	$\bar{V}_{AB} = 218,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,00\angle -120,90^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,10\angle 118,16^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,54$ $\Delta_{bc} = 53,83$ $\Delta_{ca} = 48,16$	5,67
90	1,91	$119,16^\circ$	219,51	$\bar{V}_{AB} = 217,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,70\angle -120,98^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,40\angle 118,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,43$ $\Delta_{bc} = 55,57$ $\Delta_{ca} = 49,85$	5,72
193	2,79	$120,18^\circ$	219,99	$\bar{V}_{AB} = 217,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,10\angle -121,39^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,00\angle 117,19^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,61$ $\Delta_{bc} = 55,63$ $\Delta_{ca} = 47,66$	7,97
182	2,28	$120,00^\circ$	219,97	$\bar{V}_{AB} = 217,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,00\angle -121,14^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,50\angle 117,72^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,53$ $\Delta_{bc} = 54,53$ $\Delta_{ca} = 47,75$	6,78
187	2,43	$120,07^\circ$	220,13	$\bar{V}_{AB} = 217,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,50\angle -121,21^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,50\angle 117,57^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,82$ $\Delta_{bc} = 56,29$ $\Delta_{ca} = 48,99$	7,30
195	2,87	$119,50^\circ$	220,25	$\bar{V}_{AB} = 217,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,60\angle -121,46^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,10\angle 117,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,59$ $\Delta_{bc} = 59,83$ $\Delta_{ca} = 51,59$	8,24
227	3,30	$119,65^\circ$	219,54	$\bar{V}_{AB} = 216,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,80\angle -121,70^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,00\angle 116,67^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,40$ $\Delta_{bc} = 57,25$ $\Delta_{ca} = 47,83$	9,42

Da Tabela 4.19, nota-se:

1. Das diferenças entre o maior e o menor aquecimentos por situação de desequilíbrio, verifica-se uma variação entre $1,58$ e $9,42^\circ\text{C}$, obtidas nos ensaios 15 e 227, respectivamente.
2. Considerando-se a temperatura $\Delta_{ca} = 47,66^\circ\text{C}$ no ensaio 193 e $\Delta_{bc} = 59,83^\circ\text{C}$ do caso 195, verifica-se que para um mesmo valor de V_1 e θ_u , neste caso iguais

a 220 V e 120° , respectivamente, as fases variam até $12,08^\circ\text{C}$, o que equivale a 24,34 % da elevação nominal.

3. Todas as tensões empregadas nesses experimentos possuem pelo menos uma tensão acima da nominal e outra abaixo do valor nominal. E com exceção dos casos 15 e 195, os ensaios apresentam fases com aquecimentos acima e abaixo da nominal.
4. Em todas as situações expostas, a fase com maior aquecimento é aquela submetida ao maior valor de tensão.

A Tabela 4.20 apresenta condições de desequilíbrio de tensão com V_1 próximo de 220 V e com diferentes valores de θ_u . Ressalta-se que os experimentos dessa Tabela estão dispostos em ordem crescente de θ_u , e percorrem toda a faixa de variação desse parâmetro (entre -150° e 210°).

Tabela 4.20: Desequilíbrios que culminam em $V_1 = 220\text{ V}$ e diferentes valores de θ_u

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ\text{C}$]
79	1,77	$-133,29^\circ$	220,28	$\bar{V}_{AB} = 217,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,20\angle -118,29^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,10\angle 120,52^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,30$ $\Delta_{bc} = 51,61$ $\Delta_{ca} = 53,05$
222	3,01	$-104,32^\circ$	220,62	$\bar{V}_{AB} = 219,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,80\angle -117,07^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,00\angle 122,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,83$ $\Delta_{bc} = 49,45$ $\Delta_{ca} = 55,50$
115	2,00	$-73,64^\circ$	220,11	$\bar{V}_{AB} = 221,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,80\angle -118,64^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,20\angle 121,90^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,69$ $\Delta_{bc} = 47,89$ $\Delta_{ca} = 52,70$
6	0,11	$-32,55^\circ$	219,90	$\bar{V}_{AB} = 220,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00\angle -119,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,20\angle 120,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,66$ $\Delta_{bc} = 50,16$ $\Delta_{ca} = 49,87$
168	2,10	$58,50^\circ$	220,34	$\bar{V}_{AB} = 222,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,60\angle -122,06^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,70\angle 119,02^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,05$ $\Delta_{bc} = 51,02$ $\Delta_{ca} = 46,83$
158	2,08	$93,12^\circ$	220,21	$\bar{V}_{AB} = 220,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,30\angle -121,72^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,40\angle 118,15^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,83$ $\Delta_{bc} = 54,28$ $\Delta_{ca} = 48,29$

Da Tabela 4.20, verifica-se que os desequilíbrios possuem pelo menos uma tensão acima e uma abaixo de 220 V, de forma que existem pelo menos um aquecimento acima e um abaixo de 50°C . Além disso, nota-se que as fases com maior aquecimento são aquelas submetidas aos maiores valores de tensão.

A Figura 4.20 apresenta os desvios padrões entre as elevações de temperatura das três fases em função de θ_u , quando V_1 é limitado entre 219 a 221 V.

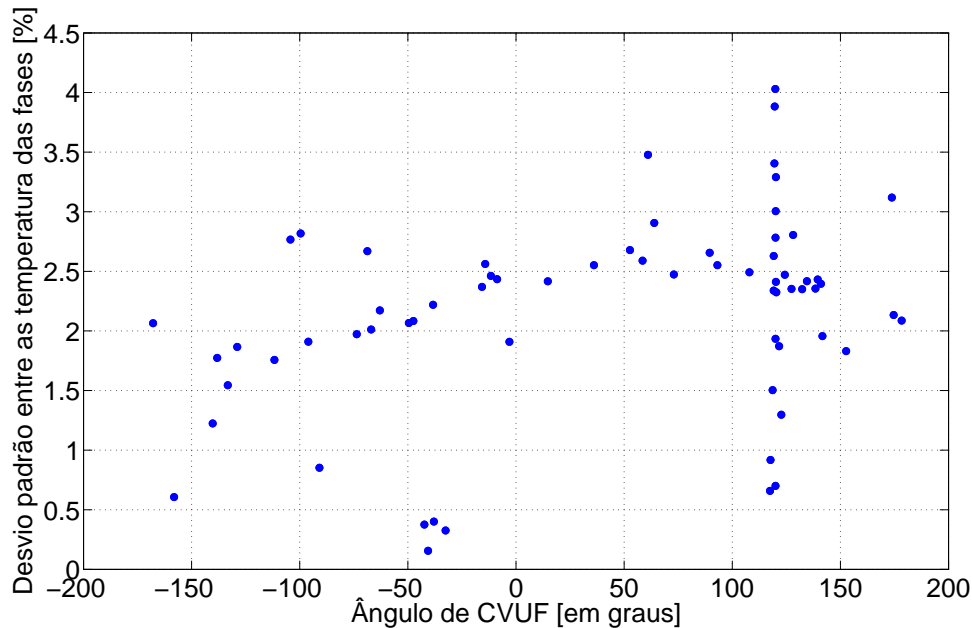


Figura 4.20: Gráfico do desvio padrão entre as temperaturas nas fases em função de θ_u para desequilíbrios com $V_1 = 220 V$

Baseado na Figura 4.20, nota-se que os desvios não seguem nenhum padrão em função de θ_u , quando $V_1 = 220 V$.

4.9 Principais aspectos observados na avaliação do comportamento dos índices

Para a certificação de que o número de dados oriundos dos experimentos laboratoriais não conduzem a conclusões equivocadas, decorrentes da quantidade de ensaios empregados, são apresentados neste item os resultados de análises de informações geradas por redes neurais artificiais treinadas conforme descrito no item 3.3.2 desta dissertação. Neste caso, um número consideravelmente maior de conjuntos de tensões desequilibradas foi utilizado para se concluir a respeito da eficácia dos índices em estudo.

De forma análoga ao realizado para os casos reais, nas simulações computacionais empregando-se RNAs, identificaram-se as discrepâncias entre as maiores e as menores temperaturas máximas obtidas em cada uma das seis configurações analisadas.

A Tabela 4.21 apresenta o total de conjuntos considerados nos ensaios expe-

rimentais e nas simulações computacionais. Além disso, a Tabela 4.21 descreve as discrepâncias obtidas nos resultados laboratoriais e aquelas decorrentes da aplicação das redes neurais artificiais. Nessa Tabela também são incluídos os erros – em % da elevação nominal – definidos pela diferença entre os resultados reais e os computacionais.

Tabela 4.21: Resultados dos ensaios práticos e das RNAs desenvolvidas

Índice (s) Emprego(s)	Resultados Experimentais		Resultados das RNAs		Erro [%]
	Total de Conjuntos	Discrepância entre máximas [°C]	Total de Conjuntos	Discrepância entre máximas [°C]	
$VUF = 2 \%$	78	9,24	45 441	5,81	6,88
$V_1 = 220 V$	67	12,27	202 589	15,26	5,98
$VUF = 2 \%$ $V_1 = 220 V$	27	5,98	4 148	3,55	4,84
$\theta_u = 120^\circ$	47	10,32	13 315	14,81	8,96
$VUF = 2 \%$ $\theta_u = 120^\circ$	19	9,24	242	5,32	7,84
$V_1 = 220 V$ $\theta_u = 120^\circ$	12	7,45	855	7,56	0,22

Da Tabela 4.21, nota-se:

1. Por meio do emprego das redes neurais, é possível verificar que as temperaturas máximas de um conjunto significativamente maior de tensões desequilibradas respondem com comportamentos próximos aos encontrados para as tensões desequilibradas aplicadas nos ensaios realizados em laboratório. Os erros entre os resultados experimentais e computacionais – sempre abaixo de 9 % da elevação de temperatura nominal – são intrínsecos ao emprego de uma ferramenta computacional como a RNA. Além disso, como para cada configuração foram definidas três redes (uma por fase), os erros individuais também incrementam a diferença final.
2. Tanto a prática quanto as RNAs mostraram que os empregos isolados de VUF, V_1 e θ_u causam as maiores discrepâncias entre as elevações de temperatura máximas. Verifica-se, portanto, que o emprego desses três índices, separadamente, não é suficiente para restringir as possíveis elevações de temperaturas no MIT.
3. As discrepâncias entre as temperaturas máximas para o emprego de VUF e de VUF com θ_u são iguais. Isso mostra que a determinação de θ_u não altera as discrepâncias já definidas pela utilização de VUF isolado.

4. Em ambos os resultados, reais e computacionais, o emprego conjunto de VUF e V_1 possui a menor discrepância entre as temperaturas máximas. Dessa forma, constata-se que a determinação desses dois parâmetros possibilita um controle maior das possíveis temperaturas máximas as quais o MIT pode operar quando alimentado com tensões desequilibradas.

Com vistas a avaliação do comportamento das elevações de temperatura máximas em função do aumento simultâneo de VUF e V_1 , apresenta-se a Figura 4.21 que exhibe as elevações de temperatura em função de V_1 , para os experimentos com desequilíbrios cujos VUF são iguais a 1, 2 e 3%.

Na Figura 4.21, também são expostas as curvas em azul, vermelho e preto, resultantes da aplicação de regressão linear nos dados experimentais dos desequilíbrios com $VUF = 1, 2$ e 3%, respectivamente. Os comportamentos das regressões lineares para $VUF = 1$ (azul), 2 (vermelho) e 3% (preto) são descritos pelas equações 4.6, 4.7 e 4.8, respectivamente.

