

FICHA CATALOGRÁFICA

FERREIRA FILHO, ANÉSIO DE LELES

Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão [Distrito Federal] 2008.

xxiv, 112p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Doutor, Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Desequilíbrio de tensão

2. Qualidade da energia elétrica

3. Índice de quantificação

4. Normas

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LELES, A. F. F. (200). Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-024/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Anésio de Leles Ferreira Filho.

TÍTULO: Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão.

GRAU: Doutor

ANO: 2008

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

Anésio de Leles Ferreira Filho
SQN 205 Bloco L Apartamento 106, Asa Norte.
70843-120 Brasília – DF – Brasil.

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

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO FATOR DE
DESEQUILÍBRIO FRENTE A VARIAÇÃO DA AMPLITUDE
E DO ÂNGULO DA TENSÃO**

ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO

**ORIENTADOR: MARCO AURÉLIO GONÇALVES DE OLIVEIRA
CO-ORIENTADOR: FRANCISCO ASSIS DE OLIVEIRA NASCIMENTO**

TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PUBLICAÇÃO: PPGENE.TD – 024/08
BRASÍLIA/DF: MAIO – 2008**

AGRADECIMENTOS

Ao imenso desconhecido.

Agradeço ao professor José Carlos de Oliveira por avivar em mim o interesse pela área acadêmica por intermédio da sua didática, motivação e educação, e por prestar-se como exemplo de competência, coerência e profissionalismo.

Ao professor e grande amigo Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira pelo apoio desde o meu primeiro instante na UnB, pela presteza, e pela educação, qualidade marcante, mesmo quando das minhas solicitações absolutamente incoerentes.

Ao também professor e grande amigo Francisco Assis de Oliveira Nascimento pelo afeto e incondicional apoio que, em vários momentos e nas mais diversas situações, despertaram-me para os desafios que um processo de doutoramento ocasiona.

Ao professor Geovany Araújo Borges pelas informações e sugestões que culminaram por fazer-me capaz de aplicar os conceitos estatísticos à engenharia elétrica.

Aos estudantes Marcos Vinícius Chaffim Costa e Diogo Caetano Garcia, ex-membros do grupo de estudos de assuntos relacionados à qualidade da energia, pela parceria que possibilitou o desenvolvimento de parte dos gráficos e de rotinas computacionais fundamentais para as análises executadas e apresentadas, respectivamente, nos capítulos 3 e 4 desta tese. Ao Guilherme Zanetti pela decisiva participação na execução dos ensaios apresentados no capítulo 5 desta tese.

Aos amigos e estudantes da pós-graduação Guilherme, Thompson, Marcos, Rafael, e Valdomiro pelas valiosas sugestões, informações e, sobretudo, contribuições.

À Alessandra, à Valdelice, à Dona Eró, ao Fernando, ao Evangelisto, à Kássia e à Carla, funcionárias do departamento de engenharia elétrica da UnB, pelos esclarecimentos, presteza, e decisivo incentivo.

Aos meus irmãos Arnaldo, Inês, Ronaldo, Mara, Marina, Luís e Cidinha por me permitirem usufruir do “elo” que nos une.

Ao Weberth Ferreira Cordeiro pelo permanente apoio, em qualquer frente que se fez necessária, durante os anos de desenvolvimento da tese.

Aos amigos Leonardo, José Pedrito, Mauri, Carlito, Marlon, André, Elder e Netinho, pela solidariedade e inesgotável prestatividade.

Ao Lélío e a Tânia que eu amo tanto.

À Ana Velia, pelo apoio prestado nos mais diversos e difíceis momentos.

Aos colegas do GSEP pelo apoio e pela oportunidade de ausentar-me das atividades de ensino durante a realização desta empreitada.

À Eletronorte pelo apoio concedido quando da execução do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, intitulado “Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise de grandezas relacionadas a qualidade da energia elétrica”.

**Tudo que sonho ou passo,
O que me falha ou finda,
É como que um terraço
Sobre outra coisa ainda.
Essa coisa é que é linda.**

Fernando Pessoa

**Dedico este trabalho
ao meu pai Anésio, à minha
mãe Nilza, à minha tia
Dindinha,
e ao meu irmão Nei.**

RESUMO

Análise do comportamento do fator de desequilíbrio frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão

Autor: Anésio de Leles Ferreira Filho

Orientador: Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira

Co-orientador: Francisco Assis de Oliveira Nascimento

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, Abril de 2008

Apesar da existência hoje, no Brasil e no mundo, de inúmeros trabalhos onde são abordados temas vinculados à qualidade da energia elétrica, segue incipiente o volume de publicações a respeito do desequilíbrio de tensão. Adicionalmente, vale ressaltar que, caracterizam-se como aspectos de maior concentração de atenção por parte dos pesquisadores de temas vinculados ao desequilíbrio de tensão, a identificação das suas conseqüências e a quantificação do supracitado fenômeno com base no emprego de índices capazes de inter-relacionar seus efeitos com limites que devem ser respeitados para se evitar prejuízos devido à má qualidade da energia elétrica.

Neste íterim e reconhecendo-se a sensibilidade de cargas como o motor de indução às tensões desequilibradas, surgiu a idéia de desenvolvimento deste trabalho, que visa avaliar a eficácia do índice de quantificação do desequilíbrio de tensão mais empregado pelas normas e recomendações em todo o mundo, a saber, o fator K, no que diz respeito à sua correlação com os efeitos provocados pela presença do mencionado fenômeno.

Inicialmente, expõe-se um estudo de avaliação do comportamento do fator K e das componentes de seqüência positiva, negativa e zero frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões. De forma complementar, passa-se à identificação dos lugares geométricos das amplitudes e dos ângulos que culminam em fatores K iguais. Estas investigações prestam-se, dentre outras metas, para subsidiar a última etapa desta pesquisa, quer seja, os ensaios em laboratório que exprimem, de forma prática, os inconvenientes vinculados a utilização do supramencionado índice.

Este trabalho, além de ratificar teoricamente e com base nos ensaios em laboratório, que o fator K é um índice inadequado para a quantificação do desequilíbrio de tensão, assegura a necessidade de novas investigações conducentes a ações que minimizem de forma eficiente, os danosos efeitos que o desequilíbrio pode ocasionar.

ABSTRACT

Analysis of the behavior of the unbalanced factor considering the variation of voltage magnitude and angle

Author: Anésio de Leles Ferreira Filho
Adviser: Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira
Co-adviser: Francisco Assis de Oliveira Nascimento
Electric Engineering Post-graduate Programme
Brasília, April de 2008

Despite the existence of a great number of works concerning themes related to electricity quality both in Brazil and abroad today, the number of publications dealing with voltage imbalance is still small. Moreover, it is worth mentioning that the aspects which receive greater attention from researchers in the field of voltage imbalance are identification of the consequences as well as the quantification of voltage imbalance, having as a basis the indexes which are able to interrelate the effects of this phenomenon with the limits which should be respected in order to avoid damages due to poor electricity quality.

In this context, and recognizing the sensitivity of loads as the induction motor to the voltage imbalance, this work was conceived aiming at evaluating the efficiency of the indexes to quantify voltage imbalance, which are most used by the standards and recommendations world wide, which is the K factor as it is related to its correlation with the effects provoked by the presence of voltage imbalance.

First, a study about the evaluation of the K factor behavior and its components of positive, negative and zero sequence component in the presence of magnitudes and voltage angles variation is carried out. As a complement, the geometric loci of the magnitudes and angles which culminate in equal k factors are identified. These investigations serve, among other objectives, to subsidize the last topic of this research, i.e., the laboratory experiments which demonstrate in a practical way the inconveniences related to the index mentioned above.

This work, apart from ratifying theoretically and based on laboratory experiments that the K factor is an inadequate index for the quantification of voltage imbalance, it also ensures the necessity of new investigations concerning actions which minimize in an efficient way the damaging effects that the imbalance may cause.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 - O CONTEXTO E OS OBJETIVOS DA PRESENTE TESE	3
1.3 - AS CONTRIBUIÇÕES DA TESE	5
1.4 - A ESTRUTURA DA TESE	6
2 - DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	7
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	7
2.2 - DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	7
2.2.1 - Conceituação e apresentação dos métodos de cálculos de desequilíbrio de tensão.....	8
2.2.2 - Causas do desequilíbrio de tensão.....	13
2.2.3 - Efeitos do desequilíbrio de tensão	14
2.2.4 - Normas sobre Desequilíbrio.	15
2.2.4.1 - Síntese das normas e recomendações consultadas.	16
2.2.4.2 - Resumo comparativo sobre as normas apresentadas.	17
2.3 - O ESTADO DA ARTE SOBRE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	18
2.4 - AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO FATOR K – PROCEDIMENTOS E MATERIAIS	23
2.4.1 - Análise do comportamento do fator K.....	23
2.4.2 - Identificação dos lugares geométricos.....	24
2.4.3 - Validação experimental das hipóteses propostas.....	25
2.5 - Considerações finais.....	34
3 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO FATOR K.....	36
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	36
3.2 -Análise do Comportamento do Fator K Frente a Variação das amplitudes e dos Ângulos das Tensões.....	37
3.2.1 - Método das Componentes Simétricas.....	37

3.2.1.1 - Variação das amplitudes das tensões de duas fases	37
3.2.2 - Método do NEMA, do CIGRÉ e do IEEE.....	43
3.3 -Principais aspectos observados na avaliação do comportamento dos índices	46
3.4 -Principais Resultados Gerais.....	51
3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
4 - IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES GEOMÉTRICOS PARA FATORES K IGUAIS	54
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	54
4.2 - IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES GEOMÉTRICOS PARA FATORES K IGUAIS	55
4.2.1- Cálculo analítico.....	55
4.2.2 - Análise gráfica do lugar geométrico das tensões para módulos do fator K iguais	58
4.2.2.1 - Análise gráfica considerando-se a variação das amplitudes das tensões.....	59
4.2.2.2 - Análise gráfica considerando-se a variação dos ângulos das tensões	64
4.2.3 - Síntese dos resultados da avaliação dos lugares geométricos das tensões.....	67
4.3 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA PARA AS CONDIÇÕES ONDE OS MÓDULOS DO FATOR K SÃO IGUAIS.....	71
4.4 - PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO	77
4.4.1 - Efeitos da variação dos ângulos e das amplitudes das tensões	77
4.4.2 - Lugar geométrico das amplitudes das tensões para efeitos iguais	78
4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
5 - – ESTUDO DE EFEITOS - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO	82
5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	82
5.2 - Casos estudados	83
5.3 - Resultados dos ensaios em laboratório.....	87
5.3.1 - Condição ideal de suprimento	87
5.3.2 - Condições não ideais de suprimento	89
5.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97

6 – CONCLUSÕES GERAIS.....99

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....105

APÊNDICE. 107

--

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Índices de conformidade.	19
Tabela 2.2 - Redução da vida útil em função do aumento adicional de temperatura	32
Tabela 3.1 - Valores do fator K para os fasores da Figura 3.3.....	41
Tabela 3.2 - Ângulos do fator K	43
Tabela 3.3 - Valores do fator K para variação de 10% nas amplitudes das tensões.....	46
Tabela 3.4 – Valores máximos do fator K, das componentes de seqüência positiva, negativa e zero, e da média das tensões de fase.....	48
Tabela 3.5 – Valores do fator K e das componentes de seqüência para os fasores da Figura 3.21...51	
Tabela 4.1 - Fasores de tensão para fator K=2%.....	70
Tabela 4.2 - Fasores da tensão para fator K=1.5%.....	71
Tabela 4.3 - Valores máximos e mínimos e faixa de variação dos módulos da componente negativa para fator K igual a 2%, considerando-se a variação dos ângulos das tensões.	74
Tabela 4.4 - Valores máximos e mínimos e faixa de variação dos módulos da componente positiva para fator K igual a 2%, considerando-se a variação dos ângulos das tensões	76
Tabela 5.1- Fasores de tensão para fator K=2%.....	84
Tabela 5.2 - Fasores da tensão para fator K=1.5%.....	85
Tabela 5.3 - Fasores da tensão para fator K=0%.....	86
Tabela 5.4 - Fasores da tensão para fator K=4%.....	87
Tabela 5.5 - Resultados oriundos da aplicação de tensões equilibradas sobre o MIT	88
Tabela 5.6 - Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=2% sobre o MIT.....	91
Tabela 5.7 – Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=2% sobre o MIT.....	94
Tabela 5.8 – Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=1.5% sobre o MIT.....	95
Tabela 5.9 – Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=0% sobre o MIT.....	96
Tabela 5.10 – Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=4% sobre o MIT.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Desequilíbrio de Tensão.....	9
Figura 2.2 - Diagrama fasorial dos componentes simétricos e um sistema trifásico.....	10
Figura 2.3 - Sensores térmicos instalados nas “cabeças de bobina” – Estator..	29
Figura 2.4 - Sensores térmicos instalados nas ranhuras do estator.	29
Figura 2.5 - Sensores térmicos instalados na carcaça.	30
Figura 2.6 - Vista geral do motor de indução.....	30
Figura 2.7 - Esquema de conexão para realização dos experimentos.....	33
Figura 2.8 - Elementos da fonte HP6834A.	34
Figura 2.9 - permite a visualização de todos os equipamentos envolvidos nos ensaios de laboratório.	34
Figura 3.1 - Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases	39
Figura 3.2- Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases– Curvas de nível.....	39
Figura 3.3- Diagramas fasoriais onde tem-se desequilíbrio nas amplitudes das tensões.....	40
Figura 3.4 - Comportamento do ângulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases.....	42
Figura 3.5- Comportamento do ângulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases - Curvas de nível.....	43
Figura 3.6 - Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Método do CIGRÉ.....	45
Figura 3.7 - Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Método do NEMA.....	45
Figura 3.8 - Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Método do IEEE.....	46
Figura 3.9 - Diagramas fasoriais das tensões e diagramas fasoriais do fator K e das componentes de seqüência para condições onde tem-se desequilíbrio nas amplitudes das tensões	50
Figura 4.1 - Lugar geométrico das amplitudes das tensões que culminam no módulo do fator K igual a 2%.....	60

Figura 4.2 - Lugar geométrico das tensões normalizadas por VA que culminam no módulo do fator K igual a 2%, considerando-se os ângulos constante.....	61
Figura 4.3 - Lugares geométricos das amplitudes para alguns valores distintos de ângulos das tensões	62
Figura 4.4 - Lugar geométrico das amplitudes das tensões que culminam no módulo do fator K igual a 0%, com ângulos iguais a -121° e 119°.....	63
Figura 4.5 - Lugar geométrico das amplitudes das tensões que culminam no módulo do fator K igual a 0%, com ângulos iguais a -128° e 101°.....	63
Figura 4.6 - Lugar geométrico das amplitudes normalizadas por VA para alguns valores de fator K, com ângulos das fases B e C iguais a -121° e 119°, respectivamente.....	64
Figura 4.7 - Lugar geométrico das amplitudes normalizadas por VA para alguns valores de fator K, com ângulos das fases B e C iguais a -128° e 101°, respectivamente.....	65
Figura 4.8 - Lugar geométrico dos ângulos das tensões que culminam no módulo do fator K=2%, considerando-se as amplitudes iguais a 220 volts.....	66
Figura 4.9 - Lugar geométrico dos ângulos das tensões que culminam no módulo do fator K igual a 2%, considerando-se as amplitudes iguais a 201 volts.....	67
Figura 4.10 - Lugar geométrico dos ângulos das tensões que culminam no módulo do K igual a 2%, considerando-se as amplitudes iguais a 231 volts.....	67
Figura 4.11 - Lugar geométrico das amplitudes das tensões para fator K=2%, com destaque as tensões que apresentam pelo menos um patamar em 231 ou 201 volts.....	69
Figura 4.12 - Lugar geométrico das amplitudes das tensões para fator K=1.5%, com destaque as tensões que apresentam pelo menos um patamar em 231 ou 201 volts.....	69
Figura 4.13 – Lugares geométricos das tensões para condições onde os módulos de V_2/V_A e do fator K são iguais a 2%, para 3 condições distintas dos ângulos.....	73
Figura 4.14 - Comportamento do módulo da componente negativa para condições onde o fator K é igual a 2%, considerando-se variações dos ângulos de até 1°.....	74
Figura 4.15 - Comportamento do módulo da componente positiva para condições onde o fator K é igual a 2%, considerando-se variações dos ângulos de até 1°.....	75
Figura 4.16 - Lugares geométricos das amplitudes das tensões para V_1 iguais a 210, 215 e 220 volts, para condições onde o fator K é igual a 2%.....	77
Figura 5.1 - Tensões trifásicas de alimentação senoidais.....	89
Figura 5.2 — Elevação da temperatura do enrolamento do estator..	90
Figura 5.3 – Formas de onda empregadas no ensaio 2	92
Figura 5.4 - Formas de onda empregadas no ensaio 3	92

Figura 5.5 - Elevação da temperatura do enrolamento do estator no ensaio 2.	93
Figura 5.6 - Elevação da temperatura do enrolamento do estator no ensaio 3.....	93

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

SÍMBOLOS LATINOS

C	Celsius - Graus	
cv	Cavalo Vapor	
K	- Fator K	
I	- Corrente elétrica	[A]
P	- Potência elétrica ativa	[W]
Q	- Potência elétrica reativa	[Var]
S	- Potência elétrica aparente	[VA]
V	- Intensidade da tensão elétrica	[V]
\bar{V}_A, \bar{V}_B e \bar{V}_C	- Fasores de tensão das fases A, B e C, respectivamente.	[V]
V_A, V_B e V_C	- Valores eficazes das tensões das fases A, B e C, respectivamente.	[V]
$\bar{V}_{a0}, \bar{V}_{a1}$ e \bar{V}_{a2}	- Fasores das tensões das seqüências zero, positiva e negativa da fase A, respectivamente.	[V]
$\bar{V}_{b0}, \bar{V}_{b1}$ e \bar{V}_{b2}	- Fasores das tensões das seqüências zero, positiva e negativa da fase B, respectivamente.	[V]
$\bar{V}_{c0}, \bar{V}_{c1}$ e \bar{V}_{c2}	- Fasores das tensões das seqüências zero, positiva e negativa da fase C, respectivamente.	[V]
\bar{V}_0	- Fator da tensão de seqüência zero	[V]
\bar{V}_1	- Fator da tensão de seqüência positiva	[V]
\bar{V}_2	- Fator da tensão de seqüência negativa	[V]
V_1	- Módulo da tensão de seqüência positiva	[V]
V_2	- Módulo da tensão de seqüência negativa	[V]
V_0	- Módulo da tensão de seqüência zero	[V]
a	- Operador rotacional, cujo módulo é um e o ângulo é 120°	-
V_{ab}, V_{bc} e V_{ca}	Módulo das tensões trifásicas	[V]
ΔV	Máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio	[V]
V_m	Média aritmética dos módulos das tensões trifásicas.	[V]
V_{max}	Maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas	[V]

V_{\min}	Menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas	[V]
X_i	Elemento de um conjunto amostral	
N	Número total de elementos do conjunto amostral	
\bar{x}_i	Elemento i de um vetor de referência	
S	Espaço amostral	
X	Variável aleatória	
FRA	Frequência relativa acumulada	
P_u	Por unidade	
K_{med}	Fator K adquirido a partir dos fasores em avaliação	
K_{cal}	Fator K calculado após a modificação sugerida pelo algoritmo	

SÍMBOLOS GREGOS

θ	Ângulo de tensão ou corrente	[graus]
ω	Frequência angular	[rad/s]
μ	Média aritmética	
φ	Média quadrática	
σ	Desvio padrão	
ξ	Coefficiente de semelhança	
α	Vetor de parâmetros do sistema	
ζ	Vetor de comportamento dinâmico do sistema	

SIGLAS

AMT	- Afundamento Momentâneo de Tensão
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	- American National Standards Institute
ASD	- Acionamento com velocidade variável
ATT	- Afundamento Temporária de Tensão
CBEMA	- Computer and Business Equipment Manufactures Association
CENELEC	- Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

CIGRÉ	- Conseil International des Grands Réseaux Électriques
DHT	- Distorção harmônica total
DNAEE	- Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ELECTROTEK	- Electrotek Concepts, Inc.
ELETROBRÁS	- Centrais Elétricas Brasileiras SA
ELETRONORTE	- Centrais Elétricas do Norte do Brasil S. A.
EMT	- Elevação Momentânea de Tensão
EPRI	- Electric Power Research Institute
EPRI	- Electric Power Research Institute
ETT	- Elevação Temporária de Tensão
GCOI	- Grupo Coordenador para a Operação Interligada
GCPS	- Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos
IEC	- International Electrotechnical Commission
IEEE	- Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT	- Interrupção Momentânea de Tensão
ITIC	- Information Technology Industry Curve
ITT	- Interrupção Temporária de Tensão
MIT	- Motor de indução trifásico
NEMA	- National Electrical Manufacturers Association
NRS	- National Rationalised Specification
NTSCE	- Norma peruana sobre qualidade da energia
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
QEE	- Qualidade da Energia Elétrica
RMS	- Root Mean Square (valor eficaz)
SEMI	- Semiconductor Equipment and Material International
UNIPED	- Union of International Producers and Distributors of Elect. Energy
VTCD	- Denominação das Variações de Tensão de Curta Duração

1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, estudiosos de diversos países têm enveredado esforços para a normalização, a quantificação, a identificação de causas e efeitos, e a redução das conseqüências dos fenômenos vinculados à qualidade da energia elétrica. Contudo, observados os resultados e analisadas as linhas de pesquisas exploradas, detecta-se a necessidade de novas investigações a respeito do desequilíbrio de tensão.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em parceria com universidades, centros de pesquisa, fabricantes de equipamentos e consumidores, têm executado algumas campanhas de medição e coordenado diversos fóruns de debates destinados à elaboração e à adaptação dos documentos que comporão a resolução brasileira que versa sobre a qualidade da energia elétrica no sistema de distribuição (ANEEL, 2000a). Com tais atividades, espera-se obter normas que venham a refletir apropriadamente a realidade nacional concernente ao desempenho da rede e à qualidade da energia.