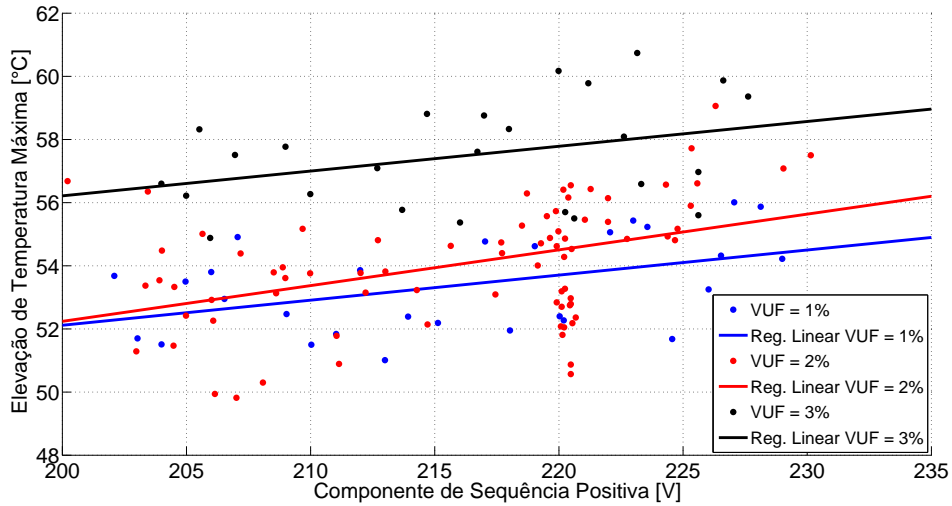


Figura 4.21: Gráfico da elevação de temperatura máxima em função de V_1 , para desequilíbrios com $VUF = 1, 2$ e 3%

$$\Delta_{temp} = 0,08 * \alpha_{V_1} + 36,23 \quad (4.6)$$

$$\Delta_{temp} = 0,11 * \alpha_{V_1} + 29,60 \quad (4.7)$$

$$\Delta_{temp} = 0,08 * \alpha_{V_1} + 40,52 \quad (4.8)$$

Das equações 4.6, 4.7 e 4.8, nota-se que os coeficientes angulares das três regressões lineares possuem valores próximos entre si. Diante disso, observa-se que in-

dependente do valor de VUF, quando este parâmetro é mantido constante, a elevação de temperatura máxima aumenta em torno de 0,10°C quando V_1 incrementa 1 V em seu valor.

Da Figura 4.21 observa-se ainda que as maiores elevações de temperatura são obtidas para desequilíbrios com os maiores valores de VUF e de V_1 . A fim de se determinar os efeitos provenientes de acréscimos de temperatura no motor em função de VUF e V_1 , a Tabela 4.22 apresenta o comportamento da vida útil do MIT em estudo quando submetido a alimentação nominal e a diferentes condições de desequilíbrio.

Ressalta-se que a Tabela 4.22 foi elaborada por meio do emprego da equação 2.12, com a qual é possível definir a redução de vida útil do MIT em função do acréscimo de temperatura obtido em determinada condição operacional que se deseja analisar.

Tabela 4.22: Reduções na vida útil no MIT para diferentes valores de VUF e V_1

VUF [%]	V_1 [V]	Temperatura Máxima [°C]	Acréscimo $\Delta\theta$ [°C]	Tempo de Vida [anos]	Redução de Vida Útil [%]
0	220	80,00	0	20	0
1	205	83,80	3,80	14,34	28,30
	210	82,47	2,47	15,36	22,21
	215	82,19	2,19	16,00	19,97
	220	84,62	4,62	12,54	37,29
	227	86,01	6,01	10,92	45,39
2	205	85,00	5,00	12,07	39,63
	210	85,17	5,17	11,87	40,64
	215	84,63	4,63	12,53	37,36
	220	86,55	6,55	10,35	48,22
	227	89,06	9,01	8,10	59,51
3	205	88,32	8,32	8,70	56,48
	210	87,77	7,77	9,18	54,07
	215	88,81	8,81	8,29	58,51
	220	90,17	10,17	7,27	63,65
	227	89,87	9,87	7,48	62,57

A Tabela 4.22 mostra que o tempo de vida útil do MIT possui as maiores reduções nas situações de desequilíbrio com maiores valores de VUF e V_1 .

Adotando-se como aceitável, por exemplo, uma redução de vida útil de até 45 % – correspondente a um acréscimo de 6°C na temperatura máxima nominal – verifica-se da Tabela 4.22 que, independente do valor de V_1 , todas as combinações de tensões desequilibradas com $VUF = 1$ % apresentam redução de vida útil aceitável. Em contrapartida, avaliando-se os desequilíbrios com $VUF = 3$ %, nota-se que para qualquer valor de V_1 as temperaturas máximas seriam inaceitáveis.

Considerando agora os desequilíbrios com $VUF = 2 \%$, para que o limite proposto fosse respeitado, o valor de V_1 poderia ser no máximo igual a 220 V. Dessa forma, para o MIT em estudo, a restrição de $VUF = 2 \%$ e $V_1 = 220 V$ assegura que as máximas temperaturas resultantes sejam inferiores ao limite proposto.

Das análises dos experimentos laboratoriais e computacionais, verifica-se que por meio do emprego conjunto de VUF e V_1 (estabelecendo-se limites adequados para esses dois parâmetros) é possível restringir os aquecimentos máximos nas fases do MIT. Para se alcançar limites que resguardam as cargas do sistema elétrico, seria necessária a execução deste tipo de estudo considerando-se vários motores e outros equipamentos de diferentes tipos.

4.10 Considerações Finais

Neste capítulo, desenvolveu-se uma avaliação do desempenho dos índices VUF, V_1 e θ_u , empregados isoladamente ou em conjunto, para a quantificação da temperatura de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão.

Inicialmente, o comportamento térmico do MIT para a condição nominal foi exposto a fim de se determinar uma referência para as análises subsequentes. Posteriormente, foram apresentadas as discussões a cerca dos resultados oriundos da aplicação de 235 diferentes conjuntos de tensões desequilibradas. Essas avaliações foram ordenadas em função dos parâmetros VUF, V_1 e θ_u , e basicamente constituíram-se das seguintes etapas: identificação do lugar geométrico dos índices, investigação do comportamento das elevações de temperatura máximas e análise dos aquecimentos separadamente nas três fases.

Em seguida, foram descritos os resultados de simulações computacionais empregando as redes neurais artificiais. No presente trabalho, as RNAs possibilitaram a reprodução dos ensaios laboratoriais considerando-se um número significativamente maior de combinações de tensões desequilibradas.

Tendo definido a utilização de VUF em conjunto com V_1 como a configuração mais adequada para quantificação da temperatura de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão, apresentaram-se alguns resultados que se prestam a identificação de limites para VUF e V_1 . Esses limites podem impedir que o motor seja submetido a temperaturas capazes de danificá-lo ou de reduzir acentuadamente sua vida útil.

Capítulo 5

Conclusões

Este capítulo visa apresentar uma síntese das principais constatações observadas durante toda a dissertação. Além disso, destacam-se as maiores contribuições a respeito dos estudos aqui realizados e elaboram-se propostas de trabalhos futuros que proverão continuidade à esta pesquisa.

O Capítulo 1 buscou contextualizar, de forma sucinta, sobre a importância de desenvolvimento de estudos direcionados a identificação de índices capazes de quantificar adequadamente a temperatura interna de motores de indução trifásicos submetidos a desequilíbrios de tensão. Para tanto, foram apresentados estudos vinculados ao tema central desta dissertação, bem como seus objetivos e contribuições.

No capítulo 2, foram explorados os principais conceitos relacionados com o desequilíbrio de tensão. Assim, destacaram-se sua definição, suas causas e seus efeitos sobre equipamentos como transformadores, motores de indução, cabos e conversores. Ressaltaram-se ainda alguns métodos de cálculo – CIGRÉ, NEMA, ANSI, IEEE e componentes simétricas – e algumas normas, como a IEC 61000-4-30, a IEEE 1159-2009 e o PRODIST da ANEEL. De todo o exposto, o método das componentes simétricas foi tido pela maioria das normas como o mais adequado, permitindo o emprego tanto de tensões de linha como de tensões de fase. Observou-se também que, predominantemente, o limite desejável para o índice de quantificação é de 2%. Ainda no capítulo 2, e visando a melhor compreensão das elevações de temperatura no MIT, abordaram-se aspectos relacionados a constituição física do motor, a origem das suas fontes de aquecimento e a correlação existente entre a redução de vida útil e o aumento adicional de temperatura.

No estado da arte, do capítulo 3, descreveu-se uma extensa revisão bibliográfica sobre os efeitos do desequilíbrio de tensão aplicados em MITs e sobre a quantificação do referido fenômeno. Assim, pesquisas de diversos autores foram discutidas, apontando-se os aspectos mais expressivos de cada uma delas. A maioria dos traba-

lhos examinados afirmaram que infinitas condições de desequilíbrio correspondem a um mesmo valor de VUF. Com isso, tem-se inúmeros conjuntos de fasores de tensão com VUF iguais, culminando em efeitos diferentes sobre os equipamentos da rede. A fim de sanar essa lacuna, os autores propuseram inúmeras alternativas, dentre elas o emprego de VUF em conjunto com outros índices como, por exemplo, V_1 e θ_u . No final do citado capítulo, tem-se a ilustração dos métodos e procedimentos utilizados para se alcançar os objetivos desta dissertação.

No capítulo 4, apresentaram-se as análises do emprego isolado ou em conjunto dos índices VUF, V_1 e θ_u para a quantificação da temperatura de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão. Para tanto, foi exposto inicialmente o comportamento térmico do MIT para a condição nominal de suprimento. Esse resultado prestou-se como referência para as análises de outras condições de desequilíbrio. As principais observações efetuadas no capítulo 4 são descritas a seguir.

Ressalta-se que as elevações de temperatura analisadas no capítulo 4 foram, em sua grande maioria, adquiridas em experimentos laboratoriais. Apresentaram-se também, no capítulo 4, os resultados de simulações computacionais desenvolvidas por meio de redes neurais artificiais. Desses dados computacionais, verificaram-se que os comportamentos térmicos nas fases para um conjunto significativamente maior de tensões desequilibradas responderam de forma similar aos encontrados para as tensões desequilibradas aplicadas nos ensaios realizados em laboratório.

As investigações sobre o emprego isolado de VUF mostraram que, independente do valor no qual esse parâmetro é mantido constante, um mesmo VUF representa diferentes condições de desequilíbrio que produzem aquecimentos nas fases com diferenças expressivas. Ademais, dos ensaios realizados verificou-se que maiores valores de VUF são responsáveis pelas maiores elevações de temperatura máximas no MIT.

Muito embora um mesmo valor de VUF esteja atrelado a diferentes elevações de temperatura, constatou-se que VUF possui uma relação linear com o desvio padrão entre os aquecimentos nas fases. Dessa forma, em desequilíbrios com VUF menores, os enrolamentos têm aquecimentos mais semelhantes entre si, e para situações nas quais o VUF possui patamares mais elevados, os aquecimentos nas fases são mais discrepantes entre si. Diante disso, nota-se a possibilidade de determinação de valores de VUF capazes de restringir as diferenças máximas entre os aquecimentos nas fases.

Das investigações sobre o emprego isolado de V_1 , notou-se que independente do valor no qual esse parâmetro é mantido constante, ele representa diferentes condições de desequilíbrio que produzem aquecimentos nas fases com diferenças expressivas. Além disso, verificou-se que ambos os desequilíbrios com V_1 acima ou abaixo do

nominal são capazes de produzir elevações de temperatura nas fases acima de 50°C . Em decorrência dos aspectos listados, conclui-se que apenas a utilização desse índice é inadequada para a avaliação do comportamento térmico de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão.

Os resultados decorrentes do emprego de θ_u , isolado ou em conjunto com mais um índice, evidenciaram que esse parâmetro não contribui para o conhecimento de nenhuma das características das tensões desequilibradas. Assim, independente do valor no qual θ_u é mantido constante, seus desequilíbrios causam aquecimentos nas fases com diferenças expressivas.

Ressalta-se que a quantificação da temperatura por meio de θ_u somente é adequada quando o referido índice é empregado em conjunto com VUF e V_1 simultaneamente. Nessas condições, é possível traçar três senoides – correspondentes aos aquecimentos nas fases – que variam em função de θ_u . Dessa forma, a determinação do ângulo de CVUF define exatamente as elevações de temperatura em cada uma das fases. Entretanto, a utilização simultânea desses três índices é pouco prática, uma vez que o emprego de θ_u só é eficiente se os valores de VUF e V_1 forem definidos previamente. Além disso, o estabelecimento de limites para θ_u é algo complexo porque depende dos aquecimentos nas três fases, cujos comportamentos térmicos não são semelhantes. Assim, a maior contribuição do emprego de θ_u juntamente com VUF e V_1 , é a possibilidade de se definir a maior temperatura alcançada entre as três fases (escolha de qual senoide possui maior pico). Entretanto, esse valor pode ser definido empregando-se apenas VUF em conjunto com V_1 .

A análise geral das seis configurações estudadas mostrou que a utilização conjunta dos índices VUF e V_1 resulta na menor discrepância entre as temperaturas máximas possíveis. Além disso, verificou-se que a determinação desses dois parâmetros garante que as tensões de alimentação tenham características semelhantes entre si e, conseqüentemente, os aquecimentos produzidos por elas também alcançam patamares próximos.

Ao final do Capítulo 4, realizou-se ainda uma avaliação do comportamento da vida útil do MIT submetido a diferentes condições de desequilíbrio. Dessa análise, verificou-se que o tempo de vida útil do MIT possui as maiores reduções nas situações de desequilíbrio com maiores valores de VUF e V_1 . Assim, constatou-se que a escolha de valores adequados para o emprego conjunto desses dois índices é capaz de restringir as temperaturas máximas no MIT, e conseqüentemente contribuir para a preservação de sua vida útil. Diante desses aspectos, a utilização conjunta de VUF e V_1 apresenta-se como a alternativa mais adequada para se quantificar a temperatura de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão.

Finalmente, recomenda-se que os seguintes temas sejam contemplados em trabalhos futuros:

- Investigação e desenvolvimento de índices capazes de quantificar, com menores discrepâncias, a temperatura do MIT submetido a desequilíbrios de tensão;
- Nas análises com motores conectados em estrela aterrado, investigar e reconhecer a influência da sequência zero no comportamento térmico de MITs submetidos a desequilíbrios de tensão;
- Avaliar, com maior ênfase, os efeitos causados pelas temperaturas adicionais na vida útil dos MITs submetidos a desequilíbrios de tensão;
- Execução de testes semelhantes aos expostos neste estudo considerando-se vários motores e outros equipamentos de diferentes tipos, permitindo assim a análise de modelos mais representativos.

Referências Bibliográficas

- ABNT. *Máquinas Elétricas Girantes - Máquina de Indução - Determinação de Características - Métodos de Ensaio*. [S.l.], 1982.
- ABREU, J. de; EMANUEL, A. Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 38, n. 1, p. 12 –20, jan/feb 2002. ISSN 0093-9994.
- ALGER, P. L. *The Nature of Polyphase Induction Machine*. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 1951.
- ALMEIDA, J. L. A. de. *Metodologia para Avaliação do Comportamento e Vida Útil de Motores Alimentados por Fontes Assimétricas de Tensão*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1999.
- ALMEIDA, W. G. de; FREITAS, F. D. de. *Circuitos Polifásicos*. [S.l.]: Apoio da Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos, FINATEC, 1995.
- ANEEL. *Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica – Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas. Relatório Parcial 2 – Estado da Arte, Universidade Federal de Uberlândia*. [S.l.], 2000. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_1_Retificacao_1-.pdf>.
- ANEEL. *PRODIST: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – módulo 8, revisão 4, qualidade da energia elétrica*. [S.l.], 2010. Disponível em: <http://http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_4.pdf>.
- ANEEL. *Revisão da Regulamentação sobre a Qualidade do Produto no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica*. [S.l.], 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/NT_29_2011-SRD_ANEEL_ANEXO.pdf>.

- ANSI. *American National Standard for Electric Power Systems and Equipment, Voltage Ratings (60 Hz)*. [S.l.], 1995.
- ANWARI, M.; HIENDRO, A. New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under- and overvoltage unbalance. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 3, p. 619 –625, sept. 2010. ISSN 0885-8969.
- BRANCO, W. C. *Inteligência Artificial - Notas de aula*. 2002. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/54169144/ApostilaIA>>.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. *Electrical Power System Quality*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1996.
- FAIZ, J.; EBRAHIMPOUR, H. Precise derating of three-phase induction motors with unbalanced voltages. In: *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 485 – 491 Vol. 1. ISSN 0197-2618.
- FAIZ, J.; EBRAHIMPOUR, H.; PILLAY, P. Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 4, p. 657 – 662, dec. 2004. ISSN 0885-8969.
- FILHO, A. de L. F. *Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, 2008.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J. C.; UMANS, t. A. L. S. D. *Máquinas Elétricas*. Sexta edição. [S.l.]: Editora Bookman, 2006.
- FUCHS, E. F.; KOVACS, K. P.; ROESLER, D. J. Aging of electrical appliances due to harmonics of the power system's voltage. *Power Engineering Review, IEEE*, PER-6, n. 7, p. 65 –66, july 1986. ISSN 0272-1724.
- GNACINSKI, P. *Energy Conversion and Management* 49 (2008), v. 49, n. 4, p. 761 –770, April 2008.
- GNACINSKI, P. Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over- or undervoltages. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 2, p. 363 –371, june 2008. ISSN 0885-8969.

-
- GOEDEL, A. *Estimativa de Conjugado de Carga Aplicado em Eixos de Motores de Indução Trifásicos através de Redes Neurais Artificiais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2003.
- HOLLANDA, D. L. D. R. *Análise Comportamental do Motor de Indução Trifásico Submetido a Desequilíbrios de Tensão Sob o Ponto de Vista de Conjugado e Rendimento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2012.
- IEC. *Electromagnetic Compatibility (EMC): . part 2: environment. section 2: Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public low voltage power supply systems*. [S.l.], 1990.
- IEC. *IEC 61000-4-30: testing and measurement techniques, power quality measurement methods*. [S.l.], 2008.
- IEEE. *IEEE 1159-2009: recommended practice for monitoring electric power quality*. [S.l.], 2009.
- KAWAPHARA, M. K.; VASCONCELOS, A.; APOLÔNIO, R.; TECHI, D. A. V.; ARANTES, R. B.; SILVA, R. P. B.; LIMA, R. L. Análise do comportamento da energia elétrica no acionamento de uma bomba centrífuga em função da variação da vazão através do estrangulamento de uma válvula ou via inversor de frequência. 2008.
- KINI, P.; BANSAL, R. Effect of voltage and load variations on efficiencies of a motor-pump system. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 2, p. 287 –292, june 2010. ISSN 0885-8969.
- KINI, P.; BANSAL, R.; AITHAL, R. A novel approach toward interpretation and application of voltage unbalance factor. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 54, n. 4, p. 2315 –2322, aug. 2007. ISSN 0278-0046.
- KOSTENKO, M.; PIOTROVSKI, L. *Máquinas Elétricas*. [S.l.]: Editora Lopes da Silva, 1974.
- LEE, C.-Y. Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 2, p. 202 –208, jun 1999. ISSN 0885-8969.
- LEE, C.-Y.; CHEN, B.-K.; LEE, W.-J.; HSU, Y.-F. Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same

- voltage unbalance factor condition. In: *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1997. Conference Record, Papers Presented at the 1997 Annual Meeting., IEEE 1997*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 51 –59.
- MATOS, J. M. *Avaliação dos Efeitos do Desequilíbrio de Tensão Sobre os Motores de Indução Trifásicos*. 2012.
- MENDES, A.; QUISPE, E.; ANDNDEZ, X. F.; CARDOSO, A. Influence of the positive sequence voltage on the temperature of three-phase induction motors. In: *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1 –6.
- OGATTA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Terceira edição. [S.l.]: LTC Editora, 1998.
- OLIVEIRA, J. ao Paulo Jorge de. *Um estudo da Influencia do Intervalo de Agregação nos Métodos do Desequilíbrio de Tensão*. 2012.
- ONS. *Procedimentos De Rede, Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes, revisão 2.0, data de vigência 11 de novembro de 2011*. [S.l.], 2011.
- ORTEGA, A. V. *Implementação de Sistemas Inteligentes para Dimensionamento de Led Hi-Bright em Equipamentos Automotivos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2002.
- PILLAY, P.; HOFMANN, P.; MANYAGE, M. Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over-or under-voltages. *Power Engineering Review, IEEE*, v. 22, n. 7, p. 51, july 2002. ISSN 0272-1724.
- PILLAY, P.; MANYAGE, M. Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 4, p. 813 –822, dec. 2006. ISSN 0885-8969.
- QUISPE, E.; LOPEZ-FERNANDEZ, X.; MENDES, A.; CARDOSO, A. M.; PALACIOS, J. Experimental study of the effect of positive sequence voltage on the derating of induction motors under voltage unbalance. In: *Electric Machines Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 908 –912.
- SIDDIQUE, A.; YADAVA, G.; SINGH, B. Effects of voltage unbalance on induction motors. In: *Electrical Insulation, 2004. Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 26 – 29. ISSN 1089-084X.

SOUTO, O. C. N. *Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de indução sob Condições não Ideias de Alimentação*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2001.

TORO, V. D. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. [S.l.]: Printice-Hall do Brasil Ltda., 1994.

WANG, Y.-J. Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. 16, n. 3, p. 270 –275, sep 2001. ISSN 0885-8969.

Apêndice A

Redes Neurais Artificiais

Neste Apêndice são apresentadas informações a cerca das Redes Neurais Artificiais. Ressalta-se que essas características são, majoritariamente, descritas conforme Goedtel (2003).

As Redes Neurais Artificiais são modelos computacionais que utilizam técnicas de processamento inerentemente paralelas que se adaptam a um grande número de unidades simples de processamento. As RNAs possuem esse nome, pois se assemelham à estrutura de um cérebro, que aprende conforme é estimulado pelo seu ambiente. Assim, os sistemas biológicos e as redes possuem altas taxas de computação, devido a um grande número de elementos simples de processamento com alto grau de conectividade entre si.

Além da estrutura paralelamente distribuída, o poder computacional das RNAs é devido à sua habilidade de aprender e, portanto de generalizar sendo capaz de se aproximar de relações não lineares e complexas. A generalização se refere ao fato de a RNA produzir saídas adequadas para entradas que não estavam presentes durante o treinamento ou aprendizagem.

O neurônio é a unidade de processamento fundamental da RNA. O modelo de um neurônio artificial é apresentado na Figura A.1, cujos elementos são descritos a seguir.

- Um conjunto de sinapses ou conexões, cada qual sendo caracterizada por um peso sináptico w_{jm}^k , que indica a importância do sinal x_m^k na determinação da saída do neurônio j da camada k ;
- Um somador \sum , o qual tem a função de realizar uma combinação linear dos sinais de entrada ponderados pelos respectivos pesos sinápticos de suas ligações;
- Uma função de ativação (φ .) para limitar a amplitude da saída num determinado intervalo, geralmente normalizado;

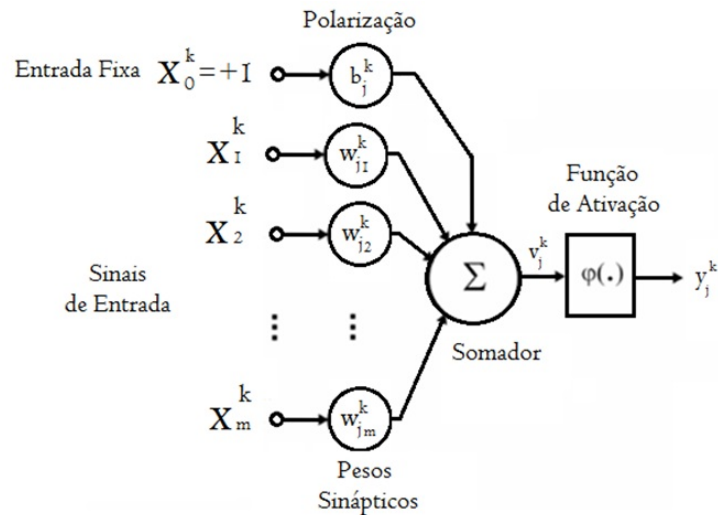


Figura A.1: Modelo de um neurônio artificial

- O sinal de saída y_j^k da k -ésima camada do neurônio; e
- A polarização, os *bias*, representada por b_j^k , cujo efeito é aumentar ou diminuir os valores resultantes da soma dos produtos de todos os vetores de entrada pelos seus respectivos pesos, dependendo se ele é positivo ou negativo, respectivamente.