Entretanto, confrontando-se os documentos procedentes das referidas ações com o que se tem consolidado na literatura atinente, pode-se verificar a existência da correlação entre os métodos e critérios internacionais e o que vem sendo praticado nas recomendações e (ou) normas brasileiras em eletricidade, haja vista as suas semelhanças. Embora não se constitua um fato absolutamente inesperado, facilmente observa-se a manutenção de limites e metodologias adotadas e adaptadas pela ANEEL e o ONS, dentre outros órgãos, oriundas, sobretudo, de pesquisas de grupos de trabalho do International Electrotechnical Commission (IEC) e do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

Por se tratarem de questões envolvendo comportamentos aleatórios no tempo, função inclusive de conexões e desligamentos de cargas do sistema, conforme atestam algumas publicações (Souto, 2001) e (Dugan, 1998), torna-se premente uma investigação minuciosa sobre a conveniência dessa prática. Neste caso, medições de campo que evidenciem a realidade dos nossos sistemas nos dias atuais, em conjunto com uma minuciosa

investigação sobre a eficácia dos índices empregados para a quantificação das ditas grandezas, caracterizam-se como ações providenciais.

Em outra frente de pesquisa, mas também em consonância com as demandas do momento, especialistas da área têm desenvolvido e encorajado investigações destinadas à determinação de índices de quantificação do desequilíbrio, que expressem adequadamente os possíveis efeitos causados por uma rede com tensões desbalanceadas. Por se tratar de um problema que envolve cinco variáveis, a saber, as três amplitudes e os dois ângulos das tensões, quase sempre obtêm-se resultados úteis para condições específicas, as quais podem não representar a maioria dos casos práticos (Wang, 2000).

Hoje, sabe-se que a presença de altos níveis de desequilíbrio provocam, dentre outros problemas, perdas excessivas, sobreaquecimento, solitação do isolamento e redução da vida útil de motores e transformadores, e o acionamento indevido dos seus sistemas de proteção, levando à parada dos processos de produção. Ademais, sob tais condições, pode ocorrer a circulação de correntes harmônicas não características, tornando ainda mais árdua a tentativa de mitigação dos seus efeitos.

Logo, caracteriza-se como relevante nesta fase de elaboração das recomendações e normas, ponderar criteriosamente sobre a adoção, proposição e definição de metodologias, índices de avaliação e limites toleráveis, visando-se a uma identidade do ponto de vista físico e a uma correspondência evidente e inter-relacionada com aspectos fundamentais da qualidade da energia e suas implicações, quais sejam:

- Operação normal do sistema;
- Atendimento aos consumidores dentro de padrões de qualidade satisfatórios;
- Preservação da vida útil de elementos e equipamentos do sistema de forma aceitável;
- Eficiência energética;
- Atribuições de responsabilidades; e
- Questões de caráter econômico e legal.

Com base nos aspectos citados, apresentam-se neste trabalho os resultados de investigações teóricas e práticas, sustentadas por equacionamentos matemáticos, inúmeras simulações computacionais e análises oriundas de ensaios em laboratório. Tais pesquisas

visam, dentre outras metas, avaliar a eficácia do índice de quantificação do desequilíbrio de tensão mais empregado pelas normas e recomendações em todo o mundo, a saber, o fator K, no que diz respeito à sua correlação com os efeitos provocados pela presença do mencionado fenômeno.

1.2 - O CONTEXTO E OS OBJETIVOS DA PRESENTE TESE

Atualmente no Brasil, conforme consta em (ANEEL, 2005), encontra-se em fase de elaboração a resolução que institui os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica para redes de distribuição, considerando-se a qualidade do produto e do serviço prestados. Na apresentação de cada fenômeno de qualidade abordado neste documento, são estabelecidos a terminologia, a metodologia de medição, a instrumentação e os valores de referência.

Para o sistema de transmissão, tem-se desde maio de 2002, segundo (ONS, 2002), os “Padrões de Desempenho da Rede Básica”. Seu propósito é subsidiar os usuários conectados, ou que requeiram conexão, com informações necessárias sobre os padrões de desempenho a serem atendidos pelo sistema em questão.

Nos referidos documentos e considerando-se a grandeza desequilíbrio de tensão, observam-se metodologias de medição alicerçadas em um período de amostragem igual a 10 minutos, num intervalo de 7 dias consecutivos. Ademais, são utilizados como indicadores, para comparação com os limites das normas, os valores que foram superados em apenas 5% dos registros obtidos, calculados com base em uma das duas metodologias que serão devidamente explicitadas no item 2.2.1 do capítulo 2 desse trabalho (Método das componentes simétricas e do Cigré).

De fato, com a execução de medições que respeitem essas condições, obtêm-se diversos valores dos indicadores relacionados ao supracitado fenômeno, destinados a abranger o ciclo de operação de cargas ou processos, bem como o efeito de um ou mais consumidores envolvidos. Considerando-se que as recomendações e normas estabelecem entre outros aspectos, valores limites para tais índices, os quais devem ser respeitados, torna-se possível a caracterização e a classificação das barras e (ou) dos pontos de interesse (ONS, 2002).

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

Contudo, sabe-se que para se evitar e reduzir efeitos nocivos de forma eficaz, necessariamente deve-se percorrer a etapa de conhecimento do comportamento dos índices de quantificação dos desequilíbrios mediante a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões.

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

- A quantificação de um fenômeno como o desequilíbrio de tensão requer metodologias que mantenham uma elevada correlação com os seus possíveis efeitos em equipamentos do sistema elétrico. Hoje, os mesmos não apresentam fundamentação e justificativas claras quanto às suas escolhas e aplicações;
- Os equipamentos modernos apresentam ampla diversidade de modelos e de características e, em consequência, sensibilidades diferentes aos possíveis valores de tensão que constituem o desequilíbrio;
- Não há padrões de desempenho ou de imunidade de equipamentos submetidos às diversas condições de desequilíbrio de tensão; e
- A atenuação de tal fenômeno requer, em alguns casos, soluções de custo elevado.

A idéia desta tese origina-se no reconhecimento e exame desses aspectos, considerando-se que satisfazer determinados métodos de cálculos do desequilíbrio, limites de normas, e ações para correção do mesmo, ambos desnecessariamente rígidos, constitui um contrasenso que pode implicar em gastos e (ou) penalizações indevidos.

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

- a) Analisar o comportamento do módulo e do ângulo do fator K e das componentes de seqüência mediante a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões. A partir desses resultados, torna factível a determinação dos possíveis inconvenientes relacionados aos seus empregos;

- b) Identificar graficamente e analiticamente o lugar geométrico das amplitudes e dos ângulos das tensões que culminam em fatores K idênticos. Desenvolver uma análise investigativa do comportamento dos já mencionados índices para condições onde os fatores K apresentam módulos iguais.
- c) Executar uma reflexão crítica sobre a aplicabilidade dos módulos e dos ângulos do fator K e das componentes negativa e positiva para a quantificação do desequilíbrio.
- d) Averiguar a eficácia das hipóteses de emprego do ângulo do fator K e da componente positiva agregada ao módulo do fator K.
- e) Efetuar em laboratório, testes estrategicamente desenvolvidos para se examinar a eficiência do fator K na representação dos efeitos do desequilíbrio de tensão sobre uma carga do sistema elétrico.

1.3 – AS CONTRIBUIÇÕES DA TESE

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

- 1) Análise crítica do comportamento do fator K e das componentes negativa e positiva frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões. Para todos estes casos, são abordados os módulos e os ângulos de cada índice em avaliação. Trata-se de um avanço, comparado aos trabalhos efetuados até então, que se mantiveram focados a condições bastante específicas quanto aos valores de amplitudes e ângulos das tensões.
- 2) Identificação dos lugares geométricos das amplitudes e dos ângulos das tensões que culminam em fatores K iguais. Os trabalhos que discorrem sobre este tema, focalizam somente os valores de amplitudes que conduzem a um fator K constante.
- 3) Geração e emprego em laboratório de um guia de testes que possibilita a comprovação prática da existência de inconvenientes ligados ao emprego do fator K para a quantificação do desequilíbrio de tensão.
- 4) Provimento de material didático com bibliografia ampla e atualizada a respeito dos assuntos pesquisados.

1.4 – A ESTRUTURA DA TESE

Tendo em mente os objetivos e as contribuições desta pesquisa e mencionado o corrente capítulo, esta tese será composta de acordo com a estrutura exibida a seguir.

O capítulo 2 é destinado a apresentar um resumo dos principais fundamentos associados à qualidade da energia, evidenciando com maior propriedade o desequilíbrio de tensão dos sistemas elétricos de potência, e sobretudo, as normas e (ou) recomendações nacionais e internacionais referentes a este tópico. São ainda abordados os métodos e os materiais adotados para se concretizar os objetivos dessa tese.

O capítulo 3 é direcionado à avaliação do comportamento do fator K e das componentes de seqüência frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões. Efetua-se ainda um estudo da aplicabilidade dos ângulos do fator K e das componentes de seqüência para análises de desequilíbrio.

O capítulo 4 é dirigido à identificação das condições de desequilíbrio que conduzem ao mesmo valor de fator K. Serão também investigados os comportamentos dos ângulos do fator K e das componentes de seqüência para as amostras de tensões onde o fator K apresenta o mesmo módulo.

O capítulo 5 descreve os resultados adquiridos quando da aplicação sobre um equipamento do sistema elétrico, de diversas condições de desequilíbrio, estrategicamente escolhidas, com vistas à comprovação prática da existência de inconvenientes relacionados à utilização do fator K para a quantificação do desequilíbrio de tensão.

O capítulo 6 ilustra as principais discussões e conclusões da tese como um todo, as suas contribuições relevantes, bem como sugestões vislumbrando trabalhos futuros com base nos desenvolvimentos alcançados.

2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No passado, desafios diários direcionaram especialistas a estudos e à abordagem de alguns fenômenos elétricos, quase sempre tratados isoladamente. Entretanto, a demanda por resultados técnicos e (ou) econômicos mais eficientes, impulsionou mudanças neste cenário, culminando na intensificação do desenvolvimento qualitativo dos processos de produção, sobretudo em países desenvolvidos. Em virtude desse acontecimento, a ótica de análise foi modificada, intentando-se abarcar em um único tema uma série de novos e de antigos princípios. Nasceu o conceito de qualidade da energia, atrelado a um conjunto de alterações, às quais o fornecimento de energia elétrica aos consumidores está suscetível (Bronzeado, 2002). Como parte dos fenômenos tratados nesta linha de pesquisa encontra-se o desequilíbrio de tensão.

Considerando-se a importância desses fatos, bem como os objetivos desta tese, este capítulo visa apresentar a definição e os principais tópicos que compõem o termo desequilíbrio de tensão. É dado um enfoque à conceituação e aos seus métodos de cálculo. São abordadas suas causas e efeitos sobre os equipamentos da rede elétrica. Expõem-se os principais itens que constituem as normas internacionais e nacionais. Em seguida, são citados e comentados os resultados de um levantamento bibliográfico referente à quantificação do desequilíbrio e seus efeitos sobre os equipamentos do sistema.

Adicionalmente, este capítulo visa apresentar os métodos e os materiais adotados para se concretizar os objetivos desta tese. Neste item, são elencadas e justificadas as ações e os materiais que viabilizarão a determinação dos resultados a serem ilustrados nas próximas etapas deste estudo.

2.2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Neste item são apresentados os conceitos, os métodos de cálculo, as causas, os efeitos e as normas voltadas para o desequilíbrio de tensão.

2.2.1 – Conceituação e apresentação dos métodos de cálculos do desequilíbrio de tensão

Um sistema elétrico trifásico equilibrado é constituído por tensões iguais em módulo e defasadas entre si de 120° elétricos, 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.

Desse modo, define-se desequilíbrio de tensão no sistema elétrico trifásico como uma condição na qual as fases apresentam tensões com módulos distintos entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente (ONS, 2002).

A Figura 2.1 apresenta uma ilustração com ondas de tensão de um sistema trifásico desequilibrado, onde é destacada uma alteração no módulo da fase A e no ângulo da fase B. Como pode ser observado pela Figura 2.1, tem-se um desequilíbrio causado pela redução da amplitude da fase A e pela defasagem angular diferente de 120°.

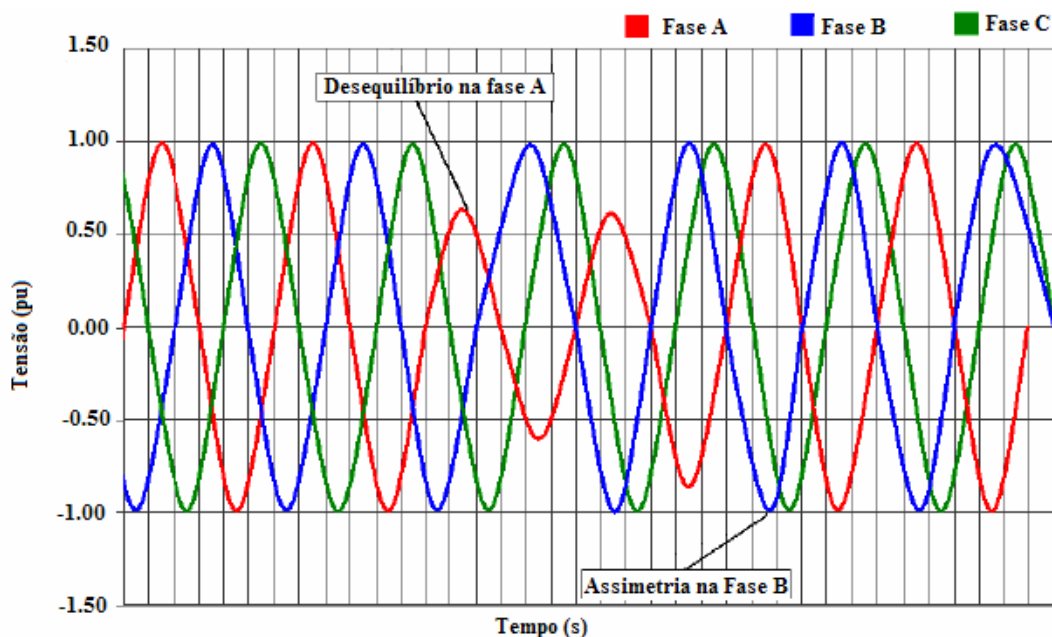


Figura 2.1 – Desequilíbrio de Tensão

Na literatura atinente são mais comumente empregadas 4 (quatro) metodologias para a obtenção do fator de desequilíbrio de tensão, denominado fator K. Mediante o fato de alguns instrumentos de medição não disponibilizarem os ângulos das tensões, métodos alternativos de cálculo foram criados. Tais metodologias fazem uso apenas das amplitudes das tensões trifásicas. Nesta seção, são expostos todos os passos para o cálculo do fator K com base no emprego dos supraditos processos.

Método 1 - Componentes Simétricas

O método das Componentes Simétricas é alicerçado nos estudos de Fortescue que datam do ano de 1918 (Almeida e Freitas, 1995). O Teorema de Fortescue diz:

Qualquer grupo desequilibrado de n fasores associados, do mesmo tipo, pode ser resolvido em n grupos de fasores equilibrados, denominados componentes simétricas dos fasores originais.

Assim, um sistema trifásico desequilibrado com seqüência de fases ABC (Almeida e Freitas, 1995), pode ser decomposto em três sistemas simétricos e equilibrados, a saber:

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

A Figura 2.2 ilustra o diagrama fasorial das componentes simétricas de um sistema trifásico desequilibrado.

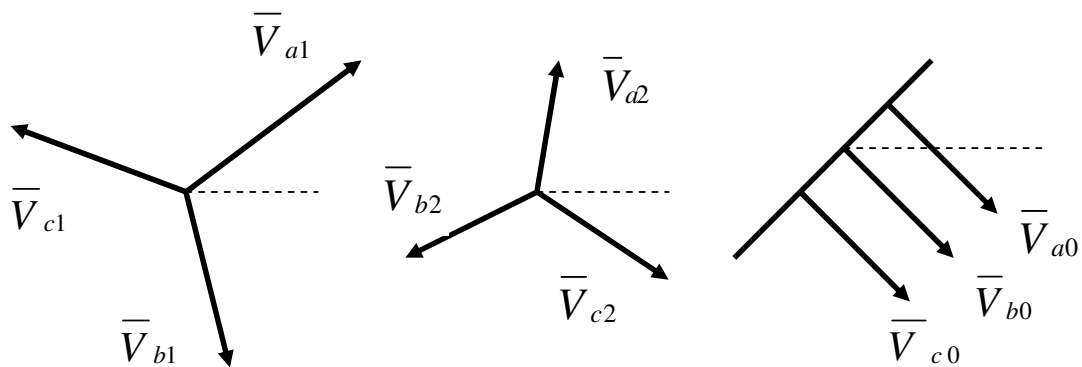


Figura 2.2 – Diagrama fasorial das componentes simétricas de um sistema trifásico

Fonte: Almeida (1995). “Circuitos Polifásicos”, Apoio da Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos – FINATEC, Tecnológicos – FINATEC, Brasília, Figura 3, página 5.

Onde,

\bar{V}_{a0} , \bar{V}_{a1} e \bar{V}_{a2} são os fasores das tensões das seqüências zero, positiva e negativa da fase A, respectivamente.

\bar{V}_{b0} , \bar{V}_{b1} e \bar{V}_{b2} são os fasores das tensões das seqüências zero, positiva e negativa da fase B, respectivamente.