As funções de ativação representadas por $(\varphi.)$ e também chamadas de de funções restritivas, são responsáveis por limitar a variação do sinal de saída. Elas são divididas, basicamente, em cinco tipos: degrau, degrau simétrico, linear, logística e tangente hiperbólica. Todas elas são apresentadas na Figura A.2.

Tipo	Degrau	Degrau Simétrico	Linear	Logística	Tangente Hiperbólica
Função					

Figura A.2: Funções de Ativação

As RNAs são classificadas em função do fluxo de informação entre a entrada e a saída, e podem possuir diversas arquiteturas diferentes. O conceito de redes é formado pelo conjunto de neurônios artificiais integrados que constituem as unidades de processamento em paralelo.

A estrutura básica de uma rede neural é composta por três camadas. A primeira camada, denominada *Camada de Entrada*, caracteriza-se como o portal de entrada das informações à rede, recebendo os sinais de entrada e apresentando-os as demais

camadas da rede. A segunda camada é denominada de *Camada Intermediária* ou *Camada Oculta*. Deve ser feita uma ressalva nesse ponto pois algumas arquiteturas de redes envolvem não apenas uma camada intermediária mas várias em cascata. Os dados provenientes da primeira camada são processados de forma paralela pelos vários neurônios distribuídos dentro dessa camada. A última camada, denominada *Camada de Saída*, também processa o sinal e é responsável por apresentar os dados processados ao mundo externo. A Figura A.3 descreve as camadas de entrada, intermediária e de saída (ORTEGA, 2002).

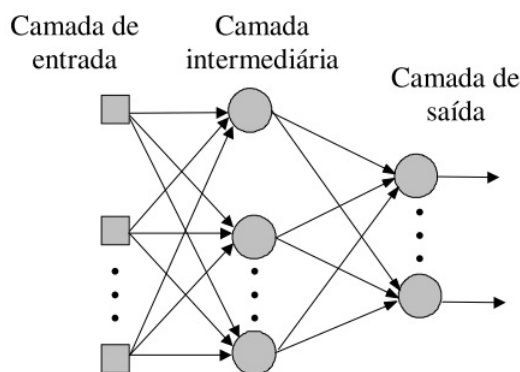


Figura A.3: Camadas de entrada, intermediária e de saída de uma rede neural

Segundo (BRANCO, 2002) as RNAs podem ser classificadas em diretas (*feedforward*) e recorrentes (*feedback*). Na primeira classe, a saída de um neurônio não pode ser utilizada como entrada de nenhum neurônio de sua própria camada ou de camadas anteriores, fato esse permitido nas redes da segunda categoria. Os modelos de RNA mais comuns baseiam-se no tipo *perceptron* multi-camadas (empregado no presente trabalho). Esse modelo é uma rede direta cujos neurônios são do tipo MCP (multicamadas *feedforward*) e se conectam apenas com os neurônios da camada seguinte (HOLLANDA, 2012). Três tipos de neurônios são encontrados nesse modelo:

- As unidades sensoriais ou neurônios de entrada: recebem os sinais de entrada e repassam para a rede;
- As unidades associativas ou neurônios internos: conectam os neurônios de entrada e de saída; e
- As unidades de resposta ou neurônios de saída: enviam para o usuário as respostas geradas pela rede.

O processo de aprendizagem pelo qual as redes passam com o objetivo de ajustar seus pesos sinápticos para estabelecer a relação entre entrada e saída é denominado

treinamento. Os tipos de treinamento são divididos em dois grandes grupos, a saber: supervisionado e não-supervisionado.

No treinamento supervisionado os valores de entrada são mostrados à rede e, por meio dos pesos associados às diversas camadas, o valor da saída é calculado. Quando o valor de saída difere do valor desejado àquela situação de entradas os pesos sinápticos são ajustados. Esse processo se repete até que a diferença entre a saída da rede e o valor desejado fique dentro de uma margem de erro aceitável. É importante ressaltar que os estímulos de entrada são apresentados à rede juntamente com a saída desejada e que neste tipo de treinamento existe a presença de um supervisor, responsável pela alteração dos parâmetros da rede.

O treinamento não-supervisionado (auto-organizado) não apresenta um elemento externo que verifica o erro na saída em relação a um valor desejado. A alteração dos pesos sinápticos através do algoritmo de treinamento ocorre a partir do momento em que a rede cria sua própria representação para os estímulos de entrada para aquelas entradas. Dessa forma, ao serem ajustados os pesos, haverá uma correspondência entre a saída e a entrada para aquele conjunto de dados de entrada.

Apêndice B

Dados Experimentais

A Tabela 1 apresenta todos os resultados dos 235 ensaios realizados.

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
1	0,11	-38,00°	220,20	$\bar{V}_{AB} = 220,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00 \angle -119,97^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,20 \angle 120,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,71$ $\Delta_{bc} = 50,18$ $\Delta_{ca} = 49,73$
2	0,07	-64,68°	217,23	$\bar{V}_{AB} = 217,30 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,10 \angle -119,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,30 \angle 120,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,89$ $\Delta_{bc} = 49,64$ $\Delta_{ca} = 49,73$
3	0,10	-60,00°	210,20	$\bar{V}_{AB} = 210,30 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,00 \angle -119,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,30 \angle 120,10^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,74$ $\Delta_{bc} = 48,48$ $\Delta_{ca} = 48,24$
4	0,11	67,88°	223,17	$\bar{V}_{AB} = 223,30 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,30 \angle -120,09^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,90 \angle 119,93^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,67$ $\Delta_{bc} = 49,51$ $\Delta_{ca} = 48,63$
5	0,11	-42,38°	220,18	$\bar{V}_{AB} = 220,37 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,95 \angle -119,97^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,22 \angle 120,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,83$ $\Delta_{bc} = 49,36$ $\Delta_{ca} = 48,91$
6	0,11	-32,55°	219,90	$\bar{V}_{AB} = 220,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00 \angle -119,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,20 \angle 120,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,66$ $\Delta_{bc} = 50,16$ $\Delta_{ca} = 49,87$
7	0,11	-11,47°	207,27	$\bar{V}_{AB} = 207,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 207,10 \angle -120,04^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 207,20 \angle 120,07^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,07$ $\Delta_{bc} = 46,78$ $\Delta_{ca} = 46,48$
8	0,12	-40,64°	220,27	$\bar{V}_{AB} = 220,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00 \angle -119,97^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,30 \angle 120,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,90$ $\Delta_{bc} = 47,74$ $\Delta_{ca} = 47,52$
9	0,13	117,46°	219,73	$\bar{V}_{AB} = 219,60 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00 \angle -120,08^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,60 \angle 119,86^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,04$ $\Delta_{bc} = 49,88$ $\Delta_{ca} = 48,57$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
10	0,14	31,14°	213,17	$\bar{V}_{AB} = 213,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,20\angle -120,12^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 212,90\angle 120,01^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,58$ $\Delta_{bc} = 47,36$ $\Delta_{ca} = 46,69$
11	0,14	117,70°	207,73	$\bar{V}_{AB} = 207,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,00\angle -120,09^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 207,60\angle 119,84^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,52$ $\Delta_{bc} = 53,67$ $\Delta_{ca} = 52,76$
12	0,18	130,63°	230,73	$\bar{V}_{AB} = 230,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 231,10\angle -120,06^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 230,60\angle 119,81^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,75$ $\Delta_{bc} = 54,84$ $\Delta_{ca} = 53,56$
13	0,20	24,75°	200,93	$\bar{V}_{AB} = 201,30\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 200,90\angle -120,16^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 200,60\angle 120,02^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,43$ $\Delta_{bc} = 51,94$ $\Delta_{ca} = 51,47$
14	0,22	5,07°	215,10	$\bar{V}_{AB} = 215,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 214,90\angle -120,11^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 214,80\angle 120,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,55$ $\Delta_{bc} = 46,82$ $\Delta_{ca} = 46,33$
15	0,30	120,00°	219,83	$\bar{V}_{AB} = 219,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,50\angle -120,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,50\angle 119,70^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,17$ $\Delta_{bc} = 52,38$ $\Delta_{ca} = 50,80$
16	0,42	-148,96°	215,03	$\bar{V}_{AB} = 214,30\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,00\angle -119,63^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,80\angle 120,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,48$ $\Delta_{bc} = 50,18$ $\Delta_{ca} = 49,55$
17	0,44	116,82°	229,57	$\bar{V}_{AB} = 229,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 230,60\angle -120,23^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 229,00\angle 119,58^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,42$ $\Delta_{bc} = 53,80$ $\Delta_{ca} = 51,52$
18	0,44	132,71°	205,26	$\bar{V}_{AB} = 205,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 205,30\angle -120,13^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,00\angle 119,16^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,88$ $\Delta_{bc} = 47,85$ $\Delta_{ca} = 47,00$
19	0,48	117,92°	201,50	$\bar{V}_{AB} = 201,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 202,50\angle -120,26^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 201,00\angle 119,54^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,12$ $\Delta_{bc} = 50,88$ $\Delta_{ca} = 49,03$
20	0,51	-136,36°	203,13	$\bar{V}_{AB} = 203,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 202,90\angle -119,02^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 203,10\angle 120,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,21$ $\Delta_{bc} = 49,92$ $\Delta_{ca} = 49,74$
21	0,61	117,68°	220,23	$\bar{V}_{AB} = 219,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 221,60\angle -120,32^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,50\angle 119,40^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,60$ $\Delta_{bc} = 53,55$ $\Delta_{ca} = 51,31$
22	0,64	168,56°	202,46	$\bar{V}_{AB} = 201,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 203,30\angle -119,81^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,90\angle 119,57^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,90$ $\Delta_{bc} = 52,64$ $\Delta_{ca} = 51,10$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
23	0,70	-158,11°	219,96	$\bar{V}_{AB} = 218,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,20\angle -119,46^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,20\angle 119,91^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,90$ $\Delta_{bc} = 50,38$ $\Delta_{ca} = 49,75$
24	0,73	-94,12°	218,40	$\bar{V}_{AB} = 218,30\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,10\angle -119,33^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,80\angle 120,61^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,33$ $\Delta_{bc} = 50,93$ $\Delta_{ca} = 52,08$
25	0,79	-138,50°	221,70	$\bar{V}_{AB} = 220,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,00\angle -119,09^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,00\angle 120,45^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,33$ $\Delta_{bc} = 53,66$ $\Delta_{ca} = 54,45$
26	0,79	168,95°	203,56	$\bar{V}_{AB} = 202,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 204,60\angle -119,75^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,10\angle 119,47^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,08$ $\Delta_{bc} = 48,99$ $\Delta_{ca} = 47,32$
27	0,87	120,38°	227,60	$\bar{V}_{AB} = 226,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,60\angle -120,42^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 226,60\angle 119,14^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,50$ $\Delta_{bc} = 54,86$ $\Delta_{ca} = 51,51$
28	0,89	-177,03°	223,50	$\bar{V}_{AB} = 221,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,40\angle -119,53^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,60\angle 119,60^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,69$ $\Delta_{bc} = 50,95$ $\Delta_{ca} = 49,52$
29	0,90	122,69°	220,03	$\bar{V}_{AB} = 219,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,00\angle -120,40^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,10\angle 119,10^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,00$ $\Delta_{bc} = 52,40$ $\Delta_{ca} = 49,23$
30	0,91	120,73°	226,53	$\bar{V}_{AB} = 225,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,60\angle -120,43^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 225,50\angle 119,10^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,01$ $\Delta_{bc} = 54,32$ $\Delta_{ca} = 50,87$
31	0,93	59,29°	206,53	$\bar{V}_{AB} = 207,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 207,50\angle -120,92^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,60\angle 119,56^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,95$ $\Delta_{bc} = 51,80$ $\Delta_{ca} = 49,72$
32	0,94	-60,71°	209,03	$\bar{V}_{AB} = 210,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 207,10\angle -119,51^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,00\angle 120,94^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,47$ $\Delta_{bc} = 50,79$ $\Delta_{ca} = 52,45$
33	0,96	57,25°	207,06	$\bar{V}_{AB} = 208,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,00\angle -120,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,10\angle 119,58^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,91$ $\Delta_{bc} = 54,08$ $\Delta_{ca} = 51,97$
34	0,96	-2,41°	203,03	$\bar{V}_{AB} = 205,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 202,00\angle -120,43^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,10\angle 120,52^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,70$ $\Delta_{bc} = 49,12$ $\Delta_{ca} = 49,52$
35	0,97	-59,14°	206,00	$\bar{V}_{AB} = 207,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 204,00\angle -119,55^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 207,00\angle 120,95^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,52$ $\Delta_{bc} = 51,83$ $\Delta_{ca} = 53,80$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
36	0,97	148,60°	223,56	$\bar{V}_{AB} = 221,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,50\angle -120,02^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,50\angle 119,16^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,82$ $\Delta_{bc} = 55,23$ $\Delta_{ca} = 52,49$
37	0,98	-59,49°	204,00	$\bar{V}_{AB} = 205,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 202,00\angle -119,53^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,00\angle 120,97^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,44$ $\Delta_{bc} = 49,67$ $\Delta_{ca} = 51,51$
38	0,99	-152,79°	228,99	$\bar{V}_{AB} = 227,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,10\angle -119,17^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 230,90\angle 119,95^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,51$ $\Delta_{bc} = 54,22$ $\Delta_{ca} = 53,65$
39	1,00	-148,66°	227,06	$\bar{V}_{AB} = 225,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 227,00\angle -119,14^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 229,10\angle 120,02^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,41$ $\Delta_{bc} = 56,01$ $\Delta_{ca} = 55,80$
40	1,00	58,51°	204,96	$\bar{V}_{AB} = 206,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 206,00\angle -120,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,90\angle 119,55^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,50$ $\Delta_{bc} = 52,39$ $\Delta_{ca} = 50,17$
41	1,01	-151,48°	228,13	$\bar{V}_{AB} = 226,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,20\angle -119,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 230,10\angle 119,98^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,09$ $\Delta_{bc} = 55,87$ $\Delta_{ca} = 55,61$
42	1,01	-150,49°	224,56	$\bar{V}_{AB} = 222,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,60\angle -119,13^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 226,50\angle 120,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,03$ $\Delta_{bc} = 51,68$ $\Delta_{ca} = 51,20$
43	1,02	-150,90°	226,03	$\bar{V}_{AB} = 224,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,10\angle -119,12^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 228,00\angle 120,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,51$ $\Delta_{bc} = 53,25$ $\Delta_{ca} = 52,87$
44	1,03	-90,91°	219,03	$\bar{V}_{AB} = 219,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,10\angle -119,11^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,00\angle 120,87^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,42$ $\Delta_{bc} = 52,54$ $\Delta_{ca} = 54,62$
45	1,03	-118,23°	202,09	$\bar{V}_{AB} = 201,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 201,00\angle -118,98^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,20\angle 120,54^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,54$ $\Delta_{bc} = 52,57$ $\Delta_{ca} = 53,68$
46	1,05	150,07°	222,99	$\bar{V}_{AB} = 221,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,00\angle -120,00^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,00\angle 119,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,95$ $\Delta_{bc} = 55,43$ $\Delta_{ca} = 52,36$
47	1,06	118,65°	220,19	$\bar{V}_{AB} = 219,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,50\angle -120,55^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,00\angle 118,94^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,55$ $\Delta_{bc} = 52,27$ $\Delta_{ca} = 48,59$
48	1,06	-90,63°	210,03	$\bar{V}_{AB} = 210,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,10\angle -119,10^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 212,00\angle 120,89^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,58$ $\Delta_{bc} = 49,82$ $\Delta_{ca} = 51,50$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
49	1,06	148,44°	222,06	$\bar{V}_{AB} = 220,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,10\angle -120,03^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,00\angle 119,06^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,64$ $\Delta_{bc} = 55,06$ $\Delta_{ca} = 51,93$
50	1,06	-93,21°	218,03	$\bar{V}_{AB} = 217,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,10\angle -119,06^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,10\angle 120,88^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,81$ $\Delta_{bc} = 50,19$ $\Delta_{ca} = 51,95$
51	1,07	88,83°	217,03	$\bar{V}_{AB} = 217,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,00\angle -120,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,00\angle 119,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,49$ $\Delta_{bc} = 54,77$ $\Delta_{ca} = 51,39$
52	1,08	88,28°	211,03	$\bar{V}_{AB} = 211,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,00\angle -120,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 209,00\angle 119,10^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,49$ $\Delta_{bc} = 51,84$ $\Delta_{ca} = 48,58$
53	1,08	-89,37°	213,93	$\bar{V}_{AB} = 214,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 211,90\angle -119,06^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,90\angle 120,93^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,23$ $\Delta_{bc} = 50,50$ $\Delta_{ca} = 52,39$
54	1,09	90,98°	211,99	$\bar{V}_{AB} = 212,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 214,00\angle -120,92^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,00\angle 119,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,45$ $\Delta_{bc} = 53,86$ $\Delta_{ca} = 50,74$
55	1,09	89,92°	212,99	$\bar{V}_{AB} = 213,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,00\angle -120,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 211,00\angle 119,05^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,58$ $\Delta_{bc} = 51,01$ $\Delta_{ca} = 47,37$
56	1,10	90,59°	215,13	$\bar{V}_{AB} = 215,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,20\angle -120,94^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 213,10\angle 119,05^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,73$ $\Delta_{bc} = 52,19$ $\Delta_{ca} = 48,93$
57	1,22	-11,03°	218,62	$\bar{V}_{AB} = 221,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,90\angle -120,41^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,80\angle 120,80^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,63$ $\Delta_{bc} = 46,33$ $\Delta_{ca} = 47,06$
58	1,30	136,87°	226,76	$\bar{V}_{AB} = 224,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,60\angle -120,30^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 226,10\angle 118,76^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,01$ $\Delta_{bc} = 53,09$ $\Delta_{ca} = 49,19$
59	1,31	-121,77°	202,56	$\bar{V}_{AB} = 201,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 201,30\angle -118,69^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,20\angle 120,61^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,25$ $\Delta_{bc} = 50,59$ $\Delta_{ca} = 51,96$
60	1,41	-172,02°	202,72	$\bar{V}_{AB} = 199,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 203,80\angle -119,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,50\angle 119,48^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,33$ $\Delta_{bc} = 49,70$ $\Delta_{ca} = 48,33$
61	1,42	121,65°	220,06	$\bar{V}_{AB} = 218,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,20\angle -120,68^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,60\angle 118,59^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,44$ $\Delta_{bc} = 54,04$ $\Delta_{ca} = 49,47$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ\text{C}$]
62	1,43	$118,75^\circ$	209,52	$\bar{V}_{AB} = 208,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 212,50\angle -120,75^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,00\angle 118,56^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,49$ $\Delta_{bc} = 54,66$ $\Delta_{ca} = 50,23$
63	1,46	$119,26^\circ$	223,65	$\bar{V}_{AB} = 222,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,90\angle -120,74^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,00\angle 118,54^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,48$ $\Delta_{bc} = 53,16$ $\Delta_{ca} = 48,40$
64	1,46	$-140,26^\circ$	219,79	$\bar{V}_{AB} = 217,30\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,30\angle -118,63^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,80\angle 120,27^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,26$ $\Delta_{bc} = 49,47$ $\Delta_{ca} = 50,12$
65	1,47	$-129,39^\circ$	222,35	$\bar{V}_{AB} = 220,30\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 221,20\angle -118,56^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 225,60\angle 120,51^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,68$ $\Delta_{bc} = 50,14$ $\Delta_{ca} = 51,46$
66	1,47	$59,17^\circ$	228,35	$\bar{V}_{AB} = 230,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 230,00\angle -121,45^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 225,00\angle 119,29^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,74$ $\Delta_{bc} = 54,33$ $\Delta_{ca} = 50,74$
67	1,49	$120,00^\circ$	220,22	$\bar{V}_{AB} = 218,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,50\angle -120,75^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,60\angle 118,50^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,91$ $\Delta_{bc} = 55,50$ $\Delta_{ca} = 50,77$
68	1,50	$20,96^\circ$	221,79	$\bar{V}_{AB} = 224,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 221,30\angle -121,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,20\angle 120,25^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,39$ $\Delta_{bc} = 48,75$ $\Delta_{ca} = 47,67$
69	1,51	$20,32^\circ$	227,88	$\bar{V}_{AB} = 230,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,70\angle -121,74^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 226,60\angle 119,98^\circ$	$\Delta_{ab} = 56,57$ $\Delta_{bc} = 52,40$ $\Delta_{ca} = 50,02$
70	1,54	$152,65^\circ$	220,42	$\bar{V}_{AB} = 217,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,30\angle -119,94^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,60\angle 118,72^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,13$ $\Delta_{bc} = 51,15$ $\Delta_{ca} = 47,42$
71	1,55	$141,05^\circ$	230,15	$\bar{V}_{AB} = 227,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 233,50\angle -120,24^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 229,60\angle 118,56^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,61$ $\Delta_{bc} = 56,51$ $\Delta_{ca} = 52,02$
72	1,55	$141,69^\circ$	219,25	$\bar{V}_{AB} = 216,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,40\angle -120,24^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,80\angle 118,55^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,77$ $\Delta_{bc} = 53,66$ $\Delta_{ca} = 49,29$
73	1,56	$-3,06^\circ$	220,25	$\bar{V}_{AB} = 223,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 218,40\angle -120,70^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,70\angle 120,85^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,64$ $\Delta_{bc} = 48,24$ $\Delta_{ca} = 49,07$
74	1,56	$131,77^\circ$	230,19	$\bar{V}_{AB} = 227,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 233,70\angle -120,50^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 229,10\angle 118,47^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,31$ $\Delta_{bc} = 58,11$ $\Delta_{ca} = 52,91$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
75	1,59	-167,83°	219,86	$\bar{V}_{AB} = 215,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 221,90 \angle -118,94^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,20 \angle 119,96^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,62$ $\Delta_{bc} = 51,67$ $\Delta_{ca} = 49,39$
76	1,66	65,40°	221,45	$\bar{V}_{AB} = 223,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,60 \angle -121,63^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,80 \angle 119,05^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,06$ $\Delta_{bc} = 50,12$ $\Delta_{ca} = 46,19$