\bar{V}_{c0} , \bar{V}_{c1} e \bar{V}_{c2} são os fasores das tensões das seqüências zero, positiva e negativa da fase C, respectivamente.

A determinação analítica das componentes simétricas se dá com base na chamada matriz de Fortescue, equação (2.4).

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Onde,

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

\bar{V}_0 é o fasor da tensão de seqüência zero.

\bar{V}_1 é o fasor da tensão de seqüência positiva.

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

O desequilíbrio de tensão é dado pela razão entre os módulos da tensão de seqüência negativa e positiva (ANEEL, 2000b), conforme a equação (2.5).

$$K\% = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (2.5)$$

Onde:

V_2 é o módulo da tensão de seqüência negativa.

V_1 é o módulo da tensão de seqüência positiva.

Sendo

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{3} \left(\bar{V}_a + a^2 \bar{V}_b + a \bar{V}_c \right) \quad (2.6)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{1}{3} \left(\bar{V}_a + a \bar{V}_b + a^2 \bar{V}_c \right) \quad (2.7)$$

Segundo a ANEEL (2000b), dentre os métodos de quantificação, este é o que melhor representa o grau de desequilíbrio devido à abordagem simultânea das amplitudes e dos ângulos das tensões. Ademais, a presença da componente de seqüência negativa está

intimamente ligada aos efeitos de mau funcionamento e interferências em diversos equipamentos conectados ao sistema.

Há de se ressaltar que, a razão entre os fasores de componente negativa e positiva gera o módulo do fator K e também o seu ângulo. Este ângulo, 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 e Freitas, 1995).

Método 2 – CIGRÉ

Recomendado pelo International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ), este procedimento emprega uma expressão para o fator de desequilíbrio com base em uma grandeza adimensional que correlaciona as tensões de linha (ANEEL, 2000b), conforme apresentado na equação (2.8).

$$K \% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 \quad (2.8)$$

Onde,

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (2.9)$$

Sendo:

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

Método 3 – NEMA

A norma NEMA–MG–14.34 enuncia o fator K como a relação entre o máximo desvio da tensão média e a tensão de linha média (ANEEL, 2000b), em conformidade com a equação (2.10).

$$K\% = \frac{\Delta V}{V_m} \times 100 \quad (2.10)$$

Onde,

ΔV é o máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio;

V_m é a média aritmética dos módulos das tensões trifásicas de linha.

Método 4 – IEEE

Para a apreciação do nível do desequilíbrio de um sistema, o IEEE recomenda a relação expressa pela maior diferença entre as tensões de linhas medidas e o somatório das mesmas (ANEEL, 2000b), conforme apresentado na equação (2.11).

$$K\% = \frac{3(V_{\max} - V_{\min})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} \times 100 \quad (2.11)$$

Onde:

V_{\max} é o maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

V_{\min} é o menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

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

2.2.2 – Causas do desequilíbrio de tensão

Pode-se citar como causas do desequilíbrio de tensão os seguintes aspectos:

- 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, particularmente na área de 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.
- Banco de capacitores deteriorado e (ou) com fusíveis de proteção rompidos;
- Motores elétricos com impedâncias desequilibradas;
- Níveis divergentes de distorção harmônica nas fases do sistema elétrico; e
- Presença de interrupções, afundamentos, sub-tensões, sobretensões, transitórios elétricos, etc..

De fato, as principais fontes de desequilíbrio de tensão são as cargas monofásicas e trifásicas desequilibradas, uma vez que as correntes absorvidas nas três fases não são simétricas em módulo nem exibem defasagem angular de 120° . Contudo, devido às suas características elétricas não-uniformes, as linhas de transmissão inadequadamente transpostas também caracterizam-se como elementos que geram desequilíbrio (ANEEL, 2000a).

2.2.3 – Efeitos do desequilíbrio de tensão

A presença de tensões desequilibradas nos sistemas elétricos industriais de potência compõe-se como um dos mais habituais itens de comprometimento do suprimento elétrico. Seus efeitos nos diversos equipamentos elétricos estabelecem-se como nocivos, tendo em vista que um pequeno desequilíbrio nas tensões de alimentação, resulta num elevado nível de desequilíbrio nas correntes absorvidas e, conseqüentemente, motiva sobreaquecimento.

Os mais comuns efeitos presentes em equipamentos do sistema elétrico submetido a desequilíbrio de tensão (ANEEL, 2000a) são:

- Surgimento de correntes de seqüência negativa: tratam-se dos principais causadores de conjugados amortecedores e sobreaquecimento adicional nas máquinas rotativas em corrente alternada (CA) síncronas e assíncronas;
- Manifestação de harmônicos não característicos devido a disparos desiguais nas válvulas retificadoras controladoras de equipamentos e cargas;

- Funcionamento inadequado, sobreaquecimentos e falhas dos dispositivos de proteção com redução da vida útil;
- Sobreaquecimento nos condutores acarretando uma maior solicitação do isolante. Implica-se na diminuição da vida útil e no aumento das perdas; e

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

2.2.4 – Normas sobre Desequilíbrio

Nesta etapa do corrente capítulo, são enfocadas questões relacionadas às normas internacionais e nacionais que versam sobre o desequilíbrio de tensão. Expõem-se as definições e caracterizações gerais aplicáveis aos indicativos do dito fenômeno, em conjunto com uma síntese das principais normas e recomendações consultadas e, finalmente, um quadro resumo comparativo para melhor visualização dos conteúdos dos diversos documentos (ANEEL, 2000b).

É importante ressaltar que, atualmente, grupos de trabalho têm atuado na elaboração da norma brasileira para a distribuição, alicerçados nos documentos que compõem as normas internacionais. De fato, esta normalização está sendo desenvolvida pela ANEEL em conjunto com concessionárias e representantes dos consumidores industriais, comerciais e residenciais.

2.2.4.1 – Síntese das normas e recomendações consultadas

Apresentam-se, a seguir, as normas e recomendações utilizadas no Brasil e em outros países para o controle da Qualidade da Energia Elétrica com relação aos índices de conformidade para o desequilíbrio de tensão.

– Recomendação Brasileira - GCOI/GCPS

O fator de desequilíbrio de tensão K , para fins de estabelecimento de limites, de acordo com a recomendação GCOI/GCPS, é definido como a relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva da tensão, expressa em porcentagem desta última componente, conforme a equação (2.5).

A presente recomendação indica que, para qualquer ponto do sistema, o fator de desequilíbrio de tensão provocado pela operação conjunta de todos os consumidores deve ser menor ou igual a 2%. Já, o mesmo fator, provocado por um único consumidor, não deve ultrapassar 1,5%.

Muito embora a recomendação em questão tenha se referido ao desequilíbrio na forma da relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva, o último documento do GCOI/GCPS também estabelece como expressão para o cálculo do fator de desequilíbrio (K), a equação (2.8), referente ao método do CIGRÉ.

- Procedimentos de Rede

O indicador para avaliar o desequilíbrio de tensão nos barramentos da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) é o fator de desequilíbrio de tensão (K), que exprime a relação entre as componentes de seqüência negativa (V_2) e seqüência positiva (V_1) da tensão, expresso em termos percentuais da componente de seqüência positiva, equação (2.5). O limite global nos barramentos da Rede Básica é de 2%.

O valor do indicador a ser comparado com o valor padrão será assim obtido:

- (a) Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros amostrados no período de 1 dia (24 horas), ao longo de 7 (sete) dias consecutivos;

- (b) O valor do indicador corresponde ao maior dentre os sete valores adquiridos, anteriormente, em base diária.

Caso as tensões de seqüência negativa variem de forma intermitente e repetitiva, será permitido que os limites especificados sejam ultrapassados em até o dobro, desde que a duração cumulativa das tensões de seqüência negativa, acima dos limites contínuos estabelecidos, não ultrapasse 5% do período de monitoração.

– **Recomendação IEC**

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

– **Norma Européia CENELEC**

A norma EN50160 estabelece que, sob condições normais de suprimento, durante o período de uma semana, 95% dos valores RMS da componente de seqüência negativa devem estar na faixa de 0 a 2% da componente de seqüência positiva. Tais valores RMS consistem da média dos pontos medidos durante 10 (dez) minutos consecutivos. Em algumas áreas, onde partes dos consumidores são atendidos em ligações monofásicas ou bifásicas, pode-se admitir desequilíbrios de até 3%. Nessa norma, são considerados apenas os valores para as componentes de seqüência negativa

2.2.4.2 – Resumo comparativo sobre as normas apresentadas

Verifica-se que as normas utilizam quatro métodos para o cálculo do fator K. A Tabela 2.3 ilustra uma comparação dos índices de conformidade apresentados neste trabalho.

A CENELEC permite, em algumas áreas, onde parte dos consumidores são monofásicos ou bifásicos, que o índice de conformidade seja de 3%. Verifica-se que a maioria das normas limita em 2% o desequilíbrio de tensão. Isto mostra que os índices de conformidade convergem para este valor.

Tabela 2.1 – Índices de conformidade

Fonte: ANEEL (2000b). “Relatório Parcial 4 - Contribuições para a Normalização da Qualidade da Energia - Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas. Relatório Parcial 4 – Estado da Arte.”, Tabela 2 da página 83.

Indicação / Norma	Método de cálculo do fator k	Limite
Medimentos de Rede	$K \% = \frac{V_2}{V_1} \times 100$	2%
IEC	$K \% = \frac{V_2}{V_1} \times 100$	2%
IOI/GCPS	$\times 100 \text{ ou } K \% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100, \text{ onde}$ $\beta = \frac{ V_{ab} ^4 + V_{bc} ^4 + V_{ca} ^4}{(V_{ab} ^2 + V_{bc} ^2 + V_{ca} ^2)^2}$	2%
ENELEC	$K \% = \frac{V_2}{V_1} \times 100$	2%

2.3 - O ESTADO DA ARTE SOBRE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

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

Inicialmente, é relevante ressaltar que a maioria das recomendações e normas que versam sobre desequilíbrio de tensão ao redor do mundo, faz uso do fator K para a sua quantificação, e ainda exhibe limites para o mesmo. Contudo, é de conhecimento de especialistas da área, que várias condições de desequilíbrio que podem produzir efeitos diferentes sobre equipamentos do sistema, conduzem a um mesmo valor do fator K, fato este não considerado nos documentos normativos. Assim sendo, a identificação dessas condições necessita de uma investigação minuciosa visando a uma abordagem ampla e que

avaliar o comportamento de índices relacionados à quantificação do desequilíbrio, como as componentes de seqüência.

Alguns autores como Lee (1997), Wang (2001), Siddique (2004), Faiz (2004), Kersting (2001), têm apresentado estudos que ratificam, para algumas condições específicas, que diversas características relacionadas ao desempenho e à vida útil de elementos do sistema, se dão de maneira distinta para cada condição de desequilíbrio. Este fato tem produzido um aumento no número de publicações que buscam narrar a situação exata do sistema com relação aos desequilíbrios, do ponto de vista físico.

Com o intuito de exibir a diferença entre os efeitos observados em um motor submetido a alguns fasores de tensão que conduzem ao mesmo valor de fator K, Lee (1997) idealizou 8 condições de desequilíbrio. Três delas são tomadas quando se tem uma, duas ou três fases com amplitudes acima da nominal. Outras três ilustram os valores de tensão abaixo do nominal, e finalmente, as duas remanescentes são definidas para módulos semelhantes entre si, com duas ou três defasagens angulares diferentes de 120° . Para essas 8 condições e com K igual a 4%, o autor submeteu um motor a ensaios laboratoriais, o que culminou em diferentes patamares de eficiência, perdas, fator de potência e temperatura, corroborando com a sua proposição inicial. Para mitigar o problema enunciado de quantificação do desequilíbrio, Lee (1997) sugere o emprego do módulo da componente de seqüência positiva em conjunto com o valor do K. Ele afirma no seu trabalho que, em determinadas condições de desequilíbrio, para tensões acima e abaixo da nominal, a componente positiva exibirá valores, respectivamente, superiores e inferiores à tensão nominal.

Ressalta-se, entretanto, que os desequilíbrios no sistema não ocorrem de forma segregada como apresentado por Lee (1997). Condições onde se têm somente amplitudes acima ou abaixo do valor nominal, não se caracterizam como as únicas presentes no sistema. Os ângulos das tensões também exibem variações. Em geral, as condições supranumeradas estão inter-relacionadas, tornando ainda mais difícil a tarefa de se extrair informações úteis com relação aos efeitos dos desequilíbrios.

Em 2004, Siddique publicou um estudo similar ao descrito por Lee (1997), evidenciando que alguns efeitos variam segundo as mudanças das condições de desequilíbrio. O autor também propõe a análise da seqüência positiva como complemento ao fator K. Nesse

trabalho, identificam-se restrições relacionadas às possíveis combinações dos fasores de tensão.

Visando propor um avanço na metodologia de quantificação do desequilíbrio, do ponto de vista dos efeitos, Wang (2001) sugere a utilização do ângulo do fator K como complemento da análise. O autor afirma que o módulo do fator K determina o nível de desequilíbrio, e o ângulo presta-se para exibir a sua condição. Tem-se ilustrado um gráfico das correntes nas três fases do estator de um MIT em função do ângulo do K, considerando-se a sua amplitude constante. Para todas as simulações, o autor parte da premissa de que os ângulos das tensões estão perfeitamente equilibrados. Naturalmente, essa é uma consideração que não se verifica na grande maioria dos casos práticos, podendo tornar a metodologia sem utilização para análise de dados reais.

Em (Faiz, 2004), o autor assegura que os métodos disponíveis para o cálculo do desequilíbrio não são completos, por não exporem a condição em que se encontram os fasores de tensão. Ele defende a idéia de criação de um fator de desequilíbrio mais preciso, para se alcançar resultados fidedignos, do ponto de vista físico. Fundado na utilização de alguns métodos de cálculo do desequilíbrio de tensão, obtém-se um gráfico com o lugar geométrico das tensões trifásicas que conduzem a um K de 6%.

Para reduzir o número de possibilidades de amplitudes de tensões que direcionam a um mesmo K, o autor propõe que seja informado um valor constante da componente de seqüência positiva em conjunto ao valor do fator K. Dessa forma, o lugar geométrico das tensões se reduz a uma elipse. Contudo, é importante ressaltar que a hipótese de uma componente de seqüência positiva constante implica na presença de erros justificados pela exclusão de uma série de situações onde esse valor varia.

Ainda como uma proposição para minimizar a imprecisão no processo de quantificação do desequilíbrio, Wang (2001) propôs o emprego conjunto do lugar geométrico para K constante, com o módulo e o ângulo do K. Nessas condições, o autor efetuou uma análise do conjugado, da potência de saída e da eficiência de um motor, para um mesmo valor de desequilíbrio. Partindo da coleta de amostras em um período de uma semana de medição, onde aplicou-se sobre um motor diferentes valores de amplitude de tensões trifásicas culminando em valores de fator K iguais, constatou-se a existência de diferentes características de conjugado e eficiência da máquina.

Kersting (2001) também atesta que, a compreensão da condição dos fasores das tensões é de fundamental importância, haja vista os diferentes efeitos encontrados sobre o motor, submetido a valores de fator K iguais.

Os trabalhos citados até então fazem menção, sobretudo, à tentativa de se detectar uma metodologia suficientemente adequada para quantificar o desequilíbrio, considerando-se os efeitos reais que se observa nas cargas. Contudo, detecta-se na literatura atinente, algumas pesquisas que se mantêm ao longo dos anos, voltadas à determinação de efeitos dos desequilíbrios sobre equipamentos do sistema elétrico.

Na verdade, desde 1954 pesquisas sobre efeitos de desequilíbrio em motores de indução trifásicos (MIT) têm mencionado resultados que comprovam a diminuição da eficiência dos motores submetidos aos desequilíbrios de tensão (Willians, 1954).

Em 1959, os efeitos dos desequilíbrios como o aumento da temperatura dos MIT, começaram a ser noticiados. Observou-se que acréscimos na intensidade de calor nesse tipo de equipamento conduzem à redução da sua vida útil (Gafford, 1954).

Brancato (1992) apresenta aspectos gerais referentes à vida útil dos motores. Na verdade, há uma discussão da vida útil de diferentes partes constituintes do motor em conjunto com a exposição de alguns métodos para determinar a perda de vida. Destaca-se dentre as metodologias investigadas, uma que serve-se da equação de Arrhenius para estimar a vida útil da isolação quando da operação em temperaturas superiores à nominal.

Wang (2000) exhibe um estudo analítico do desempenho em regime permanente de motores de indução trifásicos alimentados por tensões desequilibradas. Detectou-se a influência da magnitude do fator K na operação do motor. O estudo evidencia dois pontos em especial, a saber: tensões desequilibradas causam correntes de linha desequilibradas, e a sensibilidade do desequilíbrio de corrente em relação ao de tensão, pode ser alcançada pela razão entre as impedâncias de seqüência positiva e negativa do motor.

Segundo Emanuel (2002), em função da intensa aplicação dos motores de indução em sistemas industriais, comerciais e residenciais, estudos apontaram que os Estados Unidos têm prejuízos de 1,8 bilhões de dólares por ano com os efeitos dos desequilíbrios de tensão na vida útil de motores de indução, associados às distorções harmônicas. Considerando-se cerca de 25 parâmetros, ele apresenta um modelo térmico do motor e uma equação de

expectativa de vida, que aplicada, culminou em um gráfico de perda de vida útil em função do valor do K para 5 motores diferentes. O autor ressalta que a sensibilidade dos motores com relação a harmônicas e desequilíbrios, é dependente do tamanho e do tipo do motor. De fato, constata-se que os motores menores são menos sensíveis que os maiores.

Pillay (2006) exhibe uma estimativa da perda de vida útil de motores de indução trifásicos alimentados por tensões desequilibradas em conjunto com sub e sobretensões. Nessa referência o autor define a perda de vida útil do motor partindo da isolação do enrolamento do estator. Propõem-se testes para se obter o modelo térmico do motor, e por conseguinte, utilizar a equação de Arrhenius para estimação da sua vida útil.

Com vistas ao estudo do desempenho de motores de indução sob condições não-ideais de suprimento, Souto (2001) destaca um modelo térmico para um motor. Através das equações de temperatura propostas, determina-se a vida útil da máquina. Os resultados computacionais foram comparados com valores experimentais obtidos em ensaios em um motor de indução de 2 cv com rotor em gaiola.

No que se refere aos ensaios e às simulações referentes à alimentação com tensões desequilibradas, utilizou-se a variação da amplitude da tensão de uma fase, enquanto as demais foram mantidas em seus respectivos valores nominais. Os defasamentos angulares foram mantidos em 120° . As simulações e os ensaios laboratoriais foram realizados para $K=2\%$ e, em seguida, para K igual a 3 e 5%, sempre mantendo a mesma condição dos fasores.

Foi verificada uma distribuição não-uniforme das perdas no enrolamento do estator e nas barras do rotor. Contudo, à medida que a máquina aquecia, detectou-se uma troca de calor entre as fases, de tal forma que, em regime térmico permanente, constatou-se uma tendência na equalização térmica do motor.

Com relação à determinação da vida útil, o autor buscou a abordagem da natureza aleatória dos fenômenos encontrados nas redes elétricas, das condições de operação dos motores e da própria temperatura ambiente. Com base nesse entendimento e considerando as premissas para a utilização da equação de “Arrhenius”, apresentou-se um novo conceito, qual seja, a vida útil fracionária ou parcial. A metodologia emprega o período de análise como sendo uma seqüência de estados operacionais, cada qual caracterizado por uma temperatura constante.

2.4 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO FATOR K – PROCEDIMENTOS E MATERIAIS

Este item visa apresentar os procedimentos e os materiais adotados para a análise do comportamento do fator K frente à variação das amplitudes e dos ângulos das tensões. Para tanto, todas as simulações e ensaios de laboratório a serem efetuados nessa tese, são aqui detalhadamente descritos em três grupos de investigações, a saber:

- Avaliação do comportamento do fator K e das componentes de seqüência positiva, negativa e zero frente a variação das amplitudes e (ou) dos ângulos das tensões;
- Identificação dos lugares geométricos das amplitudes e dos ângulos das tensões e análise do comportamento das componentes de seqüência para condições onde o fator K apresenta módulos iguais; e
- Desenvolvimento e execução de ensaios em laboratório, destinados à comprovação dos resultados teóricos adquiridos com o desenvolvimento deste estudo.

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

2.4.1 - Análise do comportamento do fator K

Além da avaliação do comportamento do fator K e das componentes de seqüência positiva, negativa e zero, frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões, as simulações propostas neste item têm por objetivo:

- Identificar os possíveis inconvenientes relacionados aos empregos do fator K e das componentes de seqüência na quantificação do desequilíbrio (consideram-se os métodos das componentes simétricas, do NEMA, do IEEE e do CIGRÉ);
- Investigar a aplicabilidade do ângulo do fator K e das componentes de seqüência positiva e negativa, na análise do desequilíbrio;
- Efetuar uma avaliação comparativa entre o fator K e a componente de seqüência negativa, entre as componentes negativa e zero, e também entre a componente positiva e o valor médio das tensões de fase do sistema; e

- Avaliar, para diversas condições de desequilíbrio, se o fator K é mais sensível a variação do ângulo do que da amplitude das tensões.

Para tanto, são propostas as avaliações do módulo e do ângulo do fator K e das componentes de seqüência positiva, negativa e zero, separadamente, para as seguintes condições:

- Variação das amplitudes de duas fases da tensão para os ângulos constantes;
- Variação dos ângulos de duas fases para amplitudes constantes;
- Variação da amplitude e do ângulo de uma mesma fase da tensão; e
- Variação da amplitude de uma fase da tensão com o ângulo de outra.

Todos os resultados dessas simulações são expostos em gráficos. Logo, limita-se à análise da variação simultânea de até duas grandezas por vez. As simulações foram efetuadas na plataforma Matlab 6.5, com a utilização de algoritmos simples, desenvolvidos com base nas equações (2.5), (2.6) e (2.7).

As amplitudes das tensões das fases B e C encontram-se em p.u.. Para cada condição de desequilíbrio, a amplitude da fase A é tomada como valor de base. As componentes negativa e zero, são avaliadas em porcentagem da tensão de base para tornar possível uma avaliação comparativa com o fator K. Pela mesma razão, o valor médio das tensões e o módulo da seqüência positiva estão em p.u.. Após a investigação das citadas condições é gerada uma síntese com os mais relevantes resultados adquiridos com base nas simulações.

2.4.2 – Identificação dos lugares geométricos

Embora não seja meta desta tese a geração de uma nova metodologia de quantificação do desequilíbrio, a investigação com propriedade dos aspectos que aparentemente assinalam o fator K como um índice inadequado para a quantificação do desequilíbrio, caracteriza-se como necessária para se atingir os objetivos desta pesquisa. Assim sendo, torna-se providencial e recomendável a execução das seguintes investigações:

- Identificação do lugar geométrico das amplitudes e dos ângulos das tensões onde determinam-se valores de fator K iguais. Isto será executado partindo-se dos cálculos analíticos e de análises gráficas, onde os ângulos das tensões são mantidos

constantes em vários patamares e, onde as amplitudes das tensões são mantidas constantes em alguns valores; e

- Análise do comportamento das componentes de seqüência para os valores de tensão, onde o fator K iguala-se a 2%.

Em todos os casos simulados, utilizam-se bancos de dados gerados com base em algoritmos específicos desenvolvidos para aplicação nessas análises, a saber:

- Considerando-se a variação somente das amplitudes das tensões das 3 fases entre os valores de 201 e 231 volts (intervalo de variação da tensão permitido pela ANEEL para locais onde a tensão nominal é igual a 220 volts). Neste caso, os ângulos são mantidos nos seus valores nominais, 0°, -120° e +120°, respectivamente, para as fases A, B e C. A variação da tensão é de 1 volt;
- Considerando-se as amplitudes das tensões constantes no valor nominal de 220 volts, com os ângulos variando de 115° a 125°, a cada 0,25°; e
- Com a variação simultânea das amplitudes e dos ângulos das tensões a cada 1 volt e a cada 0,25°, respectivamente, para os intervalos de 201 e 231 volts, e ainda, de 115° a 125°.

2.4.3 – Validação experimental das hipóteses propostas

A análise experimental desempenha um papel importante em qualquer estudo de engenharia que se faça, haja vista a possibilidade de comprovação de suposições teóricas alicerçadas no desenvolvimento de ensaios reais de laboratório.

Tendo sido analisados os resultados das investigações do comportamento do fator K frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões, passa-se então nesta etapa do estudo à validação das hipóteses elaboradas para a ratificação de inadequação ou não do emprego do fator K como índice único e suficiente para a quantificação do desequilíbrio. Isso se dará por meio de experimentos laboratoriais.

De fato, o objetivo deste tópico é, considerando-se as condições de desequilíbrio que culminam em fatores K iguais a 1,5%, 2%, 4% e 0%, demonstrar que:

- Para um mesmo valor de fator K há inúmeras condições de desequilíbrio capazes de gerar efeitos diferentes sobre cargas como um MIT;

- Existem valores de tensão que, apesar de gerarem fatores K iguais a 2% e 4%, seus efeitos são menos nocivos ao MIT do que os encontrados para fator K igual a 1,5%; e
- Há diversos valores de tensões para fator K igual a 0% (onde teoricamente não deveria existir desequilíbrio), que aplicados sobre o MIT, culminam em efeitos mais nocivos do que os encontrados quando da aplicação de combinações com o fator K igual a 4%.

Para tanto, efetuam-se ensaios práticos que alicerçados na íntima relação entre as falhas em motores de indução, elevações de temperatura e o sistema isolante dos enrolamentos, conforme descrito em (Souto, 2001), permitem calcular a vida útil e efetuar uma avaliação dos efeitos do desequilíbrio de tensão sobre o motor.

A – Estimativa de Vida Útil de Motores de Indução

O estudo que se segue, a saber, o cálculo da vida útil como forma de se avaliar os efeitos do desequilíbrio de tensão sobre o motor de indução, baseia-se na referência (Souto, 2001). Neste trabalho é possível observar que a durabilidade de um sistema isolante depende, praticamente, da temperatura e do tempo ao qual o mesmo está exposto ao distúrbio. A relação entre o tempo e temperatura e seus efeitos na isolação, ou seja, a estimativa de vida útil dos materiais isolantes é efetuada empregando-se a teoria clássica de "Arrhenius-Darkin".

A equação (2.12) permite o cálculo do tempo de vida útil da isolação, quando a temperatura de operação sofre um acréscimo, por exemplo, em função do desequilíbrio de tensão.

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

Sendo:

- λ - tempo de vida útil do motor para $\theta = \theta_{\text{nom}} + \Delta\theta$;
- λ_{nom} - tempo de vida útil nominal do motor para $\theta = \theta_{\text{nom}}$;
- $\Delta\theta$ - acréscimo de temperatura em relação a θ_{nom} em °C;
- θ_{nom} - temperatura nominal do motor em °K.
- E - energia de ativação em eV
- K -

Para o emprego da expressão (2.12), observa-se a necessidade do conhecimento da vida útil nominal, da classe de isolamento do motor e, fundamentalmente, da temperatura da isolamento do enrolamento do estator na condição operacional que se deseja analisar.

É importante ressaltar que, na avaliação da perda de vida útil, é de fundamental relevância o conhecimento dos aspectos relativos à elevação da temperatura em áreas estratégicas localizadas no interior dos motores de indução. Nestes, a região mais sensível a ser investigada consiste na isolamento do enrolamento do estator, uma vez que esta sofre de forma direta os efeitos advindos de uma elevação de temperatura. Para a determinação das elevações da temperatura que o mesmo está sujeito, geralmente recorre-se à medições *in loco* ou estimativas via modelos térmicos da máquina (Souto, 2001).

Para viabilizar as medições das temperaturas internas do motor, foram inseridos diversos sensores térmicos, localizados em distintos pontos físicos do interior da máquina de indução. A estratégia empregada para a localização dos sensores de temperatura baseou-se, principalmente, na possibilidade de acesso aos locais contemplados nos circuitos térmicos e outros considerados importantes para monitoração e avaliação da vida útil da máquina. As Figuras 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 ilustram alguns desses sensores instalados em um MIT.



Figura 2.3 – Sensores térmicos instalados nas “cabeças de bobina” – Estator.



Figura 2.4 – Sensores térmicos instalados nas ranhuras do estator.



Figura 2.5 – Sensores térmicos instalados na carcaça.

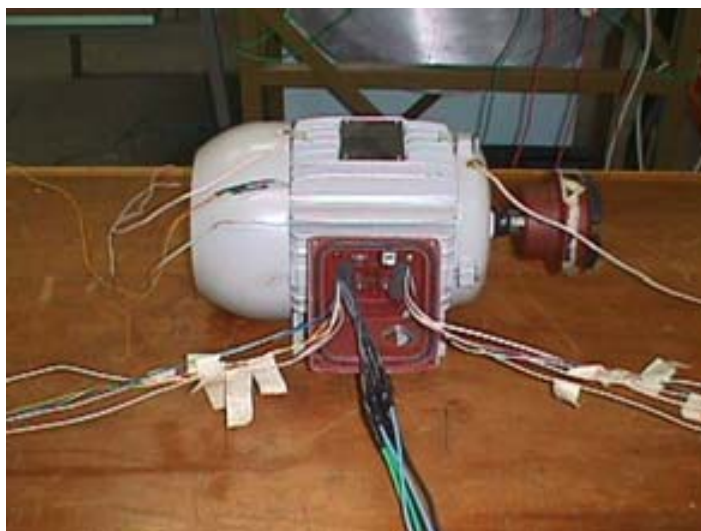


Figura 2.6 – Vista geral do motor de indução.

Outras regiões foram monitoradas com vistas a verificar a temperatura dos diversos elementos constituintes da máquina de indução. Assim, adicionalmente aqueles supracitados, foram também inseridos medidores de temperatura nos seguintes locais:

- Carcaça externa;
- Tampas laterais;
- Ar interno – acoplamento e ventilador;
- Rotor;

Para tais medições de temperatura empregou-se o sensor tipo PT100, o qual apresenta um comportamento linear entre a resistência e a temperatura. Os valores de temperatura foram obtidos convertendo a resistência medida diretamente nos terminais, em valores de temperatura. Deve-se salientar que, embora juntamente com os sensores fossem fornecidas as curvas ou a relação entre resistência e temperatura, o procedimento adotado neste trabalho consistiu em realizar o levantamento desta característica em laboratório. Assim, empregando-se um equipamento específico de calibração, mediu-se, para cada valor de temperatura, a resistência elétrica do sensor e, posteriormente, obteve-se a curva característica do mesmo.

Adicionalmente, deve-se estabelecer valores nominais para a vida útil do isolante, bem como sua respectiva temperatura de referência. Quanto a esta questão, deve-se ressaltar

que a escolha é subjetiva. É essencial entender, contudo, que os limites supracitados estão associados às seguintes condições operacionais:

- Tensões de alimentação puramente senoidais, equilibradas e simétricas;
- Carregamento nominal;
- Funcionamento contínuo;

Assim, qualquer situação operativa que não as descritas acima, podem ocasionar diminuição da vida útil da máquina.

A título de exemplificação, procede-se, na seqüência, a uma aplicação numérica envolvendo os conceitos anteriormente explorados. Para tanto seja um motor com as seguintes características:

- energia de ativação: $E = 1,1 \text{ eV}$;
- temperatura do ponto mais quente: $\theta_2 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$;
- temperatura ambiente: $40 \text{ }^\circ\text{C}$
- tempo de vida útil da isolação nominal: $\lambda_{nom} = 20 \text{ anos}$;

Com vistas a ilustrar os efeitos provenientes de acréscimos de temperatura no motor, a Tabela 2.2 apresenta o comportamento da vida útil do mesmo. Esta tabela foi elaborada através da utilização da equação (2.12) e dos dados supracitados. A elevação de temperatura $\Delta\theta$ expressa o incremento adicionado ao valor nominal.

Tabela 2.2 – Redução da vida útil em função do aumento adicional de temperatura.

ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA - $\Delta\theta$ [$^\circ\text{C}$]	TEMPO DE VIDA [ANOS]	TEMPO DE VIDA [PU]	REDUÇÃO DE VIDA ÚTIL [%]
0	20,00	1,00	0
1	18,46	0,92	7,7
2	17,04	0,85	14,8
3	15,73	0,79	21,4
4	14,54	0,73	27,3
5	13,43	0,67	32,8
6	12,42	0,62	37,9
7	11,49	0,57	42,5
8	10,63	0,53	46,8
9	9,84	0,49	50,8
10	9,11	0,46	54,4
15	6,24	0,31	68,8

A coluna em destaque mostra a redução da vida útil do motor, com enfoque para a condição operacional em que a mesma é reduzida pela metade. Este fato expressa o resultado de uma elevação de temperatura de aproximadamente 9 °C acima da temperatura nominal, a qual está associada à classe de isolamento do motor.

O exame da Tabela 2.2 evidencia uma redução significativa da vida útil da isolação quando da ocorrência de pequenas elevações de temperatura acima dos valores considerados como referenciais para cada classe de isolamento. Os resultados apresentados consideram que a temperatura ambiente é de 40 °C.

B – Características da montagem experimental

Para a realização dos estudos experimentais, utiliza-se um motor de indução trifásico, rotor em gaiola, suprimindo uma carga correspondente a 75% do seu carregamento nominal. A inserção deste equipamento, embora não se caracterize como essencial ao propósito aqui ensejado, torna o ensaio mais próximo ao que de fato se tem, por exemplo, em ambientes industriais.

A Figura 2.7 exhibe, de forma esquemática, o arranjo experimental empregado, onde apresentam-se os equipamentos utilizados e suas conexões ao motor trifásico de indução.

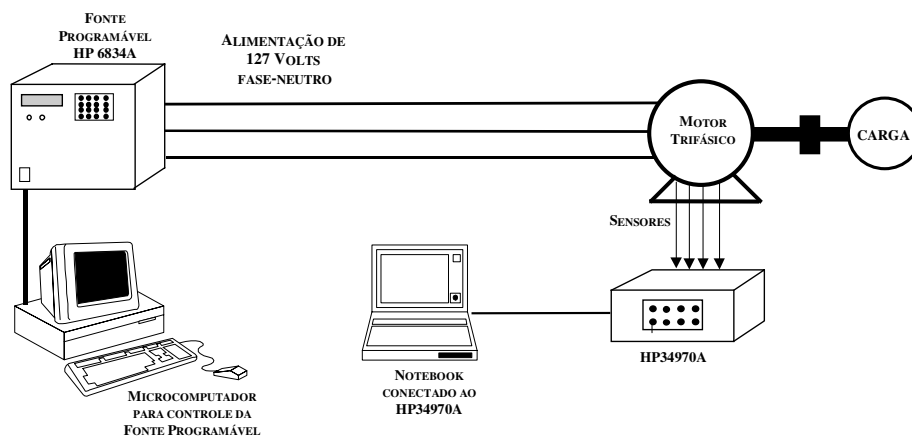


Figura 2.7 – Esquema de conexão para realização dos experimentos.

As unidades que compõem a montagem experimental são:

- Fonte programável - alimenta o motor de indução através 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 – também destinado à medição dos sinais de temperatura; e
- Motor de indução trifásico, rotor em gaiola de esquilo, potência nominal de 2 [cv] e tensão de 220 [V] à 60 [Hz].

Os níveis de desequilíbrio aos quais o dispositivo analisado é submetido são providos por uma fonte de alimentação especial, de fabricação HP, modelo HP6834A, trifásica, com potência de 30 kVA, que combina três instrumentos em uma única unidade, como mostra a Figura 2.8.

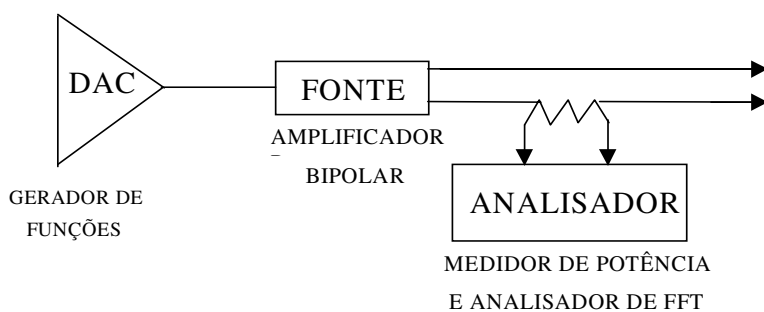


Figura 2.8 – Elementos da fonte HP6834A.

As Figuras 2.9 e 2.10 permitem a visualização de todos os equipamentos envolvidos nos ensaios de laboratório.

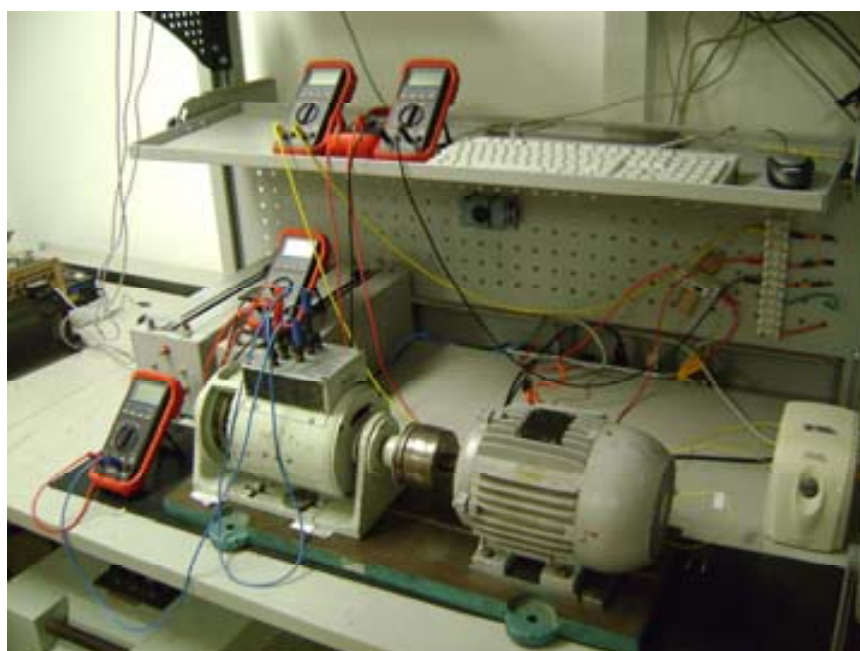


Figura 2.9 – Equipamentos utilizados nos ensaios - Visão do grupo motor gerador



Figura 2.10 – Equipamentos utilizados nos ensaios - Visão da montagem incluindo a fonte de distúrbios

C – Casos Estudados

Com a execução das investigações previstas nos capítulos 3 e 4 desta tese, pretende-se gerar tabelas contendo valores de tensão que serão empregados nos ensaios laboratoriais utilizando-se o motor. Na verdade, tratam-se de conjuntos de fasores que culminam, respectivamente, em fatores K iguais a 1,5%, 2%, 4% e 0%. Nestas tabelas será possível observar a descrição da condição do desequilíbrio, bem como a razão da sua escolha para os testes previstos.