77	1,67	122,98°	203,92	$\bar{V}_{AB} = 202,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 207,30 \angle -120,76^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,40 \angle 118,33^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,64$ $\Delta_{bc} = 50,59$ $\Delta_{ca} = 45,97$
78	1,71	91,27°	209,99	$\bar{V}_{AB} = 209,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 214,00 \angle -121,44^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 206,90 \angle 118,90^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,61$ $\Delta_{bc} = 51,71$ $\Delta_{ca} = 46,13$
79	1,77	-133,29°	220,28	$\bar{V}_{AB} = 217,60 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,20 \angle -118,29^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,10 \angle 120,52^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,30$ $\Delta_{bc} = 51,61$ $\Delta_{ca} = 53,05$
80	1,77	120,38°	224,55	$\bar{V}_{AB} = 222,60 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,50 \angle -120,87^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,60 \angle 118,22^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,04$ $\Delta_{bc} = 54,21$ $\Delta_{ca} = 48,64$
81	1,78	119,63°	222,98	$\bar{V}_{AB} = 221,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 227,00 \angle -120,90^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,00 \angle 118,24^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,67$ $\Delta_{bc} = 54,84$ $\Delta_{ca} = 49,31$
82	1,79	-172,65°	221,95	$\bar{V}_{AB} = 218,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,50 \angle -118,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,40 \angle 119,32^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,35$ $\Delta_{bc} = 51,89$ $\Delta_{ca} = 50,00$
83	1,81	44,28°	218,62	$\bar{V}_{AB} = 221,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,60 \angle -121,71^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 214,80 \angle 119,56^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,09$ $\Delta_{bc} = 52,34$ $\Delta_{ca} = 49,80$
84	1,82	120,37°	220,05	$\bar{V}_{AB} = 218,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,00 \angle -120,90^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,10 \angle 118,16^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,54$ $\Delta_{bc} = 53,83$ $\Delta_{ca} = 48,16$
85	1,82	119,73°	218,05	$\bar{V}_{AB} = 216,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,00 \angle -120,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,10 \angle 118,17^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,08$ $\Delta_{bc} = 55,16$ $\Delta_{ca} = 49,59$
86	1,82	-124,10°	218,62	$\bar{V}_{AB} = 216,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,90 \angle -118,18^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,60 \angle 120,80^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,30$ $\Delta_{bc} = 49,00$ $\Delta_{ca} = 51,11$
87	1,83	-14,27°	220,38	$\bar{V}_{AB} = 224,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,60 \angle -120,27^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,80 \angle 121,27^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,61$ $\Delta_{bc} = 50,89$ $\Delta_{ca} = 49,67$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
88	1,89	120,68°	211,01	$\bar{V}_{AB} = 209,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,00 \angle -120,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 209,10 \angle 118,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,79$ $\Delta_{bc} = 54,11$ $\Delta_{ca} = 48,67$
89	1,90	132,32°	219,15	$\bar{V}_{AB} = 216,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,20 \angle -120,58^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,90 \angle 118,13^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,70$ $\Delta_{bc} = 54,01$ $\Delta_{ca} = 48,55$
90	1,91	119,16°	219,51	$\bar{V}_{AB} = 217,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,70 \angle -120,98^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,40 \angle 118,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,43$ $\Delta_{bc} = 55,57$ $\Delta_{ca} = 49,85$
91	1,92	155,78°	221,05	$\bar{V}_{AB} = 217,20 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,50 \angle -119,82^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,50 \angle 118,45^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,34$ $\Delta_{bc} = 55,46$ $\Delta_{ca} = 51,28$
92	1,92	119,48°	208,98	$\bar{V}_{AB} = 207,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,00 \angle -120,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 207,00 \angle 118,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,46$ $\Delta_{bc} = 53,61$ $\Delta_{ca} = 48,23$
93	1,93	120,00°	209,98	$\bar{V}_{AB} = 208,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 214,00 \angle -120,97^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,00 \angle 118,06^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,45$ $\Delta_{bc} = 53,76$ $\Delta_{ca} = 48,37$
94	1,93	119,14°	202,98	$\bar{V}_{AB} = 201,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 206,90 \angle -120,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 201,00 \angle 118,07^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,13$ $\Delta_{bc} = 51,29$ $\Delta_{ca} = 46,28$
95	1,94	135,18°	213,01	$\bar{V}_{AB} = 211,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,00 \angle -120,09^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 211,10 \angle 118,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,60$ $\Delta_{bc} = 53,82$ $\Delta_{ca} = 48,32$
96	1,95	119,24°	206,01	$\bar{V}_{AB} = 204,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,00 \angle -121,00^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,00 \angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,77$ $\Delta_{bc} = 52,92$ $\Delta_{ca} = 47,62$
97	1,95	131,20°	212,21	$\bar{V}_{AB} = 209,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,30 \angle -120,63^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,90 \angle 118,10^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,18$ $\Delta_{bc} = 53,15$ $\Delta_{ca} = 47,95$
98	1,95	119,91°	208,08	$\bar{V}_{AB} = 206,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 212,10 \angle -120,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 206,10 \angle 118,03^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,06$ $\Delta_{bc} = 50,30$ $\Delta_{ca} = 44,83$
99	1,95	120,09°	204,98	$\bar{V}_{AB} = 203,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 209,00 \angle -120,97^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 203,00 \angle 118,05^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,17$ $\Delta_{bc} = 52,42$ $\Delta_{ca} = 47,09$
100	1,96	120,00°	222,75	$\bar{V}_{AB} = 220,60 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 227,10 \angle -120,98^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,60 \angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,31$ $\Delta_{bc} = 54,85$ $\Delta_{ca} = 48,86$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
101	1,96	178,31°	219,91	$\bar{V}_{AB} = 215,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,20\angle -119,09^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,00\angle 118,98^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,51$ $\Delta_{bc} = 54,62$ $\Delta_{ca} = 51,95$
102	1,96	112,18°	230,14	$\bar{V}_{AB} = 228,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 234,60\angle -121,20^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,40\angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,16$ $\Delta_{bc} = 57,50$ $\Delta_{ca} = 51,11$
103	1,96	119,83°	207,01	$\bar{V}_{AB} = 205,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 211,10\angle -120,99^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,00\angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,49$ $\Delta_{bc} = 49,82$ $\Delta_{ca} = 44,33$
104	1,97	145,57°	218,51	$\bar{V}_{AB} = 215,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,40\angle -120,16^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,20\angle 118,22^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,32$ $\Delta_{bc} = 55,27$ $\Delta_{ca} = 50,16$
105	1,97	174,65°	220,25	$\bar{V}_{AB} = 215,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,80\angle -119,20^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,10\angle 118,88^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,67$ $\Delta_{bc} = 54,86$ $\Delta_{ca} = 51,73$
106	1,98	120,00°	218,71	$\bar{V}_{AB} = 216,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,00\angle -121,00^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,60\angle 118,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,87$ $\Delta_{bc} = 56,29$ $\Delta_{ca} = 50,33$
107	1,98	-128,92°	220,21	$\bar{V}_{AB} = 217,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 218,70\angle -118,03^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,50\angle 120,73^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,48$ $\Delta_{bc} = 49,75$ $\Delta_{ca} = 52,05$
108	1,98	127,38°	224,38	$\bar{V}_{AB} = 221,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,80\angle -120,77^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,70\angle 118,03^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,57$ $\Delta_{bc} = 54,93$ $\Delta_{ca} = 49,17$
109	1,99	134,52°	219,64	$\bar{V}_{AB} = 217,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,90\angle -120,08^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,50\angle 118,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,60$ $\Delta_{bc} = 54,88$ $\Delta_{ca} = 48,97$
110	1,99	143,36°	208,51	$\bar{V}_{AB} = 205,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 212,30\angle -120,26^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,10\angle 118,16^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,02$ $\Delta_{bc} = 53,79$ $\Delta_{ca} = 48,71$
111	2,00	131,82°	221,98	$\bar{V}_{AB} = 219,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,30\angle -120,62^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,60\angle 118,03^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,89$ $\Delta_{bc} = 55,39$ $\Delta_{ca} = 49,68$
112	2,00	-49,57°	220,11	$\bar{V}_{AB} = 223,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,80\angle -119,34^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,60\angle 121,94^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,19$ $\Delta_{bc} = 48,66$ $\Delta_{ca} = 52,88$
113	2,00	125,97°	203,35	$\bar{V}_{AB} = 201,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 207,40\angle -120,81^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 201,70\angle 118,01^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,56$ $\Delta_{bc} = 53,37$ $\Delta_{ca} = 47,82$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ\text{C}$]
114	2,00	$166,00^\circ$	212,01	$\bar{V}_{AB} = 207,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,00\angle -119,46^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 213,20\angle 118,63^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,40$ $\Delta_{bc} = 53,77$ $\Delta_{ca} = 50,18$
115	2,00	$-73,64^\circ$	220,11	$\bar{V}_{AB} = 221,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,80\angle -118,64^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,20\angle 121,90^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,69$ $\Delta_{bc} = 47,89$ $\Delta_{ca} = 52,70$
116	2,00	$52,69^\circ$	219,98	$\bar{V}_{AB} = 222,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 221,70\angle -121,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,60\angle 119,24^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,09$ $\Delta_{bc} = 52,68$ $\Delta_{ca} = 48,60$
117	2,00	$83,86^\circ$	225,31	$\bar{V}_{AB} = 225,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,00\angle -121,81^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,20\angle 118,40^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,30$ $\Delta_{bc} = 55,90$ $\Delta_{ca} = 50,01$
118	2,00	$119,58^\circ$	204,01	$\bar{V}_{AB} = 202,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,10\angle -121,03^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,00\angle 117,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,43$ $\Delta_{bc} = 54,48$ $\Delta_{ca} = 48,78$
119	2,01	$-47,45^\circ$	220,48	$\bar{V}_{AB} = 223,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,20\angle -119,40^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,80\angle 121,94^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,87$ $\Delta_{bc} = 46,29$ $\Delta_{ca} = 50,53$
120	2,01	$107,91^\circ$	220,24	$\bar{V}_{AB} = 218,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,60\angle -121,34^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,30\angle 118,04^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,44$ $\Delta_{bc} = 53,27$ $\Delta_{ca} = 47,17$
121	2,01	$121,96^\circ$	204,48	$\bar{V}_{AB} = 202,30\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,60\angle -120,96^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,60\angle 117,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,06$ $\Delta_{bc} = 51,47$ $\Delta_{ca} = 46,22$
122	2,01	$120,08^\circ$	215,64	$\bar{V}_{AB} = 213,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00\angle -121,00^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 213,50\angle 117,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,33$ $\Delta_{bc} = 54,63$ $\Delta_{ca} = 48,54$
123	2,01	$-39,57^\circ$	207,18	$\bar{V}_{AB} = 210,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 203,30\angle -119,68^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 207,90\angle 121,87^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,39$ $\Delta_{bc} = 49,89$ $\Delta_{ca} = 53,78$
125	2,02	$120,00^\circ$	212,71	$\bar{V}_{AB} = 210,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,00\angle -121,01^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,60\angle 117,98^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,58$ $\Delta_{bc} = 54,81$ $\Delta_{ca} = 49,01$
126	2,02	$-146,87^\circ$	211,04	$\bar{V}_{AB} = 207,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,90\angle -118,18^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 214,80\angle 120,15^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,05$ $\Delta_{bc} = 51,73$ $\Delta_{ca} = 51,78$
127	2,02	$127,41^\circ$	220,68	$\bar{V}_{AB} = 218,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,10\angle -120,78^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,00\angle 118,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,41$ $\Delta_{bc} = 52,36$ $\Delta_{ca} = 46,75$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
128	2,02	117,62°	203,91	$\bar{V}_{AB} = 202,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,00 \angle -121,11^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 201,80 \angle 117,97^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,42$ $\Delta_{bc} = 53,54$ $\Delta_{ca} = 48,01$
129	2,02	120,08°	217,68	$\bar{V}_{AB} = 215,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,10 \angle -121,00^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,50 \angle 117,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,23$ $\Delta_{bc} = 54,74$ $\Delta_{ca} = 48,58$
130	2,02	120,16°	220,18	$\bar{V}_{AB} = 218,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,60 \angle -121,01^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,00 \angle 117,96^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,83$ $\Delta_{bc} = 56,41$ $\Delta_{ca} = 50,55$
131	2,03	122,98°	208,88	$\bar{V}_{AB} = 206,60 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,10 \angle -120,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 207,00 \angle 117,97^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,49$ $\Delta_{bc} = 53,95$ $\Delta_{ca} = 48,46$
132	2,03	138,43°	220,08	$\bar{V}_{AB} = 216,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,30 \angle -120,41^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,20 \angle 118,07^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,33$ $\Delta_{bc} = 52,08$ $\Delta_{ca} = 46,87$
133	2,03	-50,54°	224,78	$\bar{V}_{AB} = 227,70 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,30 \angle -119,30^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 226,40 \angle 121,98^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,17$ $\Delta_{bc} = 50,30$ $\Delta_{ca} = 54,78$
134	2,03	141,00°	220,14	$\bar{V}_{AB} = 216,70 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,30 \angle -120,34^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,50 \angle 118,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,94$ $\Delta_{bc} = 51,81$ $\Delta_{ca} = 46,54$
135	2,03	-15,72°	220,48	$\bar{V}_{AB} = 224,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,30 \angle -120,51^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,40 \angle 121,45^\circ$	$\Delta_{ab} = 56,55$ $\Delta_{bc} = 50,80$ $\Delta_{ca} = 52,99$
136	2,03	-8,76°	220,38	$\bar{V}_{AB} = 224,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,60 \angle -120,75^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,80 \angle 121,27^\circ$	$\Delta_{ab} = 56,16$ $\Delta_{bc} = 50,37$ $\Delta_{ca} = 52,03$
137	2,04	-66,99°	219,88	$\bar{V}_{AB} = 221,70 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,40 \angle -118,79^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,60 \angle 121,97^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,53$ $\Delta_{bc} = 50,99$ $\Delta_{ca} = 55,73$
138	2,04	131,69°	203,45	$\bar{V}_{AB} = 200,70 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 207,50 \angle -120,66^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,20 \angle 118,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,31$ $\Delta_{bc} = 56,35$ $\Delta_{ca} = 50,74$
139	2,04	72,97°	220,48	$\bar{V}_{AB} = 221,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,60 \angle -121,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,10 \angle 118,64^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,57$ $\Delta_{bc} = 50,07$ $\Delta_{ca} = 45,09$
140	2,04	14,71°	220,44	$\bar{V}_{AB} = 224,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,30 \angle -121,42^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,30 \angle 120,55^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,75$ $\Delta_{bc} = 47,83$ $\Delta_{ca} = 47,44$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ\text{C}$]
141	2,04	$82,64^\circ$	221,98	$\bar{V}_{AB} = 222,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,60\angle -121,85^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,80\angle 118,39^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,66$ $\Delta_{bc} = 56,14$ $\Delta_{ca} = 50,16$
142	2,04	$8,97^\circ$	209,68	$\bar{V}_{AB} = 213,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,20\angle -121,27^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 207,00\angle 120,75^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,17$ $\Delta_{bc} = 50,15$ $\Delta_{ca} = 50,73$
143	2,04	$89,57^\circ$	220,51	$\bar{V}_{AB} = 220,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,40\angle -121,75^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,60\angle 118,24^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,41$ $\Delta_{bc} = 54,53$ $\Delta_{ca} = 48,42$
144	2,05	$100,36^\circ$	211,14	$\bar{V}_{AB} = 210,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,20\angle -121,56^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 207,90\angle 118,06^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,85$ $\Delta_{bc} = 50,89$ $\Delta_{ca} = 45,41$
145	2,05	$110,89^\circ$	205,64	$\bar{V}_{AB} = 204,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 209,80\angle -121,28^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 203,00\angle 117,97^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,54$ $\Delta_{bc} = 55,01$ $\Delta_{ca} = 49,17$
146	2,05	$-118,07^\circ$	217,44	$\bar{V}_{AB} = 215,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,10\angle -117,94^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,90\angle 121,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,15$ $\Delta_{bc} = 50,27$ $\Delta_{ca} = 53,09$
147	2,05	$139,51^\circ$	219,28	$\bar{V}_{AB} = 215,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,50\angle -120,39^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,50\angle 118,05^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,82$ $\Delta_{bc} = 54,71$ $\Delta_{ca} = 49,32$
148	2,05	$-138,04^\circ$	204,51	$\bar{V}_{AB} = 201,40\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 203,70\angle -118,04^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,50\angle 120,45^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,91$ $\Delta_{bc} = 52,24$ $\Delta_{ca} = 53,33$
149	2,06	$-138,19^\circ$	220,48	$\bar{V}_{AB} = 217,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,60\angle -118,05^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,80\angle 120,44^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,53$ $\Delta_{bc} = 51,40$ $\Delta_{ca} = 52,79$
150	2,06	$131,13^\circ$	224,68	$\bar{V}_{AB} = 221,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,20\angle -120,67^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,20\angle 117,96^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,90$ $\Delta_{bc} = 54,81$ $\Delta_{ca} = 49,07$
151	2,07	$124,30^\circ$	220,54	$\bar{V}_{AB} = 218,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,10\angle -120,90^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,60\angle 117,94^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,09$ $\Delta_{bc} = 52,18$ $\Delta_{ca} = 46,27$
152	2,07	$119,60^\circ$	226,31	$\bar{V}_{AB} = 224,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 231,00\angle -121,06^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,00\angle 117,93^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,08$ $\Delta_{bc} = 59,06$ $\Delta_{ca} = 52,70$
153	2,07	$123,81^\circ$	206,14	$\bar{V}_{AB} = 203,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,40\angle -120,92^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,30\angle 117,93^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,12$ $\Delta_{bc} = 49,94$ $\Delta_{ca} = 44,31$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