2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo apresentou, de forma concisa, os principais conceitos e definições relacionados com o tema desequilíbrio de tensão. Aspectos fundamentais e atuais, sustentados por ampla referência bibliográfica, foram destacados. Dada a sua importância para a concretização desta pesquisa, enfatizou-se o supramencionado fenômeno quanto aos métodos de cálculo do desequilíbrio, as suas causas, efeitos e a normalização. Foram apresentadas algumas normas e recomendações utilizadas em países de todo o mundo, destinadas à preservação da qualidade da energia elétrica. Para a quantificação do desequilíbrio, quatro métodos foram ilustrados. Destes, três não fazem uso dos ângulos das tensões para o cálculo do fator de desequilíbrio. Diversos aspectos que podem causar desequilíbrio foram citados. Adicionalmente, alguns de seus efeitos foram ressaltados.

De todo o exposto, observou-se que o fator K calculado com base no método das componentes simétricas é empregado por diversas normas sobre desequilíbrios de tensão. O limite máximo de 2% é, predominantemente, empregado como índice de conformidade pela maioria das normas.

Do levantamento bibliográfico, detectou-se que diversas condições de desequilíbrio conduzem a um mesmo valor de fator K. Tal fato não é considerado nas normas. Com isso, tem-se a possibilidade de existência de 2 ou mais conjuntos de fasores de tensão com fator K iguais, culminando em efeitos diferentes sobre os equipamentos da rede. Certamente, a identificação dessas condições caracteriza-se como uma investigação premente para a avaliação do comportamento de alguns índices voltados à quantificação do desequilíbrio. Com o intuito de superar esse percalço, vários pesquisadores têm investido em pesquisas voltadas a determinação de formas de quantificação do desequilíbrio associadas, de fato,

aos efeitos observados nos equipamentos. Neste ínterim, surgiu a proposição de utilização do ângulo do fator K e da componente positiva associada ao K para a quantificação do desequilíbrio. Entretanto, ambas, até o presente momento, foram desenvolvidas considerando-se que o desequilíbrio ocorre sobre condições onde somente as amplitudes das tensões variam. Assim sendo, justifica-se uma avaliação do comportamento do fator K frente a variação das amplitudes e também dos ângulos das tensões.

Ainda neste capítulo, evidenciam-se os procedimentos e os materiais necessários para: a análise do comportamento do fator K e das componentes de seqüência positiva, negativa e zero frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões; a identificação dos lugares geométricos onde o fator K exibe valores iguais; e a execução dos ensaios em laboratório direcionados a ratificação prática da existência ou não de inconvenientes vinculados ao emprego do fator K.

Mediante a essas constatações, ilustra-se nos próximos capítulos, os resultados de investigações em separado da análise do comportamento do fator K, da identificação dos valores de tensão que geram fatores K iguais, e os resultados dos ensaios de laboratório que constituem a parte experimental deste estudo.

3 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO FATOR K

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta os resultados de uma investigação do fator K e das componentes de seqüência positiva, negativa e zero frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões. Com isso, objetiva-se:

- Identificar os possíveis inconvenientes relacionados ao emprego dos supramencionados índices (consideram-se os métodos das componentes simétricas, do NEMA, do IEEE e do CIGRÉ);
- Investigar a aplicabilidade do módulo e do ângulo do fator K na análise do desequilíbrio;
- Efetuar uma avaliação comparativa entre o fator K e a componente de seqüência negativa, entre as componentes negativa e zero, e também entre a componente positiva e o valor médio das tensões de fase do sistema; e
- Avaliar, para diversas condições de desequilíbrio, se o fator K é mais sensível às variações do ângulo do que à amplitude das tensões.

Este estudo inicia-se com a ilustração dos resultados das avaliações do módulo e do ângulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases com os ângulos constantes. Para tanto, os 4 métodos de cálculo do fator K, a saber, método das componentes simétricas, do CIGRÉ, do NEMA e do IEEE são empregados. Apesar de não serem exibidas neste documento, foram ainda simuladas condições onde têm-se as variações dos ângulos das tensões de duas fases com as amplitudes constantes, da amplitude e do ângulo da tensão de uma mesma fase, e da amplitude da tensão de uma fase e do ângulo de outra. Na seqüência, são apresentados os principais aspectos observados durante as análises efetuadas em cada uma das citadas situações.

Os resultados detalhados das simulações envolvendo as componentes de seqüência negativa, positiva e zero são descritos no Apêndice A. Em todos os casos simulados assume-se a amplitude da tensão da fase A como tensão de base. O ângulo da tensão da

fase A é sempre tomado como igual a 0° , e os valores nominais das fases B e C são, respectivamente, -120° e $+120^\circ$.

3.2 – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO FATOR K FRENTE A VARIÇÃO DAS AMPLITUDES E DOS ÂNGULOS DAS TENSÕES

3.2.1 - Método das Componentes Simétricas

Inicia-se a apresentação dos resultados das simulações, conforme descrito no item 3.1, considerando-se a variação das amplitudes das tensões de duas fases. Em cada um dos tópicos aqui abordados, são avaliados o módulo e o ângulo do parâmetro em estudo. As variações das amplitudes das tensões de cada fase serão apresentadas em porcentagem da tensão da fase A. Já as variações dos ângulos das tensões de cada fase são tomadas em porcentagem do valor igual a 120° .

3.2.1.1 - Variação das amplitudes das tensões de duas fases

Vale ressaltar que, em toda esta análise, os ângulos das tensões de cada fase permanecem constantes nos seus valores nominais.

A - Comportamento do módulo do fator K

As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram o comportamento dos módulos do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases.

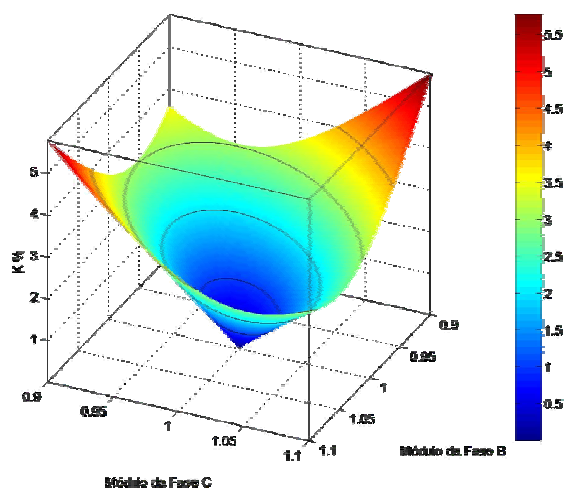


Figura 3.1- Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases

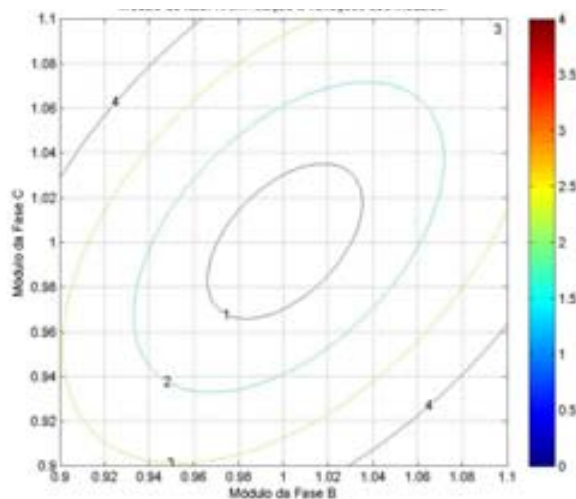
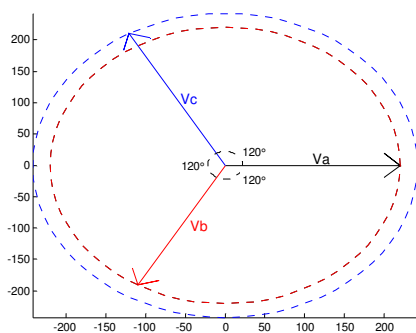


Figura 3.2 - Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases– Curvas de nível

Observa-se das Figuras 3.1 e 3.2, que há inúmeras combinações de amplitudes das tensões das fases com os ângulos constantes que geram o mesmo fator K. Vale lembrar que todos os pontos localizados em uma curva de nível possuem o mesmo patamar de desequilíbrio.

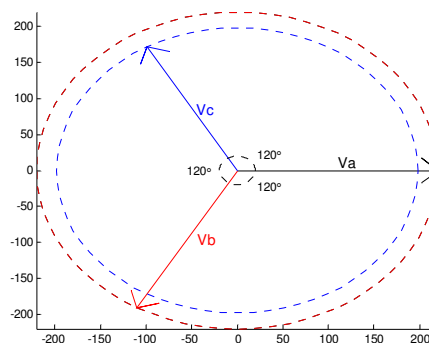
Verifica-se ainda, que variações da ordem de 10% nas amplitudes das tensões de cada fase acarretam, em geral, valores do fator K de até 6%. Na verdade, determinam-se valores do fator K de 0 a 4%, quando há somente a amplitude de uma fase variando, e por volta de 0 a 6% quando observam-se duas fases com modificações simultâneas de até 10% nas suas amplitudes.

A Figura 3.3 ilustra 6 diagramas fasoriais que exemplificam condições de desequilíbrio onde têm-se variações nas amplitudes das tensões. Os valores exatos das amplitudes e dos ângulos das tensões de cada fase que constituem esses fasores encontram-se na Tabela 3.1. Têm-se ainda nessa tabela, os valores do fator K determinados para cada uma das condições em estudo.



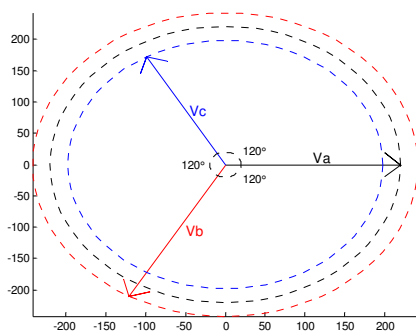
(1)

$$V_C = 1.10 \cdot V_{BASE}$$



(2)

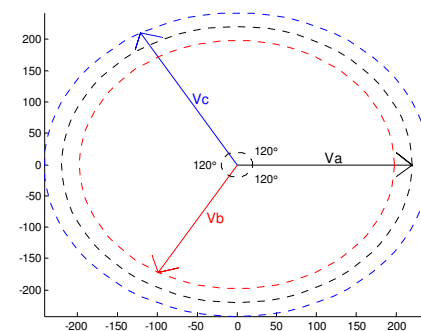
$$V_C = 0.90 \cdot V_{BASE}$$



(3)

$$V_B = 1.10 \cdot V_{BASE}$$

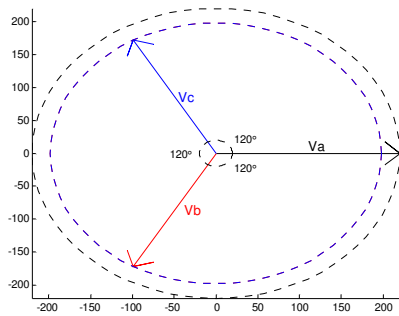
$$V_C = 0.90 \cdot V_{BASE}$$



(4)

$$V_B = 0.90 \cdot V_{BASE}$$

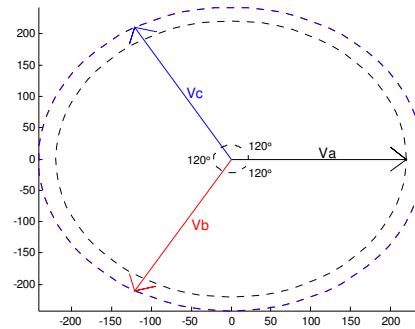
$$V_C = 1.10 \cdot V_{BASE}$$



(5)

$$V_B = 0.90 \cdot V_{BASE}$$

$$V_C = 0.90 \cdot V_{BASE}$$



(6)

$$V_B = 1.10 \cdot V_{BASE}$$

$$V_C = 1.10 \cdot V_{BASE}$$

Figura 3.3 – Diagramas fasoriais onde tem-se desequilíbrio nas amplitudes das tensões

Tabela 3.1 – Valores do fator K para os fasores da Figura 3.3

Exemplo	Fasores de tensões	Condição das amplitudes das tensões	Fator K (%)
1	$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 220 \angle -120^\circ$ $V_C = 242 \angle +120^\circ$	$V_C = 1,10 \cdot V_{BASE}$	$3,226 \angle -120^\circ$
2	$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 220 \angle -120^\circ$ $V_C = 198 \angle +120^\circ$	$V_C = 0,90 \cdot V_{BASE}$	$3,448 \angle 60^\circ$
3	$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 242 \angle -120^\circ$ $V_C = 198 \angle +120^\circ$	$V_B = 1,10 \cdot V_{BASE}$ $V_C = 0,90 \cdot V_{BASE}$	$5,774 \angle -60^\circ$
4	$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 198 \angle -120^\circ$ $V_C = 242 \angle +120^\circ$	$V_B = 0,90 \cdot V_{BASE}$ $V_C = 1,10 \cdot V_{BASE}$	$5,774 \angle -60^\circ$
5	$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 198 \angle -120^\circ$ $V_C = 198 \angle +120^\circ$	$V_B = 0,90 \cdot V_{BASE}$ $V_C = 0,90 \cdot V_{BASE}$	$3,571 \angle 0^\circ$

6	$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 242 \angle -120^\circ$ $V_C = 242 \angle +120^\circ$	$V_B = 1,10 * V_{BASE}$ $V_C = 1,10 * V_{BASE}$	3,125 $\angle 180^\circ$
---	--	--	--------------------------

Da Figura 3.3 e da Tabela 3.1 observa-se que:

- Um acréscimo na amplitude da tensão de uma ou de duas fases gera um fator K **menor** do que o detectado quando da redução das amplitudes dessas mesmas fases, nas mesmas proporções. As comparações entre si dos exemplos 1 e 2, e ainda, 5 e 6, ambos retirados da Tabela 3.1, ratificam o exposto;
- O aumento da amplitude da tensão da fase B, em conjunto com a redução na mesma proporção na fase C (exemplo 3), causa o mesmo desequilíbrio observado quando se reduz a fase B e aumenta-se a fase C, sob as mesmas proporções (exemplo 4);
- Amplitudes das tensões de duas fases 10% acima do valor de base (exemplo 6), ou amplitudes das tensões de duas fases 10% abaixo do valor de base (exemplo 5), culminam em valores do fator K menores do que os detectados quando têm-se, simultaneamente, amplitude da tensão de uma fase 10% acima e outra 10% abaixo do valor de base (exemplos 3 e 4); e
- A variação de 10% nas amplitudes das tensões de duas fases em relação à tensão de base (exemplos 3, 4 e 5), produz, em geral, um módulo do fator K maior do que as alterações de 10% na amplitude da tensão de uma única fase em relação à tensão de base (exemplos 1 e 2).

B - Comportamento do ângulo do fator K

As Figuras 3.4 e 3.5 ilustram o comportamento dos ângulos do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases.

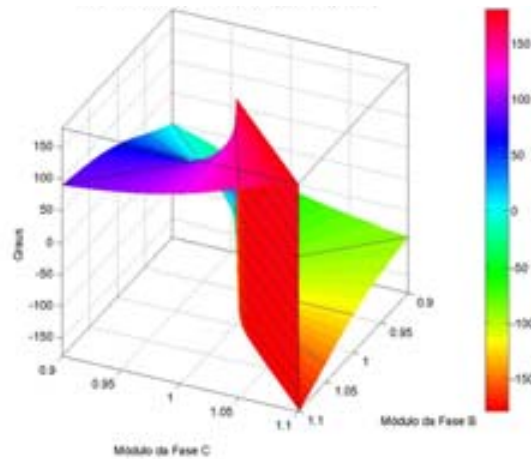


Figura 3.4 - Comportamento do ângulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases

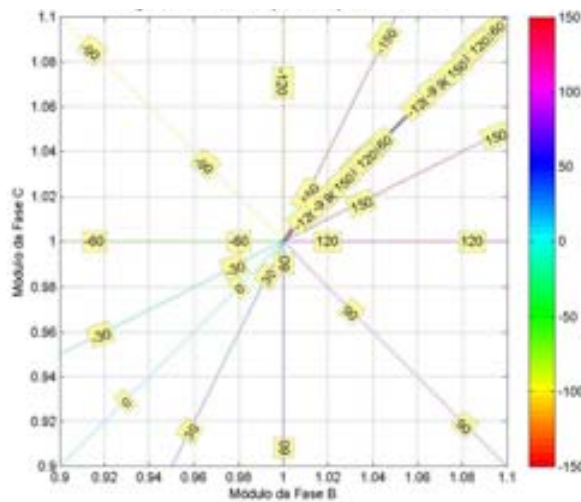


Figura 3.5 - Comportamento do ângulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Curvas de nível

Da análise das Figuras 3.4 e 3.5 pode-se concluir que há um conjunto de fasores de tensão onde têm-se as amplitudes das tensões de duas fases acima do valor de base, para o qual não se consegue definir o valor do ângulo do fator K. A Tabela 3.2 apresenta os ângulos do fator K para algumas condições de desequilíbrio.

Tabela 3.2 – Ângulos do fator K

Quadrante	Condição do desequilíbrio	Varição do ângulo do fator K
Primeiro	Amplitudes das tensões de duas fases acima do valor de base	De 120° a 180° e de -180° a -120°

Segundo	Amplitude da tensão de uma fase acima e de outra abaixo do valor de base	De -120° a -60°
Terceiro	Amplitudes das tensões de duas fases abaixo do valor de base	De -60° a 60°
Quarto	Amplitude da tensão de uma fase acima e de outra abaixo do valor de base	De 60° a 120°

Da Tabela 3.2 constata-se que:

- Condições de desequilíbrio em que as amplitudes das tensões de duas fases estão acima do valor de base geram ângulos do fator K no primeiro quadrante (entre 120° e -120° , passando por 180°);
- Para condições onde a amplitude de uma fase está acima do valor de base e a outra encontra-se abaixo, têm-se o ângulo do fator K nos segundo e quarto quadrantes (entre -120° e -60° e entre 60° e 120° , respectivamente); e
- As condições do desequilíbrio em que as amplitudes das tensões de duas fases encontram-se abaixo da tensão de base culminam em ângulos do fator K no terceiro quadrante (entre -60° e 60° , passando por 0°).

Logo, conclui-se para condições de desequilíbrio onde os ângulos das tensões de cada fase permanecem inalterados em seus valores nominais, que o módulo do fator K pode ser utilizado para se compreender quão desequilibrado o sistema está, e os ângulos do fator K prestam-se para a verificação de quais foram as condições que geraram o desequilíbrio. Contudo, é importante ressaltar que esta hipótese não pode ser estendida para situações onde ângulos e amplitudes variam simultaneamente.

3.2.2 - Método do NEMA, do CIGRÉ e do IEEE.

Considerando-se a existência de inúmeras condições de desequilíbrio conduzindo ao mesmo fator K quando da análise utilizando-se o método das componentes simétricas, torna-se providencial uma pesquisa sobre o comportamento de tal índice calculado com

base nos métodos do CIGRÉ, do NEMA e do IEEE. Neste tópico são ilustrados somente os resultados das simulações onde há a variação das amplitudes das tensões de duas fases.

As variações das amplitudes das tensões de cada fase serão apresentadas em porcentagem da tensão da fase A.

As figuras 3.6, 3.7 e 3.8 exibem o comportamento dos módulos do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases, calculados com base no método do CIGRÉ, do NEMA e do IEEE, respectivamente.

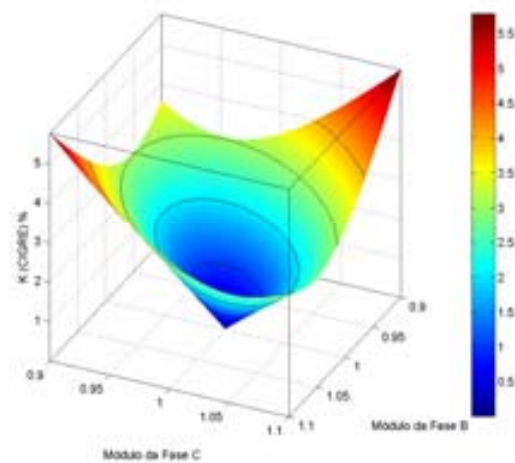


Figura 3.6 - Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Método do CIGRÉ

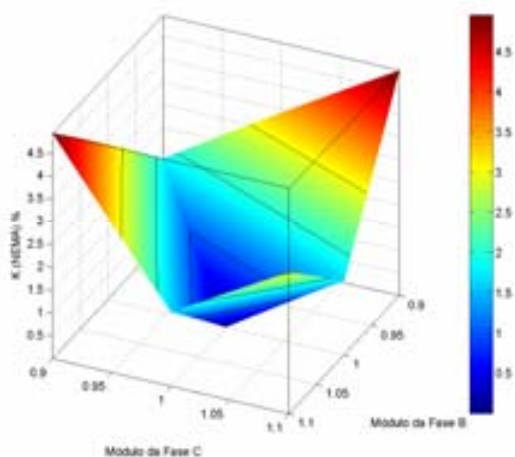


Figura 3.7 - Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Método do NEMA

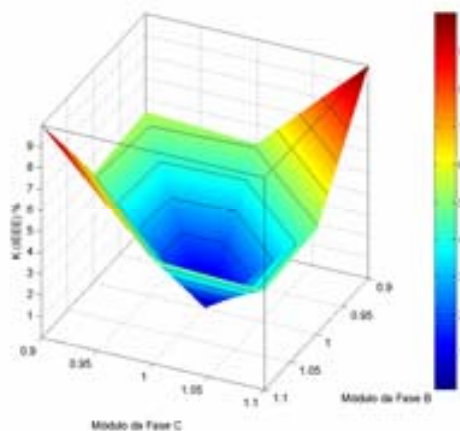


Figura 3.8 - Comportamento do módulo do fator K frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Método do IEEE

Das Figuras 3.6, 3.7 e 3.8, observa-se comportamentos diferentes do fator K frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões, se comparados com os resultados expostos na Figura 3.1, oriundos do emprego do método das componentes simétricas. Contudo, assim como observado no método das componentes simétricas, percebe-se a existência de curvas de nível para diversas condições de desequilíbrio de tensão, onde tem-se o mesmo valor de fator K.

A Tabela 3.3 mostra os valores máximos de fator K obtidos com a variação de uma e de duas amplitudes da tensão, com base na aplicação dos 4 citados métodos de quantificação do desequilíbrio.

Tabela 3.3 – Valores do fator K para variação de 10% nas amplitudes das tensões

Condição do desequilíbrio	Método das Componentes Simétricas	Método do CIGRÉ	Método do NEMA	Método do IEEE
Varição de 10% na amplitude de uma fase	3,4480	3,4483	3,4170	5,1255

Variação de 10% na amplitude de duas fases	5,7740	5,7735	4,9522	9,9875
--	--------	--------	--------	--------

Da Tabela 3.3 verificam-se fatores K calculados considerando-se os métodos das componentes simétricas e do CIGRÉ muito próximos entre si. O método do NEMA apresenta sempre os menores valores e o método do IEEE, os maiores. Tais discrepâncias estão alicerçadas no fato de o método NEMA empregar como numerador o máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio, enquanto o método do IEEE faz uso da maior diferença entre as tensões de linhas medidas.

3.3 – PRINCIPAIS ASPECTOS OBSERVADOS NA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES

Este tópico do presente capítulo reúne os principais aspectos observados nas análises do comportamento do fator K (item 3.2) e das componentes de seqüência positiva, negativa e zero (apêndice A). Os resultados expostos foram adquiridos considerando-se algumas especificidades no que diz respeito às condições do desequilíbrio, a saber:

- Análise considerando-se os ângulos das tensões constantes nos seus valores nominais;
- Análise considerando-se as amplitudes das tensões constantes nos seus valores nominais; e
- Análise considerando-se a variação de uma amplitude e de um ângulo da tensão;

Em seguida e finalmente, são apresentados os principais resultados de cunho geral, obtidos com o desenvolvimento deste estudo.

A Tabela 3.4 apresenta os valores máximos dos módulos do fator K e das componentes de seqüência positiva, negativa e zero quando da variação nas amplitudes e nos ângulos das tensões da ordem de 10% em relação ao valor base, conforme especificado.

Vale ressaltar que a componente negativa é avaliada em porcentagem da tensão de base para tornar possível uma avaliação comparativa com o fator K. O valor médio das amplitudes das tensões de fase é calculado para cada condição de desequilíbrio simulada. O valor médio das amplitudes das tensões e o módulo da seqüência positiva estão em p.u. da tensão de base. No caso da seqüência positiva e do valor médio das amplitudes das tensões, exibem-se um valor máximo positivo e um negativo.

Tabela 3.4 – Valores máximos do fator K, das componentes de seqüência positiva, negativa e zero, e da média das tensões de fase

		Fator K (%)	Component e negativa (%)	Component e zero (%)	Component e positiva (p.u.)	Média aritmética das tensões (p.u.)
Com ângulos constantes e nominais	Variação de 10% em uma fase	3.448 %	3.333%	3.333%	0.967 e 1.033	0.967 e 1.033
	Variação de 10% em duas fases	5.774 %	5.778%	5.778%	0.933 e 1.067	0.933 e 1.067
Com amplitudes constantes e nominais	Variação de 10% em uma fase	7.003 %	6.969%	6.969%	0.995	1
	Variação de 10% em duas fases	12.92 %	12.73%	12.73%	0.985 e 0.995	1
Com um ângulo e	Variações simultânea	7.813 %	8.033%	8.033%	0.962 e 1.028	0.967 e 1.033

uma amplitude variando	s de 10% na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão					
	Variações simultâneas de 10% na amplitude de uma fase e no ângulo de uma outra	10.25 %	9.861%	4.151%	0.962 e 1.028	0.967 e 1.033

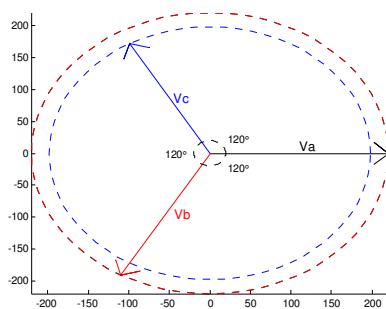
Observa-se da Tabela 3.4, considerando-se simultaneamente os ângulos das tensões constantes nos seus valores nominais e a variação nas amplitudes das tensões da ordem de 10%, que os valores máximos dos módulos do fator K e das componentes de seqüência negativa e zero não transcendem 6%. Além disso, eles são próximos entre si, sendo as componentes negativa e zero iguais. Adicionalmente, verifica-se que a componente positiva e a média das tensões não ultrapassam 1.07 p.u., e nem apresentam valores inferiores a 0.96 p.u.. Assim como aconteceu na comparação entre o módulo das componentes de seqüência negativa e zero, a média das tensões e a componente positiva ilustram valores iguais.

Considerando-se simultaneamente as amplitudes das tensões constantes nos seus valores nominais e as variações nos ângulos das tensões da ordem de 10%, verifica-se que os valores máximos dos módulos do fator K e das componentes de seqüência negativa e zero não excedem o patamar de 7.1% para a variação em uma única fase e de 13% para alterações em duas fases. Além disso, eles são próximos entre si. Novamente, as componentes negativa e zero exibiram valores iguais. Verifica-se que a componente

positiva apresenta valores diferentes a 1 p.u., apesar de se manter as amplitudes das tensões. O menor módulo da componente positiva é superior a 0.98 p.u.. A média das tensões exibe sempre valores iguais a 1 p.u., conforme esperado.

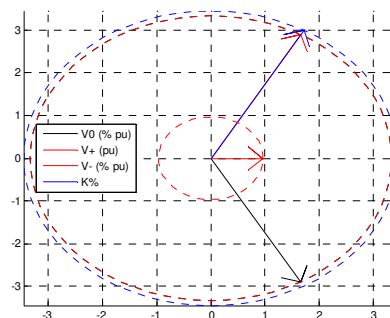
E finalmente, investigando-se os resultados obtidos quando da variação de uma amplitude e de um ângulo da tensão de 10% em relação aos valores de base e ao nominal, respectivamente, nota-se que os valores máximos dos módulos do fator K e da componente de seqüência negativa não excedem o patamar de 8% para a variação em uma única fase, e de 10.5% para alterações em duas fases. Além disso, eles são próximos entre si. Neste caso, os valores das componentes de seqüência negativa e zero são diferentes. Verifica-se ainda que a componente positiva e a média das tensões não ultrapassam 1.03 p.u., e nem apresentam valores inferiores a 0.96 p.u.. Assim como aconteceu na comparação entre o módulo do fator K e a seqüência negativa, a média das tensões e a componente positiva, ilustram valores próximos entre si.

Das análises efetuadas nos estudos aqui relatados, ainda conclui-se que nem sempre a variação das amplitudes de duas fases, simultaneamente, culmina em um maior módulo do fator K e das componentes de seqüência negativa, zero e positiva, comparado às alterações da amplitude de uma única fase, mantendo-se as mesmas proporções. A Figura 3.9 ilustra o fator K e as componentes de seqüência de dois conjuntos de fasores onde tem-se a variação na(s) amplitude(s) da tensão de 10% do valor de base.



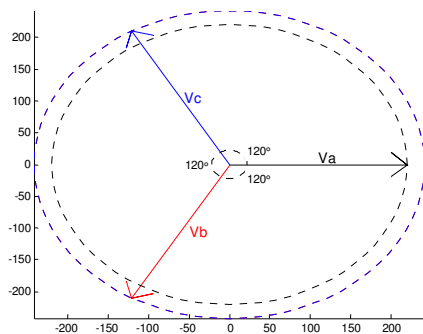
(1)

$$V_C = 1.10 * V_{BASE}$$



(2)

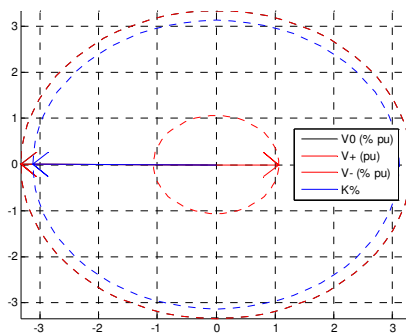
$$\text{Fator K, } V_2 \text{ e } V_1 \text{ para } V_C = 1.10 * V_{BASE}$$



(3)

$$V_B = 1.10 \cdot V_{BASE}$$

$$V_C = 1.10 \cdot V_{BASE}$$



(4)

Fator K, V_2 e V_1 para $V_B = 1.10 \cdot V_{BASE}$

$$\text{e } V_C = 1.10 \cdot V_{BASE}$$

Figura 3.9 – Diagramas fasoriais das tensões e diagramas fasoriais do fator K e das componentes de seqüência para condições onde tem-se desequilíbrio nas amplitudes das tensões

Os valores exatos das amplitudes e dos ângulos das tensões que constituem esses fasores encontram-se na Tabela 3.5. Têm-se ainda nessa tabela, os valores do fator K e das componentes de seqüência determinados para cada uma das condições em estudo.

Tabela 3.5 – Valores do fator K e das componentes de seqüência para os fasores da Figura 3.21

Exempl o	Fasores de tensões	Fator K (%)	Componente negativa (%)	Component e zero (%)	Component e positiva (%)
1	$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 220 \angle -120^\circ$ $V_C = 198 \angle$	3.448	3.333	3.333	0.967

	+120°				
2	$V_A=220 \angle 0^\circ$ $V_B=242 \angle -120^\circ$ $V_C=242 \angle +120^\circ$	3.125	3.333	3.333	1.066

Apesar da variação de 10% nas amplitudes das tensões das fases B e C (exemplo 2), o módulo do fator K dessa condição de desequilíbrio é menor do que o resultado encontrado quando da variação de 10% em relação à tensão de base somente na fase C (exemplo 1). Isso se deve a variação da componente positiva, haja vista que tanto para a variação de uma única fase, como para duas fases, a componente negativa exibiu o mesmo valor.

Quanto aos ângulos do fator K e da componente de seqüência negativa, verifica-se que eles são semelhantes entre si para situações onde os ângulos das tensões são mantidos constantes em seus valores nominais e ainda para condições onde as amplitudes são constantes. Logo, quando constata-se a inexistência de variação nas amplitudes e nos ângulos das tensões simultaneamente, pode-se utilizar os módulos do fator K e da componente negativa para se compreender quão desequilibrado o sistema está, e os seus ângulos para se inferir quais foram as condições que geraram o desequilíbrio.

Contudo, há de se destacar para circunstâncias onde tem-se a variação simultânea de ângulos e amplitudes das tensões que, em função dos seus comportamentos, nem sempre é possível associar faixas de variação dos ângulos do fator K e das componentes positiva e negativa com os respectivos quadrantes (Apêndice A). Assim sendo, observa-se que os ângulos do fator K e da componente negativa não apresentam informações úteis quando o sistema contém uma variação simultânea dos ângulos e das amplitudes das tensões.

3.4 – Principais resultados gerais

Neste tópico são apresentados os resultados de um levantamento das principais constatações de cunho geral relacionadas às análises do comportamento do fator K e das componentes de seqüência negativa, zero e positiva. São elas:

- Variações dos ângulos das tensões implicam em módulos do fator K e da componente negativa sempre mais elevados do que os adquiridos quando da variação, nas mesmas proporções e condições, das amplitudes das tensões. Logo, observa-se que o fator K e a componente negativa são mais sensíveis às alterações nos ângulos das tensões do que nas amplitudes.
- A variação das amplitudes das tensões gera uma maior variação do módulo da componente de seqüência positiva comparado às alterações nas mesmas proporções e condições dos ângulos das tensões.
- Os ângulos do fator K não apresentam informações úteis quando se sabe que o sistema tem uma variação acentuada dos ângulos e das amplitudes das tensões, simultaneamente.
- Somente em situações específicas como a ausência da variação dos ângulos das tensões ou inexistência de variação nas amplitudes, o ângulo do fator K bem como o ângulo da componente de seqüência negativa revelam informações consistentes a respeito das condições que geraram o desequilíbrio.
- Para se conhecer melhor o comportamento do desequilíbrio é recomendável, inicialmente, uma avaliação da variação dos ângulos das tensões. A condição em que os ângulos das tensões não variam acentuadamente oferece simplificações nas análises com possibilidades de generalizações que não ocorrem quando trabalha-se com 5 variáveis.
- Variação de até 1° nos ângulos das tensões com relação aos seus valores nominais, considerando-se as amplitudes constantes, podem gerar fatores K da ordem de 0.6% quando se tem somente uma fase com o valor do ângulo diferente ao nominal. Para duas fases variando simultaneamente sob as mesmas condições supramencionadas têm-se valores do fator K de aproximadamente 1%.
- Variação dos ângulos das tensões de até 1° com relação ao valor nominal, considerando-se as amplitudes constantes culminam em pequenas diferenças entre os valores da componente de seqüência positiva e a tensão nominal. Na verdade, tal

diferença se dá, em geral, na quarta casa decimal, acarretando erros da ordem de 10^{-3} %. Logo, a componente de seqüência negativa é igual ao fator K.

- Para determinadas condições de desequilíbrio o valor médio das amplitudes das tensões de fase em relação à tensão nominal não exhibe valores próximos ao módulo da componente de seqüência positiva. Tais discrepâncias, em alguns casos, justificam as diferenças entre o fator K e o módulo da componente negativa.
- Quando não há variação simultânea dos ângulos e das amplitudes das tensões as componentes de seqüência zero apresentam valores iguais aos da componente negativa.
- É possível determinar um conjunto de diferentes combinações de tensões que culminam em fatores K idênticos em módulos. Na verdade, tratam-se de lugares geométricos onde se tem módulos do fator K semelhantes, para distintos valores das tensões.

3.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou uma investigação pormenorizada do comportamento do fator K e das componentes de seqüência frente a variação das amplitudes e ângulos das tensões. Devido à impossibilidade de se efetuar um estudo conjunto onde se tem 5 grandezas variando simultaneamente, algumas condições de análise foram necessárias.

Dada a sua importância, enfatizou-se os aspectos fundamentais de algumas metodologias propostas pelos autores citados no capítulo 2 desta tese, como a aplicabilidade ou não do ângulo do fator K nas análises de desequilíbrio, observação da existência de valores semelhantes de fator K para valores de tensão diferentes, dentre outros.

Conforme observado, o fator K e as componentes negativa e zero são mais sensíveis às alterações nos ângulos das tensões do que nas amplitudes. Os ângulos do fator K não

fornecem informações úteis quando se sabe que o sistema tem uma variação acentuada dos ângulos e das amplitudes das tensões, simultaneamente.

Para se conhecer melhor o comportamento do desequilíbrio é recomendável, inicialmente, uma avaliação da variação dos ângulos das tensões. Assim sendo, recomenda-se a execução de um estudo que avalie as faixas de variação dos ângulos e das amplitudes das tensões oriundas de medições reais no sistema elétrico de potência.

Para determinadas condições de desequilíbrio o valor médio das amplitudes das tensões de fase em relação à tensão nominal não exhibe valores próximos ao módulo da componente de seqüência positiva. Tais discrepâncias, em alguns casos, justificam as diferenças entre o fator K e o módulo da componente negativa. Contudo, quando em algumas condições de desequilíbrio a componente de seqüência positiva é praticamente igual à tensão nominal (variação dos ângulos com as amplitudes das tensões constantes em seus valores nominais), a componente de seqüência negativa torna-se muito próxima ao fator K.

Adicionalmente, observou-se que quando não há variação simultânea dos ângulos e das amplitudes das tensões as componentes de seqüência zero apresentam valores iguais aos da componente negativa.

É possível adquirir um conjunto de diferentes combinações de tensões que culminam em fatores K idênticos em módulos. Considerando-se esta possibilidade, o próximo capítulo propõe-se a apresentar os resultados de uma investigação destinada à identificação, teoricamente, das condições de desequilíbrio que conduzem ao mesmo valor de fator K.

4 – IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES GEOMÉTRICOS PARA FATORES K IGUAIS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme destacam alguns autores como Lee (1997), Wang (2001), Siddique (2004), Faiz (2004) e Kersting (2001), as condições distintas em que se encontram os fasores de tensão para os desequilíbrios constatados no sistema podem culminar em diferentes impactos na eficiência, nas perdas, no fator de potência, no conjugado de saída, na temperatura de alguns equipamentos do sistema, e conseqüentemente, nos períodos em que os mesmos são caracterizados como aptos para a utilização nos processos.

Pensando-se no desenvolvimento de uma nova metodologia de avaliação do desequilíbrio de tensão, com vistas à associação das suas condições com os efeitos provocados pela sua presença, alguns dos mencionados pesquisadores propuseram duas soluções, conforme evidenciam os trabalhos citados no levantamento bibliográfico: a utilização do ângulo do fator de desequilíbrio e a associação do módulo da componente positiva com o fator K.

Adicionalmente, no capítulo 3 desta tese, verificou-se a existência de inúmeras combinações de amplitudes e ângulos das tensões que conduzem a módulos do fator K semelhantes.

Frente a estes fatos, surgiu a idéia de desenvolvimento desse estudo, que visa apresentar os resultados da identificação das condições de desequilíbrio e dos comportamentos das componentes de seqüência para as amostras de tensões onde o fator K apresenta o mesmo módulo. Com o desenvolvimento destes tópicos, pode-se, dentre algumas metas, averiguar a eficácia das hipóteses de emprego do ângulo do fator K e da componente positiva agregada ao módulo do fator K.

Assim sendo, inicialmente, este capítulo apresenta analítica e graficamente a identificação do lugar geométrico das amplitudes e dos ângulos das tensões onde determinam-se valores de fator K semelhantes. Em seguida, expõe-se uma análise do comportamento das componentes de seqüência para os valores de tensão onde o fator K iguala-se a 2%. Vale ressaltar que 2% é o limite sugerido pela grande maioria das normas que versam sobre o assunto.