154	2,07	129,77°	214,71	$\bar{V}_{AB} = 211,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,10\angle -120,72^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 213,20\angle 117,96^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,85$ $\Delta_{bc} = 52,14$ $\Delta_{ca} = 46,45$
155	2,07	-111,70°	219,91	$\bar{V}_{AB} = 218,30\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,10\angle -117,94^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,40\angle 121,27^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,86$ $\Delta_{bc} = 49,43$ $\Delta_{ca} = 52,84$
156	2,07	101,46°	208,61	$\bar{V}_{AB} = 207,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 212,70\angle -121,54^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,40\angle 118,03^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,13$ $\Delta_{bc} = 53,13$ $\Delta_{ca} = 47,58$
157	2,08	119,56°	225,34	$\bar{V}_{AB} = 223,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 230,00\angle -121,05^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,00\angle 117,91^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,92$ $\Delta_{bc} = 57,72$ $\Delta_{ca} = 51,19$
158	2,08	93,12°	220,21	$\bar{V}_{AB} = 220,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,30\angle -121,72^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,40\angle 118,15^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,83$ $\Delta_{bc} = 54,28$ $\Delta_{ca} = 48,29$
159	2,08	36,05°	220,48	$\bar{V}_{AB} = 224,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 221,00\angle -121,88^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,30\angle 119,80^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,97$ $\Delta_{bc} = 49,13$ $\Delta_{ca} = 46,78$
160	2,08	120,00°	224,31	$\bar{V}_{AB} = 222,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,00\angle -121,04^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,00\angle 117,92^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,75$ $\Delta_{bc} = 56,57$ $\Delta_{ca} = 50,13$
161	2,08	56,44°	229,04	$\bar{V}_{AB} = 231,70\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 231,20\angle -122,05^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,30\angle 119,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 57,08$ $\Delta_{bc} = 55,04$ $\Delta_{ca} = 49,87$
162	2,08	136,81°	200,21	$\bar{V}_{AB} = 197,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 204,20\angle -120,49^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 199,30\angle 118,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,22$ $\Delta_{bc} = 56,68$ $\Delta_{ca} = 51,04$
163	2,09	-109,37°	214,28	$\bar{V}_{AB} = 212,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 211,40\angle -117,95^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,70\angle 121,36^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,48$ $\Delta_{bc} = 49,98$ $\Delta_{ca} = 53,23$
164	2,09	131,00°	225,58	$\bar{V}_{AB} = 222,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 230,20\angle -120,70^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,10\angle 117,94^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,71$ $\Delta_{bc} = 56,61$ $\Delta_{ca} = 50,39$
165	2,09	160,73°	221,28	$\bar{V}_{AB} = 216,90\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,80\angle -119,64^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,20\angle 118,42^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,74$ $\Delta_{bc} = 56,43$ $\Delta_{ca} = 51,98$
166	2,10	122,27°	206,08	$\bar{V}_{AB} = 203,80\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,40\angle -120,98^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 204,10\angle 117,90^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,55$ $\Delta_{bc} = 52,26$ $\Delta_{ca} = 47,50$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
167	2,10	-38,35°	220,18	$\bar{V}_{AB} = 223,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,90 \angle -119,72^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,90 \angle 121,93^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,92$ $\Delta_{bc} = 49,64$ $\Delta_{ca} = 53,40$
168	2,10	58,50°	220,34	$\bar{V}_{AB} = 222,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,60 \angle -122,06^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,70 \angle 119,02^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,05$ $\Delta_{bc} = 51,02$ $\Delta_{ca} = 46,83$
169	2,11	-96,03°	220,34	$\bar{V}_{AB} = 219,90 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,60 \angle -118,08^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,60 \angle 121,68^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,13$ $\Delta_{bc} = 49,09$ $\Delta_{ca} = 53,56$
170	2,12	-62,98°	220,24	$\bar{V}_{AB} = 222,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,60 \angle -118,86^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,80 \angle 122,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,55$ $\Delta_{bc} = 48,49$ $\Delta_{ca} = 53,50$
171	2,13	148,44°	215,98	$\bar{V}_{AB} = 212,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00 \angle -120,08^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,90 \angle 118,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,44$ $\Delta_{bc} = 54,85$ $\Delta_{ca} = 49,78$
172	2,13	124,31°	207,48	$\bar{V}_{AB} = 205,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 211,90 \angle -120,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,60 \angle 117,88^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,81$ $\Delta_{bc} = 51,74$ $\Delta_{ca} = 46,01$
173	2,13	-11,62°	220,67	$\bar{V}_{AB} = 225,30 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 217,60 \angle -120,67^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,20 \angle 121,42^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,18$ $\Delta_{bc} = 49,22$ $\Delta_{ca} = 51,41$
174	2,14	119,18°	220,37	$\bar{V}_{AB} = 218,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,10 \angle -121,10^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,00 \angle 117,86^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,48$ $\Delta_{bc} = 54,36$ $\Delta_{ca} = 47,97$
175	2,14	148,25°	215,91	$\bar{V}_{AB} = 212,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00 \angle -120,08^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,80 \angle 118,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,33$ $\Delta_{bc} = 53,57$ $\Delta_{ca} = 48,43$
176	2,14	-10,62°	229,77	$\bar{V}_{AB} = 234,60 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,60 \angle -120,73^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 228,20 \angle 121,39^\circ$	$\Delta_{ab} = 58,32$ $\Delta_{bc} = 52,06$ $\Delta_{ca} = 53,50$
177	2,16	-156,60°	223,91	$\bar{V}_{AB} = 219,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 224,50 \angle -118,27^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,80 \angle 119,77^\circ$	$\Delta_{ab} = 46,59$ $\Delta_{bc} = 50,93$ $\Delta_{ca} = 50,65$
178	2,17	114,34°	202,24	$\bar{V}_{AB} = 200,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 206,60 \angle -121,26^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 199,70 \angle 117,82^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,00$ $\Delta_{bc} = 52,30$ $\Delta_{ca} = 46,30$
179	2,18	-67,91°	225,67	$\bar{V}_{AB} = 227,60 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,80 \angle -118,67^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 228,70 \angle 122,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,09$ $\Delta_{bc} = 51,12$ $\Delta_{ca} = 56,12$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
180	2,18	120,00°	215,31	$\bar{V}_{AB} = 213,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,10 \angle -121,09^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 213,00 \angle 117,82^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,58$ $\Delta_{bc} = 54,11$ $\Delta_{ca} = 47,75$
181	2,24	117,27°	214,37	$\bar{V}_{AB} = 212,20 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,20 \angle -121,21^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 211,80 \angle 117,76^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,57$ $\Delta_{bc} = 53,48$ $\Delta_{ca} = 47,53$
182	2,28	120,00°	219,97	$\bar{V}_{AB} = 217,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,00 \angle -121,14^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,50 \angle 117,72^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,53$ $\Delta_{bc} = 54,53$ $\Delta_{ca} = 47,75$
183	2,31	-124,25°	208,77	$\bar{V}_{AB} = 206,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 206,70 \angle -117,70^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 213,60 \angle 121,00^\circ$	$\Delta_{ab} = 45,98$ $\Delta_{bc} = 48,15$ $\Delta_{ca} = 50,77$
184	2,32	128,12°	220,17	$\bar{V}_{AB} = 217,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,20 \angle -120,87^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,30 \angle 117,68^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,41$ $\Delta_{bc} = 55,44$ $\Delta_{ca} = 48,87$
185	2,32	63,92°	220,50	$\bar{V}_{AB} = 222,80 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,40 \angle -122,28^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,40 \angle 118,72^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,46$ $\Delta_{bc} = 52,85$ $\Delta_{ca} = 47,65$
186	2,34	119,43°	218,50	$\bar{V}_{AB} = 216,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,60 \angle -121,22^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,00 \angle 117,64^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,94$ $\Delta_{bc} = 54,95$ $\Delta_{ca} = 48,01$
187	2,43	120,07°	220,13	$\bar{V}_{AB} = 217,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,50 \angle -121,21^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,50 \angle 117,57^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,82$ $\Delta_{bc} = 56,29$ $\Delta_{ca} = 48,99$
188	2,49	120,20°	203,50	$\bar{V}_{AB} = 201,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,60 \angle -121,23^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 201,00 \angle 117,51^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,64$ $\Delta_{bc} = 55,71$ $\Delta_{ca} = 49,07$
189	2,60	-69,63°	221,60	$\bar{V}_{AB} = 223,70 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,90 \angle -118,35^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 225,30 \angle 122,51^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,53$ $\Delta_{bc} = 47,22$ $\Delta_{ca} = 53,46$
190	2,61	-68,76°	219,86	$\bar{V}_{AB} = 222,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 214,20 \angle -118,38^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,50 \angle 122,54^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,47$ $\Delta_{bc} = 47,37$ $\Delta_{ca} = 53,83$
191	2,75	-32,49°	206,19	$\bar{V}_{AB} = 211,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 201,20 \angle -119,91^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 206,50 \angle 122,40^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,42$ $\Delta_{bc} = 47,25$ $\Delta_{ca} = 52,19$
192	2,76	-122,22°	204,16	$\bar{V}_{AB} = 201,20 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 201,60 \angle -117,23^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 209,80 \angle 121,30^\circ$	$\Delta_{ab} = 47,00$ $\Delta_{bc} = 49,68$ $\Delta_{ca} = 52,99$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
193	2,79	120,18°	219,99	$\bar{V}_{AB} = 217,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,10\angle -121,39^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,00\angle 117,19^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,61$ $\Delta_{bc} = 55,63$ $\Delta_{ca} = 47,66$
194	2,80	173,81°	220,22	$\bar{V}_{AB} = 214,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,90\angle -118,91^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 222,80\angle 118,36^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,29$ $\Delta_{bc} = 56,92$ $\Delta_{ca} = 52,76$
195	2,87	119,50°	220,25	$\bar{V}_{AB} = 217,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,60\angle -121,46^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,10\angle 117,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,59$ $\Delta_{bc} = 59,83$ $\Delta_{ca} = 51,59$
196	2,88	-108,97°	211,02	$\bar{V}_{AB} = 209,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 207,10\angle -117,16^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,00\angle 121,89^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,51$ $\Delta_{bc} = 49,23$ $\Delta_{ca} = 54,04$
197	2,89	105,03°	224,19	$\bar{V}_{AB} = 222,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 230,40\angle -122,04^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 219,70\angle 117,18^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,57$ $\Delta_{bc} = 58,39$ $\Delta_{ca} = 49,54$
198	2,89	-109,45°	211,96	$\bar{V}_{AB} = 210,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 208,00\angle -117,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,00\angle 121,86^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,00$ $\Delta_{bc} = 51,86$ $\Delta_{ca} = 56,76$
199	2,90	120,17°	207,96	$\bar{V}_{AB} = 205,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 214,00\angle -121,44^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,00\angle 117,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,30$ $\Delta_{bc} = 56,77$ $\Delta_{ca} = 48,74$
200	2,91	60,11°	227,62	$\bar{V}_{AB} = 231,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 231,00\angle -122,84^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 221,00\angle 118,57^\circ$	$\Delta_{ab} = 58,96$ $\Delta_{bc} = 59,36$ $\Delta_{ca} = 53,10$
201	2,92	-105,05°	221,19	$\bar{V}_{AB} = 219,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,70\angle -117,15^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,40\angle 122,06^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,83$ $\Delta_{bc} = 53,65$ $\Delta_{ca} = 59,78$
202	2,94	-104,33°	223,15	$\bar{V}_{AB} = 221,60\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 218,50\angle -117,17^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 229,50\angle 122,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,18$ $\Delta_{bc} = 54,66$ $\Delta_{ca} = 60,74$
203	2,94	-119,21°	203,99	$\bar{V}_{AB} = 201,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 201,00\angle -117,05^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,00\angle 121,52^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,12$ $\Delta_{bc} = 52,61$ $\Delta_{ca} = 56,60$
204	2,94	-99,87°	217,99	$\bar{V}_{AB} = 217,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,10\angle -117,22^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 224,00\angle 122,23^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,09$ $\Delta_{bc} = 52,17$ $\Delta_{ca} = 58,33$
205	2,94	87,14°	213,69	$\bar{V}_{AB} = 214,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,00\angle -122,57^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,10\angle 117,53^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,95$ $\Delta_{bc} = 55,77$ $\Delta_{ca} = 48,16$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
206	2,95	-99,60°	219,99	$\bar{V}_{AB} = 219,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,00 \angle -117,24^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 226,10 \angle 122,23^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,70$ $\Delta_{bc} = 53,79$ $\Delta_{ca} = 60,17$
207	2,96	-99,74°	216,99	$\bar{V}_{AB} = 216,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 212,10 \angle -117,21^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 223,00 \angle 122,25^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,48$ $\Delta_{bc} = 52,64$ $\Delta_{ca} = 58,76$
208	2,96	109,35°	209,99	$\bar{V}_{AB} = 208,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 216,10 \angle -121,92^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 206,00 \angle 117,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,59$ $\Delta_{bc} = 56,27$ $\Delta_{ca} = 48,22$
209	2,96	70,03°	226,62	$\bar{V}_{AB} = 229,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 231,00 \angle -122,85^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,00 \angle 118,12^\circ$	$\Delta_{ab} = 59,87$ $\Delta_{bc} = 58,57$ $\Delta_{ca} = 51,06$
210	2,97	109,42°	208,99	$\bar{V}_{AB} = 207,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,10 \angle -121,92^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 205,00 \angle 117,07^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,06$ $\Delta_{bc} = 57,77$ $\Delta_{ca} = 49,48$
211	2,97	109,65°	206,95	$\bar{V}_{AB} = 205,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,00 \angle -121,90^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 203,00 \angle 117,06^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,16$ $\Delta_{bc} = 57,51$ $\Delta_{ca} = 49,43$
212	2,97	119,89°	204,99	$\bar{V}_{AB} = 202,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 211,10 \angle -121,50^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,00 \angle 117,02^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,59$ $\Delta_{bc} = 56,22$ $\Delta_{ca} = 48,22$
213	2,97	109,18°	205,95	$\bar{V}_{AB} = 204,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 212,00 \angle -121,93^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,00 \angle 117,08^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,41$ $\Delta_{bc} = 54,88$ $\Delta_{ca} = 46,93$
214	2,98	61,00°	220,25	$\bar{V}_{AB} = 223,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 223,70 \angle -122,91^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 213,70 \angle 118,50^\circ$	$\Delta_{ab} = 55,70$ $\Delta_{bc} = 53,33$ $\Delta_{ca} = 47,43$
215	2,98	104,38°	222,62	$\bar{V}_{AB} = 221,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 229,00 \angle -122,10^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,90 \angle 117,11^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,39$ $\Delta_{bc} = 58,09$ $\Delta_{ca} = 49,27$
216	2,98	-70,32°	225,62	$\bar{V}_{AB} = 228,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,00 \angle -118,08^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 230,00 \angle 122,87^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,67$ $\Delta_{bc} = 49,42$ $\Delta_{ca} = 56,97$
217	2,99	-87,09°	214,69	$\bar{V}_{AB} = 215,10 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 209,00 \angle -117,49^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 220,10 \angle 122,62^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,85$ $\Delta_{bc} = 51,61$ $\Delta_{ca} = 58,81$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [$^\circ\text{C}$]
218	2,99	$98,64^\circ$	216,02	$\bar{V}_{AB} = 215,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,10\angle -122,31^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 211,00\angle 117,22^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,86$ $\Delta_{bc} = 55,37$ $\Delta_{ca} = 47,16$
219	3,00	$-119,42^\circ$	223,32	$\bar{V}_{AB} = 220,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,00\angle -116,98^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 230,00\angle 121,54^\circ$	$\Delta_{ab} = 50,27$ $\Delta_{bc} = 51,94$ $\Delta_{ca} = 56,59$
220	3,00	$119,61^\circ$	205,52	$\bar{V}_{AB} = 202,50\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 211,70\angle -121,54^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 202,50\angle 116,99^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,54$ $\Delta_{bc} = 58,32$ $\Delta_{ca} = 50,07$
221	3,01	$-86,99^\circ$	212,69	$\bar{V}_{AB} = 213,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 207,00\angle -117,49^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,10\angle 122,63^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,41$ $\Delta_{bc} = 50,27$ $\Delta_{ca} = 57,09$
222	3,01	$-104,32^\circ$	220,62	$\bar{V}_{AB} = 219,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 215,80\angle -117,07^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,00\angle 122,09^\circ$	$\Delta_{ab} = 49,83$ $\Delta_{bc} = 49,45$ $\Delta_{ca} = 55,50$
223	3,03	$-77,18^\circ$	225,62	$\bar{V}_{AB} = 227,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 219,10\angle -117,80^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 230,70\angle 122,84^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,41$ $\Delta_{bc} = 48,19$ $\Delta_{ca} = 55,60$
224	3,05	$60,22^\circ$	216,72	$\bar{V}_{AB} = 220,10\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,10\angle -122,98^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,10\angle 118,49^\circ$	$\Delta_{ab} = 57,61$ $\Delta_{bc} = 54,63$ $\Delta_{ca} = 48,83$
225	3,18	$119,90^\circ$	221,44	$\bar{V}_{AB} = 218,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 228,50\angle -121,61^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 218,00\angle 116,80^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,04$ $\Delta_{bc} = 59,00$ $\Delta_{ca} = 50,02$
226	3,22	$119,15^\circ$	215,48	$\bar{V}_{AB} = 212,20\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 222,40\angle -121,66^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 212,00\angle 116,75^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,18$ $\Delta_{bc} = 58,69$ $\Delta_{ca} = 49,61$
227	3,30	$119,65^\circ$	219,54	$\bar{V}_{AB} = 216,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,80\angle -121,70^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,00\angle 116,67^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,40$ $\Delta_{bc} = 57,25$ $\Delta_{ca} = 47,83$
228	3,32	$119,90^\circ$	220,57	$\bar{V}_{AB} = 217,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 227,90\angle -121,68^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 217,00\angle 116,66^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,98$ $\Delta_{bc} = 59,13$ $\Delta_{ca} = 49,37$
229	3,34	$120,15^\circ$	213,47	$\bar{V}_{AB} = 210,00\angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 220,60\angle -121,67^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 210,00\angle 116,63^\circ$	$\Delta_{ab} = 54,33$ $\Delta_{bc} = 60,14$ $\Delta_{ca} = 50,69$