Embora não seja meta desta tese a geração de uma nova metodologia de quantificação do desequilíbrio, indubitavelmente, a investigação dos aspectos que aparentemente assinalam o fator K como um índice adequado ou não para a quantificação do desequilíbrio, caracteriza-se como necessária. Afinal, a identificação do lugar geométrico dos fasores onde têm-se fatores K iguais e o conhecimento do comportamento das componentes de seqüência para tais condições, são ações que dão sustentação à escolha adequada do que se fazer para minimizar o desequilíbrio. Vale ainda enfatizar que, a investigação do comportamento das componentes de seqüência permite uma avaliação crítica da possibilidade de utilização da seqüência negativa e (ou) positiva em substituição ao fator K quando da quantificação do desequilíbrio de tensão.

4.2 – IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES GEOMÉTRICOS PARA FATORES K IGUAIS

4.2.1 - Cálculo analítico

Para a execução das análises gráficas, desenvolveu-se um cálculo analítico do lugar geométrico das tensões para módulos do fator K iguais. Com tais resultados, torna-se possível identificar as condições de desequilíbrio e o comportamento das componentes de seqüência para algumas situações específicas.

Inicialmente e considerando-se a definição do fator K dada pelo método das componentes simétricas, equação (2.5), multiplica-se o denominador e o numerador por 3 e eleva-se ao quadrado os dois lados da igualdade. Com isso tem-se a equação (4.1).

$$K^2 = \frac{|3V_2|^2}{|3V_1|^2} \quad (4.1)$$

As equações (4.2) e (4.3) apresentam as expressões equivalentes à $|3V_1|^2$ e à $|3V_2|^2$, respectivamente.

$$\begin{aligned} |3V_1|^2 &= V_A^2 + V_B^2 + V_C^2 + 2V_A V_B \cos(\theta_{AB} - 120^\circ) + \\ &+ 2V_B V_C \cos(\theta_{BC} - 120^\circ) + 2V_A V_C \cos(\theta_{CA} - 120^\circ) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} |3V_2|^2 &= V_A^2 + V_B^2 + V_C^2 + 2V_A V_B \cos(\theta_{AB} + 120^\circ) + \\ &+ 2V_B V_C \cos(\theta_{BC} + 120^\circ) + 2V_A V_C \cos(\theta_{CA} + 120^\circ) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Onde:

V_A , V_B e V_C são as amplitudes das tensões de fase

θ_{AB} , θ_{BC} e θ_{CA} são as diferenças angulares entre as fases A, B e C

Isolando-se o termo $|3V_2|^2$ na equação (4.1) e substituindo as expressões $|3V_1|^2$ e $|3V_2|^2$ pelas suas respectivas representações algébricas, equações (4.2) e (4.3), tem-se a equação (4.4).

$$\begin{aligned} |3V_2|^2 = K^2 |3V_1|^2 \quad \rightarrow \\ V_A^2 + V_B^2 + V_C^2 + 2 V_A V_B \cos(\theta_{AB} + 120^\circ) + 2 V_A V_C \cos(\theta_{CA} + 120^\circ) + \\ + 2 V_B V_C \cos(\theta_{BC} + 120^\circ) = K^2 [V_A^2 + V_B^2 + V_C^2 + 2 V_A V_B \cos(\theta_{AB} - 120^\circ) + \\ + 2 V_A V_C \cos(\theta_{CA} - 120^\circ) + 2 V_B V_C \cos(\theta_{BC} - 120^\circ)] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Compondo-se adequadamente algumas combinações possíveis do lado esquerdo da igualdade, tem-se a equação (4.5).

$$\begin{aligned} (1 - K^2)(V_A^2 + V_B^2 + V_C^2) + 2 V_A V_B [\cos(\theta_{AB} + 120^\circ) + \\ - K^2 \cos(\theta_{AB} - 120^\circ)] + 2 V_A V_C [\cos(\theta_{CA} + 120^\circ) - \\ - K^2 \cos(\theta_{CA} - 120^\circ)] + 2 V_B V_C [\cos(\theta_{BC} + 120^\circ) - \\ - K^2 \cos(\theta_{BC} - 120^\circ)] = 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Dividindo-se todos os termos da igualdade por V_A^2 e por $1 - K^2$ obtém-se a equação (4.6).

$$\begin{aligned} [1 + (V_B/V_A)^2 + (V_C/V_A)^2] + 2 (V_B/V_A) [\cos(\theta_{AB} + 120^\circ) - K^2 \cos(\theta_{AB} - \\ - 120^\circ)] / (1 - K^2) + 2 (V_C/V_A) [\cos(\theta_{CA} + 120^\circ) - K^2 \cos(\theta_{CA} - 120^\circ)] / \end{aligned}$$

$$\frac{1}{(1 - K^2)} + 2 \left(\frac{V_B}{V_A} \right) \left(\frac{V_C}{V_A} \right) [\cos(\theta_{BC} + 120^\circ) - K^2 \cos(\theta_{BC} - 120^\circ)] / \quad (4.6)$$

$$\frac{1}{(1 - K^2)} = 0$$

Assumindo-se $V_B/V_A = V_{BN}$ e $V_C/V_A = V_{CN}$ pode-se definir as constantes X, Y e Z conforme descrevem as equações (4.7), (4.8) e (4.9), respectivamente.

$$2 [\cos(\theta_{AB} + 120^\circ) - K^2 \cos(\theta_{AB} - 120^\circ)] / (1 - K^2) = X \quad (4.7)$$

$$2 [\cos(\theta_{CA} + 120^\circ) - K^2 \cos(\theta_{CA} - 120^\circ)] / (1 - K^2) = Y \quad (4.8)$$

$$2 [\cos(\theta_{BC} + 120^\circ) - K^2 \cos(\theta_{BC} - 120^\circ)] / (1 - K^2) = Z \quad (4.9)$$

Com isso tem-se a equação (4.10) que representa o lugar geométrico das amplitudes das tensões normalizadas por V_A , para condições onde o fator K e os ângulos das tensões são constantes.

$$1 + V_{BN}^2 + V_{CN}^2 + X V_{BN} + Y V_{CN} + Z V_{BN} V_{CN} = 0 \quad (4.10)$$

Da análise da equação (4.10), observa-se que o lugar geométrico das amplitudes das tensões para um valor de fator K constante, com ângulos nos seus valores nominais, é uma elipse. Logo, conclui-se que há inúmeros valores de amplitudes de tensões que geram diferentes condições de desequilíbrio, culminando no mesmo valor de fator K.

4.2.2 – Análise gráfica do lugar geométrico das tensões para módulos do fator K iguais

Com a análise gráfica proposta neste item, tem-se a possibilidade de visualização do lugar geométrico das amplitudes e também dos ângulos das tensões para módulos do fator K iguais.

É importante ressaltar que Faiz (2004) apresenta o lugar geométrico das amplitudes das tensões para K constante. Porém, nada é dito a respeito do lugar geométrico dos ângulos das tensões. De fato, inúmeras são as condições que poderiam conduzir o fator K para um valor constante, por exemplo, igual a 2%. Contudo, devido a algumas limitações, optou-se neste estudo pela abordagem de duas condições genéricas, a saber:

- Simulações onde os ângulos das tensões são mantidos constantes em vários patamares; e
- Simulações onde as amplitudes das tensões são mantidas constantes em alguns valores.

Obviamente, em cada uma destas circunstâncias têm-se diversas tensões que constituem o banco de dados de valores de fatores K iguais. Contudo, é necessário mencionar que existem ainda infinitas possibilidades onde as amplitudes e os ângulos das tensões variam simultaneamente. Tais condições não serão abordadas devido às dificuldades de se avaliar um sistema contendo 5 (cinco) grandezas variando ao mesmo tempo. Para se contornar tal restrição, ilustram-se os resultados das investigações do lugar geométrico das amplitudes das tensões, considerando-se os ângulos em seus valores nominais e ainda com uma variação de até 1°. Em se tratando do lugar geométrico dos ângulos, têm-se as amplitudes constantes nos seus valores nominais, e ainda em dois outros patamares. Com isso pode-se, inclusive, concluir a despeito da influência das variações dos ângulos nas análises dos lugares geométricos das tensões para os módulos do fator K idênticos.

Ademais, é relevante ressaltar que assumem-se como valores nominais das tensões para as simulações aqui efetuadas, amplitudes de 220 volts e ângulos das fases A, B e C, iguais, respectivamente, a 0°, -120° e +120°.

4.2.2.1 - Análise gráfica considerando-se a variação das amplitudes das tensões

A - Variações das amplitudes com os ângulos das tensões em seus valores nominais

A Figura 4.1 ilustra o lugar geométrico das amplitudes das tensões para fator K igual a 2%, e variação das tensões de 201 a 231 volts. Estes patamares foram escolhidos por representarem os limites admitidos para a variação dos valores eficazes da tensão no sistema elétrico brasileiro, onde a tensão nominal é igual a 220 volts (Aneel, 2001). A variação da amplitude é de 1 em 1 volt.

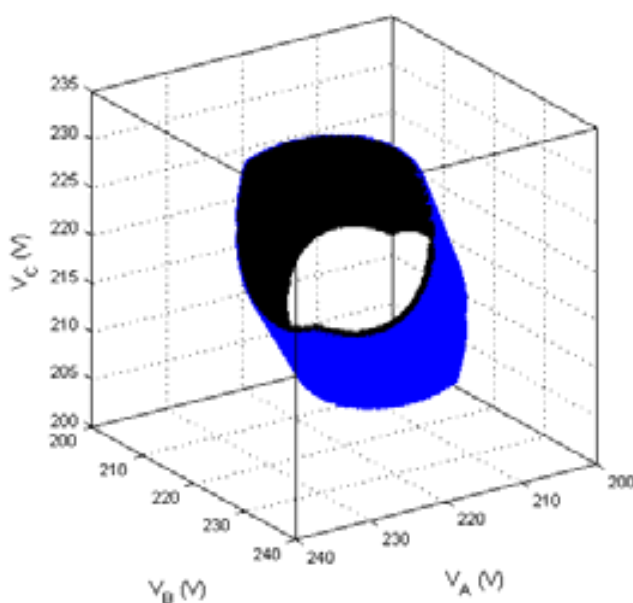


Figura 4.1- Lugar geométrico das amplitudes das tensões que culminam no módulo do fator K igual a 2%

Observa-se da Figura 4.1, que o lugar geométrico das amplitudes das tensões para o módulo do fator $K=2\%$ é um cilindro. O comprimento do cilindro exposto na Figura 4.1 é referente à variação das amplitudes das tensões entre 201 e 231 volts. Caso os limites de variação adotados superem 201 e 231 volts, inúmeros outros fasores tornam-se parte do conjunto que gera $K=2\%$. No interior deste cilindro encontram-se os valores de tensão que geram fator $K<2\%$, assim como, a parte externa do cilindro acomoda os fasores para fatores $K>2\%$.

Para a simplificação dos estudos que se seguem, determinam-se as amplitudes das tensões que compõem a curva da Figura 4.1 em p.u., com a tensão de base igual ao valor da fase A. Com isso, tem-se a Figura 4.2, que expressa o lugar geométrico das tensões normalizadas por V_A , para o fator $K=2\%$.

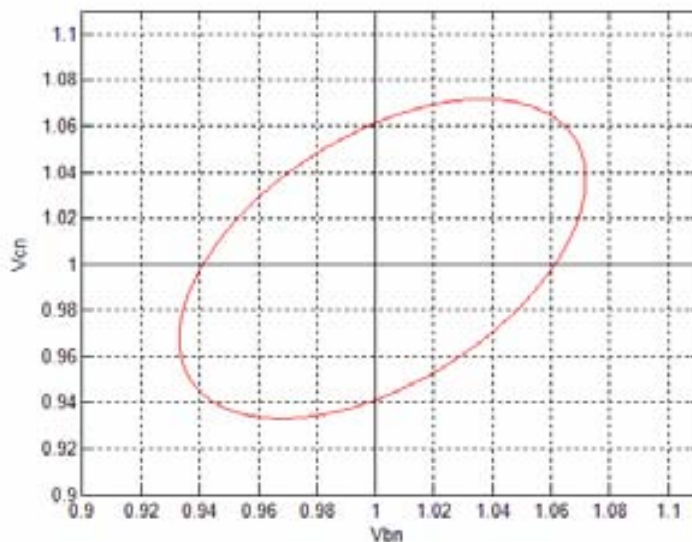


Figura 4.2 - Lugar geométrico das tensões normalizadas por V_A que culminam no módulo do fator K igual a 2% , considerando-se os ângulos constantes

Observa-se da Figura 4.2, que o lugar geométrico das amplitudes das tensões em p.u. com valor de base igual a V_A , para $K=2\%$ é uma elipse centrada nos pontos (1,1) do plano cartesiano. De fato, trata-se de uma das curvas de nível expostas no capítulo 3, quando do estudo do comportamento dos módulos do fator K frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões.

Vale ressaltar da mencionada análise, que existem para um único valor de V_A , com ângulos das tensões constantes em seus valores nominais e com fator $K=2\%$, inúmeras combinações de amplitudes. Tais tensões, se aplicadas sobre equipamentos do sistema elétrico como motores de indução, podem produzir diferentes efeitos.

Com o objetivo de complementar o estudo até então ilustrado tem-se a Figura 4.3 que apresenta os lugares geométricos das amplitudes das tensões para o fator $K=2\%$, considerando-se situações onde os ângulos apresentam-se constantes e com variações de

até 1°. São ainda exibidos nas curvas da Figura 4.3, os valores dos ângulos do fator K para algumas condições de desequilíbrio.

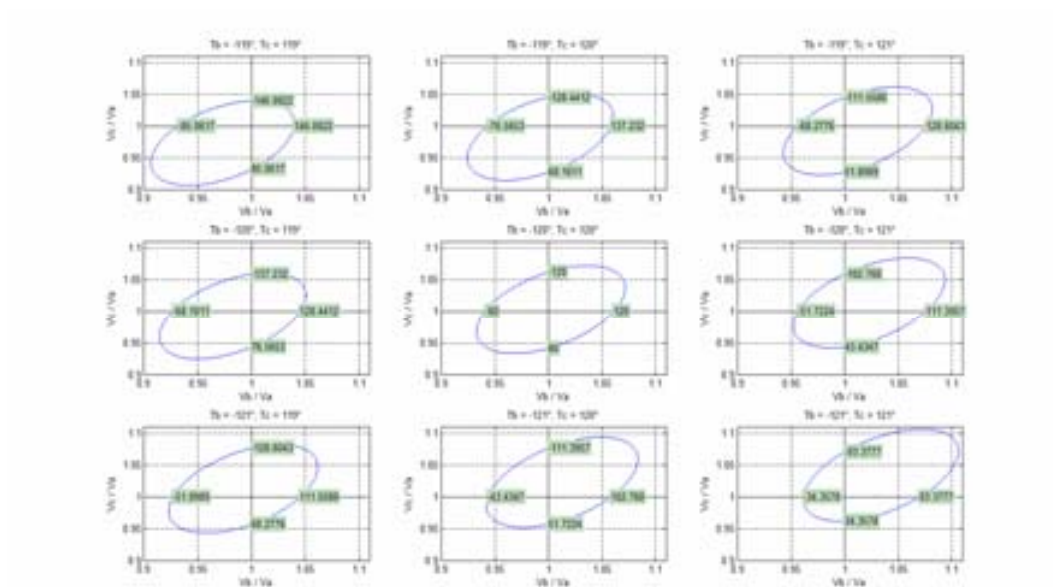


Figura 4.3 – Lugares geométricos das amplitudes para alguns valores distintos de ângulos das tensões

Da Figura 4.3 constata-se que, à medida que se alteram os valores dos ângulos das tensões, as elipses formadas pelas amplitudes das fases A, B e C, deslocam-se no espaço. Verifica-se ainda que os ângulos do fator K assumem variações distintas à medida que os ângulos das tensões são mudados.

As Figuras 4.4 e 4.5 exibem os lugares geométricos das amplitudes das tensões para fator K igual a 0%, variação das tensões de 201 a 231 volts, e ângulos das fases B e C iguais a -121° e 119°, respectivamente, e -124° e 115°. Os valores dos ângulos foram aleatoriamente sugeridos, dentre a imensidão de possíveis combinações. Na verdade, como poderá ser observado, para um mesmo conjunto de ângulos das fases A, B e C, têm-se diversas amplitudes que culminam no fator K igual a 0%. A variação da amplitude é de 1 em 1 volt.

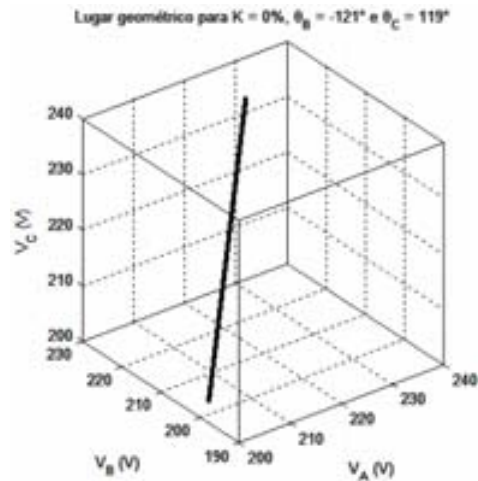


Figura 4.4- Lugar geométrico das amplitudes das tensões que culminam no módulo do fator K igual a 0% , com ângulos iguais a -121° e 119°

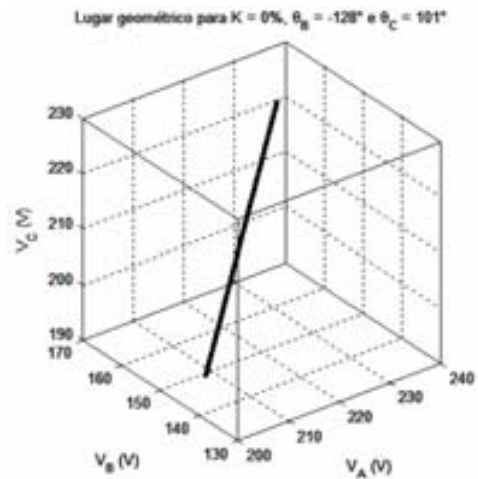


Figura 4.5- Lugar geométrico das amplitudes das tensões que culminam no módulo do fator K igual a 0% , com ângulos iguais a -128° e 101°

Vale ressaltar que a escolha da análise do lugar geométrico com fator K igual a 0% foi estrategicamente selecionada por se tratar de uma condição onde se espera, teoricamente, que não há risco para equipamentos, do ponto de vista de desequilíbrio de tensão. Contudo, o que se observa nas Figuras 4.4 e 4.5, são inúmeros valores de amplitudes desequilibradas que se aplicadas a, por exemplo, um MIT, podem reduzir, consideravelmente, a sua vida útil. Verifica-se ainda que o lugar geométrico das amplitudes das tensões para o módulo do fator $K=0\%$ é uma reta, cuja inclinação depende do valor do ângulo. O comprimento das

retas expostas nas mencionadas figuras é referente à variação das amplitudes das tensões entre 201 e 231 volts. Caso os limites de variação adotados superem 201 e 231 volts, outros fasores tornam-se parte do conjunto que gera fator $K=0\%$.

As Figuras 4.6 e 4.7 ilustram os lugares geométricos das amplitudes das tensões normalizadas por V_A para alguns valores de fator K , com ângulos das fases B e C iguais a -121° e 119° , respectivamente.