N°	VUF [%]	Ângulo de CVUF	V_1 [V]	Tensões de linha [V]	Elevações de temperatura [°C]
230	3,34	119,85°	211,44	$\bar{V}_{AB} = 208,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 218,50 \angle -121,70^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 208,00 \angle 116,63^\circ$	$\Delta_{ab} = 53,63$ $\Delta_{bc} = 59,27$ $\Delta_{ca} = 49,99$
231	3,43	119,90°	217,63	$\bar{V}_{AB} = 214,00 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 225,10 \angle -121,74^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 214,00 \angle 116,54^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,73$ $\Delta_{bc} = 58,85$ $\Delta_{ca} = 48,99$
232	4,01	-68,65°	221,78	$\bar{V}_{AB} = 225,20 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 213,00 \angle -117,51^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 227,40 \angle 123,87^\circ$	$\Delta_{ab} = 51,87$ $\Delta_{bc} = 48,41$ $\Delta_{ca} = 58,81$
233	4,05	-74,80°	218,98	$\bar{V}_{AB} = 221,50 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 210,40 \angle -117,16^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 225,30 \angle 123,81^\circ$	$\Delta_{ab} = 52,36$ $\Delta_{bc} = 47,06$ $\Delta_{ca} = 57,44$
234	4,21	139,46°	217,80	$\bar{V}_{AB} = 210,90 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 226,50 \angle -120,84^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 216,30 \angle 116,01^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,48$ $\Delta_{bc} = 58,51$ $\Delta_{ca} = 48,20$
235	4,59	-118,02°	205,66	$\bar{V}_{AB} = 201,40 \angle 0^\circ$ $\bar{V}_{BC} = 200,80 \angle -115,35^\circ$ $\bar{V}_{CA} = 215,10 \angle 122,45^\circ$	$\Delta_{ab} = 48,31$ $\Delta_{bc} = 51,68$ $\Delta_{ca} = 58,51$