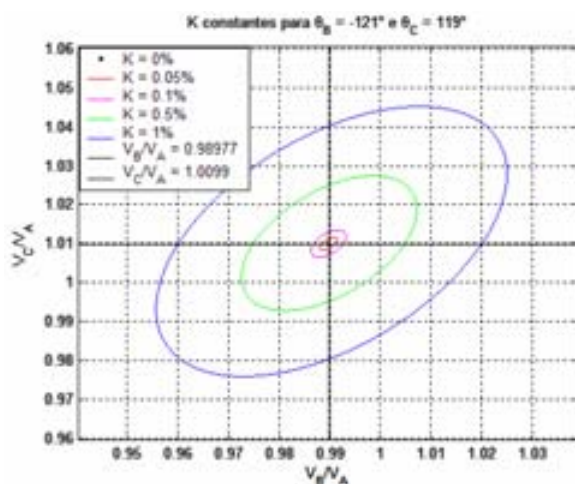


Figura 4.6 - Lugar geométrico das amplitudes normalizadas por V_A , para alguns valores de fator K , com ângulos das fases B e C iguais a -121° e 119° , respectivamente.

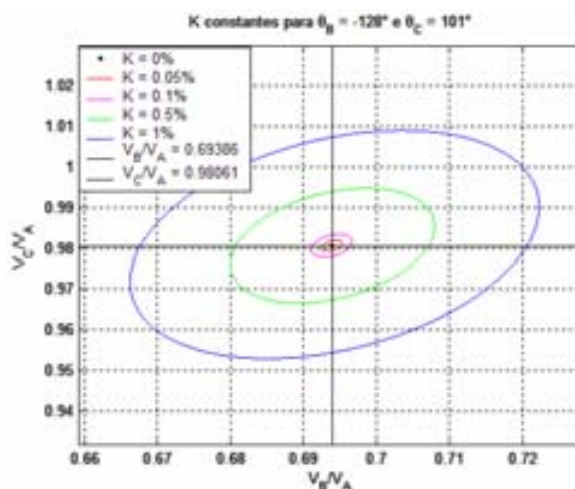


Figura 4.7 - Lugar geométrico das amplitudes normalizadas por V_A para alguns valores de fator K , com ângulos das fases B e C iguais a -128° e 101° , respectivamente.

Das Figuras 4.6 e 4.7, pode-se observar que, quanto maior o fator K maior o comprimento das elipses que constituem o lugar geométrico normalizado para fatores K iguais. Com isso, o número de pontos que constituem cada elipse aumenta à medida que cresce o valor do fator K , e em conseqüência, amplia-se a possibilidade de se ter efeitos diferentes para o mesmo fator K .

4.2.2.2 – Análise gráfica considerando-se a variação dos ângulos das tensões

Inicialmente, há de se ressaltar que, na análise dos ângulos, necessariamente, uma fase é tida como referência. No presente estudo, adota-se o ângulo da fase A constante e igual a 0° .

A – Variação dos ângulos das tensões com as amplitudes em seus valores nominais

A Figura 4.8 ilustra o lugar geométrico dos ângulos das tensões para o fator $K=2\%$ e amplitudes das tensões iguais a 220 volts.

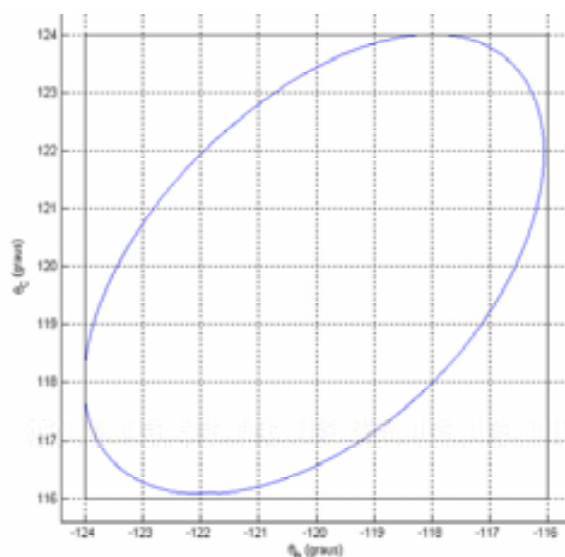


Figura 4.8 - Lugar geométrico dos ângulos das tensões que culminam no módulo do fator $K=2\%$, considerando-se as amplitudes iguais a 220 volts

Observa-se da Figura 4.8, que o lugar geométrico dos ângulos das tensões para o módulo do fator $K=2\%$ é uma elipse. Conclui-se que, mesmo com as amplitudes permanecendo constantes em seus valores nominais, há inúmeros valores de ângulos que combinados produzem desequilíbrios com o fator K constante.

B – Variação dos ângulos com amplitudes das tensões em 201 e 231 volts

As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram os lugares geométricos das tensões para o fator $K=2\%$, considerando-se as situações onde as amplitudes das tensões apresentam-se constantes em 201 e 231 volts, respectivamente.

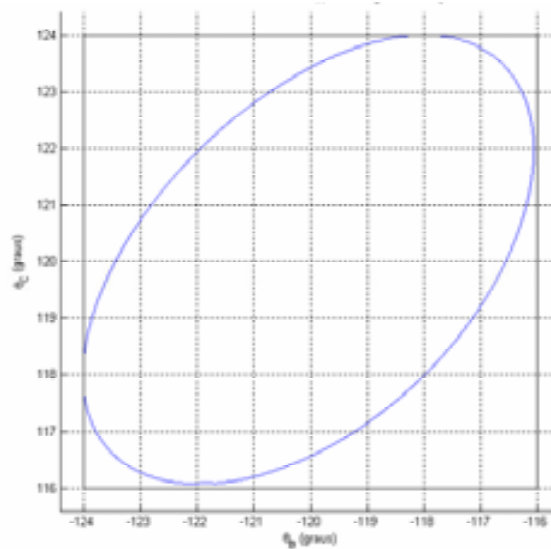


Figura 4.9 - Lugar geométrico dos ângulos das tensões que culminam no módulo do fator K igual a 2%, considerando-se as amplitudes iguais a 201 volts

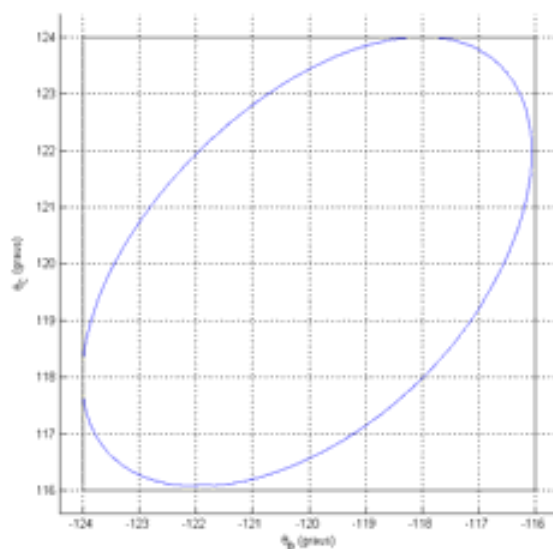


Figura 4.10 - Lugar geométrico dos ângulos das tensões que culminam no módulo do K igual a 2%, considerando-se as amplitudes iguais a 231 volts

Das Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 verifica-se que, os lugares geométricos dos ângulos das tensões para fator $K=2\%$, com amplitudes constantes e iguais a 220, 201 e 231 volts são idênticos. Este fato era esperado, considerando-se que o fator K independe do nível da amplitude da tensão.

4.2.3 – Síntese dos resultados da avaliação dos lugares geométricos das tensões

De posse dos resultados das análises dos itens 4.2.2.1 e 4.2.2.2, quais sejam, a identificação dos lugares geométricos das amplitudes e dos ângulos das tensões que culminam em módulos do fator K idênticos, apresenta-se uma análise crítica dos fasores constituintes do supramencionado conjunto que, provavelmente, aplicados a equipamentos do sistema elétrico de potência, geram efeitos distintos.

Adicionalmente, esse estudo presta-se como base para pesquisas dirigidas à ratificação de inadequação do uso do módulo do fator K como parâmetro único e suficiente para a avaliação da real situação do sistema, do ponto de vista físico, quando submetido a desequilíbrio de tensão.

As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram os lugares geométricos das amplitudes das tensões para $K=2\%$ e $K=1,5\%$, respectivamente, considerando-se os ângulos constantes nos seus valores nominais, e faixa de variação de 201 a 231 volts. Os pontos em destaque nos gráficos constituem as tensões que apresentam pelo menos um módulo em 231 ou 201 volts. É importante ressaltar que a escolha das premissas aplicadas nesta análise justifica-se devido ao objetivo de se identificar, considerando-se os limites de 2% e 1,5%, e dentro da faixa de valores eficazes admissíveis pela Resolução 505 da Aneel para a tensão nominal igual a 220 volts, os fasores de tensão que podem acarretar efeitos distintos quando aplicados em equipamentos do sistema elétrico de potência.

Vale ainda ressaltar que, se estendida a faixa de variação das amplitudes das tensões, torna-se possível, por exemplo, a existência de fasores com pelo menos um módulo próximo a 280 volts, mantendo-se o fator K constante em 2% ou em 1,5%. São exemplos do exposto: $V_A=280\angle 0^\circ$, $V_B=231\angle -102^\circ$, e $V_C=201\angle 117^\circ$ para $K=2\%$ e $V_A=280\angle 0^\circ$, $V_B=225\angle -109^\circ$, e $V_C=225\angle 116^\circ$ para $K=1.42\%$.

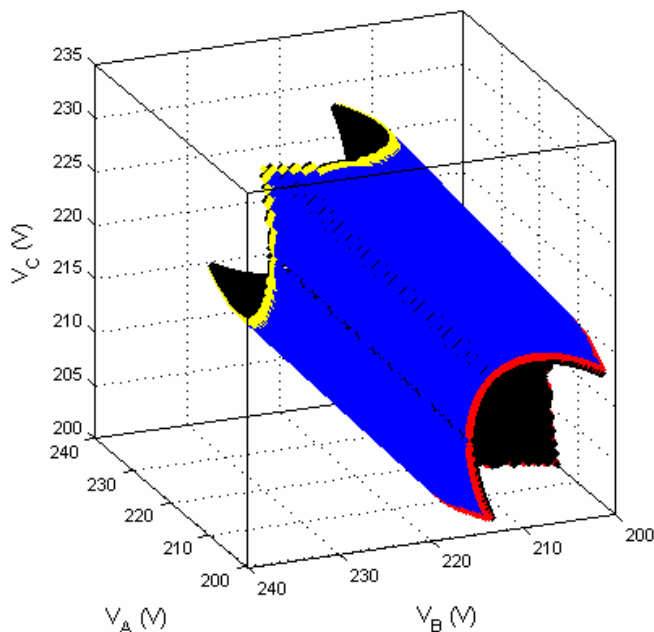


Figura 4.11 - Lugar geométrico das amplitudes das tensões para fator $K=2\%$, com destaque às tensões que apresentam pelo menos um patamar em 231 ou 201 volts

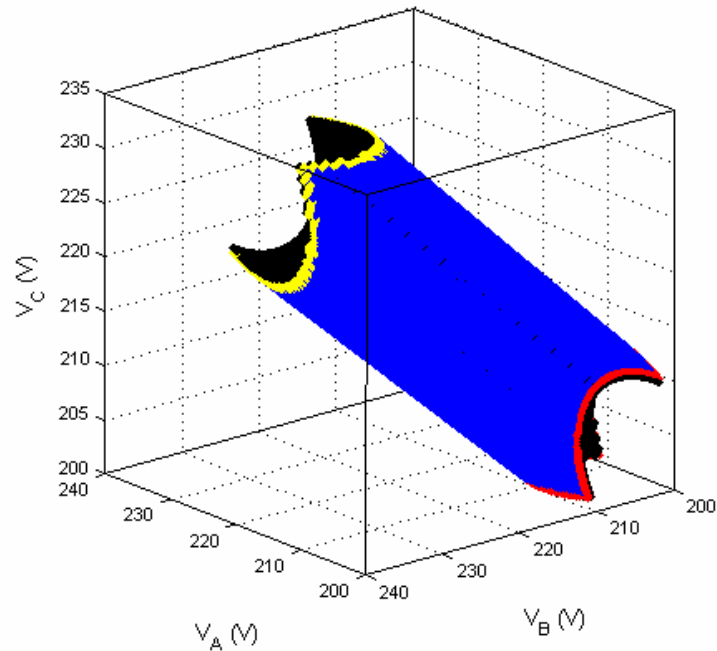


Figura 4.12 - Lugar geométrico das amplitudes das tensões para fator $K=1,5\%$, com destaque às tensões que apresentam pelo menos um patamar em 231 ou 201 volts

Como pode ser observado nas Figuras 4.11 e 4.12, são inúmeros os valores de tensões para $K=2\%$ e $K=1,5\%$ que apresentam pelo menos uma amplitude em 231 ou 201 volts. Como foi destacado, tais curvas referem-se às condições onde os ângulos são mantidos em seus valores nominais. O cilindro para fator $K=1,5\%$ é mais estreito do que o encontrado para fator $K=2\%$. As Tabelas 4.2 e 4.3 exibem alguns dos fasores para as situações onde tem-se $K=2\%$ e $K=1,5\%$, respectivamente. Para o preenchimento das citadas tabelas utilizou-se fasores de tensão onde têm-se condições de desequilíbrio com ângulos constantes ou amplitudes constantes.

Tabela 4.1 – Fasores de tensão para fator $K=2\%$

	Fasores de tensões	Condição da amplitude da tensão	Razões da escolha
Amplitudes constantes em 220, 231 e 201 volts	$V_A=231 \angle 0^\circ$ $V_B=231 \angle -121,70^\circ$ $V_C=231 \angle +116,08^\circ$	Amplitudes das fases A, B e C acima do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 231 volts
	$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=201 \angle -121,59^\circ$ $V_C=201 \angle +116,09^\circ$	Amplitudes das fases A, B e C abaixo do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 201 volts

	$V_A=220 \angle 0^\circ$ $V_B=220 \angle -121,51^\circ$ $V_C=220 \angle +116,10^\circ$	Amplitudes das fases A, B e C com o valor nominal	Apresenta três amplitudes em 220 volts
Ângulos constantes nos seus valores nominais	$V_A=231 \angle 0^\circ$ $V_B=217 \angle -120^\circ$ $V_C=230 \angle +120^\circ$	Amplitudes das fases A e C acima do valor nominal e amplitude da fase B abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes próximas de 231 volts
	$V_A=231 \angle 0^\circ$ $V_B=231 \angle -120^\circ$ $V_C=216 \angle +120^\circ$	Amplitudes das fases A e B acima do valor nominal e amplitude da fase C abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 231 volts
	$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=202 \angle -120^\circ$ $V_C=214 \angle +120^\circ$	Amplitudes das fases A, B e C abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes próximas de 201 volts
	$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=231 \angle -120^\circ$ $V_C=216 \angle +120^\circ$	Amplitudes das fases A e C abaixo do valor nominal e amplitude da fase B acima do valor nominal	Apresenta uma amplitude em 231 volts, uma próxima a 201 e outra próxima a 220 volts.

Tabela 4.2 – Fasores da tensão para fator K=1,5%

	Fasores de tensões	Condição do desequilíbrio em relação ao valor nominal de 220 volts	Razões da escolha
Amplitudes constantes em 220, 231 e 201 volts	$V_A=231 \angle 0^\circ$ $V_B=231 \angle -121,20^\circ$ $V_C=231 \angle +117,06^\circ$	Amplitudes das fases A, B e C acima do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 231 volts
	$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=201 \angle -121,32^\circ$ $V_C=201 \angle +117,05^\circ$	Amplitudes das fases A, B e C abaixo do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 201 volts
	$V_A=220 \angle 0^\circ$ $V_B=220 \angle -121,44^\circ$ $V_C=220 \angle +116,11^\circ$	Amplitudes das fases A, B e C com o valor nominal	Apresenta três amplitudes em 220 volts
Ângulos constantes nos seus valores nominais	$V_A=231 \angle 0^\circ$ $V_B=231 \angle -120^\circ$ $V_C=216 \angle +120^\circ$	Amplitudes das fases A e B acima do valor nominal e amplitude da fase C abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 231 volts

	$V_A=229 \angle 0^\circ$ $V_B=201 \angle -120^\circ$ $V_C=231 \angle +120^\circ$	Amplitudes das fases A e C acima do valor nominal e amplitude da fase B abaixo do valor nominal	Apresenta uma amplitude em 231 volts, uma em 201 e outra próxima a 231 volts
	$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=215 \angle -120^\circ$ $V_C=230 \angle +120^\circ$	Amplitudes das fases A e B abaixo do valor nominal e amplitude da fase C acima do valor nominal	Apresenta uma amplitude em 201 volts, e uma próxima de 231 volts
	$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=201 \angle -120^\circ$ $V_C=211 \angle +120^\circ$	Amplitudes das fases A, B e C abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 231 volts

Da análise das Tabelas 4.1 e 4.2, verifica-se que os fasores que constituem as tensões vinculadas ao fator $K=2\%$ e ao fator $K=1,5\%$, respectivamente, podem estar compreendidos em uma extensa faixa de variação de amplitudes e ângulos. De fato, têm-se circunstâncias onde as amplitudes são mantidas constantes nos valores de 220, 231 e 201 volts, e ainda situações onde os ângulos são mantidos constantes. Destes conjuntos de amostras, convém destacar a existência de fasores que apesar de gerarem fator $K=1,5\%$, aparentam ser mais nocivos às cargas como o motor de indução trifásico (MIT), do que outros que produzem $K=2\%$. É o caso dos fasores $V_A=201 \angle 0^\circ$, $V_B=201 \angle -121,32^\circ$ e $V_C=201 \angle +117,05^\circ$ ($K=1,5\%$), comparados a $V_A=220 \angle 0^\circ$, $V_B=220 \angle -121,59^\circ$ e $V_C=220 \angle +116,09^\circ$ ($K=2\%$).

Essas observações reforçam a necessidade de investigações voltadas à detecção dos efeitos dos desequilíbrios sobre equipamentos como os MIT, quando das suas submissões às condições de desequilíbrios distintas como as expostas nas Tabelas 4.1 e 4.2. Tal procedimento poderá evidenciar o fato de que a análise considerando-se tão somente o módulo do fator K conduz a avaliações equivocadas quanto aos efeitos provocados por desequilíbrios em certos equipamentos do sistema elétrico de potência. Ademais, este tipo de avaliação eleva o número de possibilidades de se atingir uma solução para os obstáculos em questão.

4.3 – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA PARA AS CONDIÇÕES ONDE OS MÓDULOS DO FATOR K SÃO IGUAIS

Identificado o lugar geométrico de alguns dos diferentes fasores que geram um mesmo módulo do fator K , um grupo de pesquisadores propôs o emprego da componente positiva V_1 em conjunto ao módulo do K , para a identificação mais precisa dos efeitos do desequilíbrio sobre os equipamentos do sistema elétrico (Lee, 1997) e (Siddique, 2004). Considerando-se ainda que já foram examinados os efeitos de determinados patamares de V_2 aplicados sobre dispositivos como por exemplo os MIT, reconhece-se que se faz oportuna uma investigação do comportamento das componentes de seqüência para as condições onde o K permanece constante. Tal estudo permite uma avaliação crítica da possibilidade de utilização da seqüência negativa e (ou) positiva em substituição ao fator K quando da quantificação do desequilíbrio de tensão.

De posse das equações (2.5), (2.6) e (2.7) que apresentam, respectivamente, as definições do fator K , de V_2 e de V_1 , detecta-se que inúmeras combinações de módulos e ângulos das tensões podem culminar em componentes de seqüência com valores constantes. Isso justifica a identificação de fatores K iguais para fasores de tensão distintos. A Figura 4.13 ilustra os lugares geométricos das amplitudes para $V_2/V_A=2\%$ e para $K=2\%$, para os ângulos das tensões constantes em 3 valores diferentes.

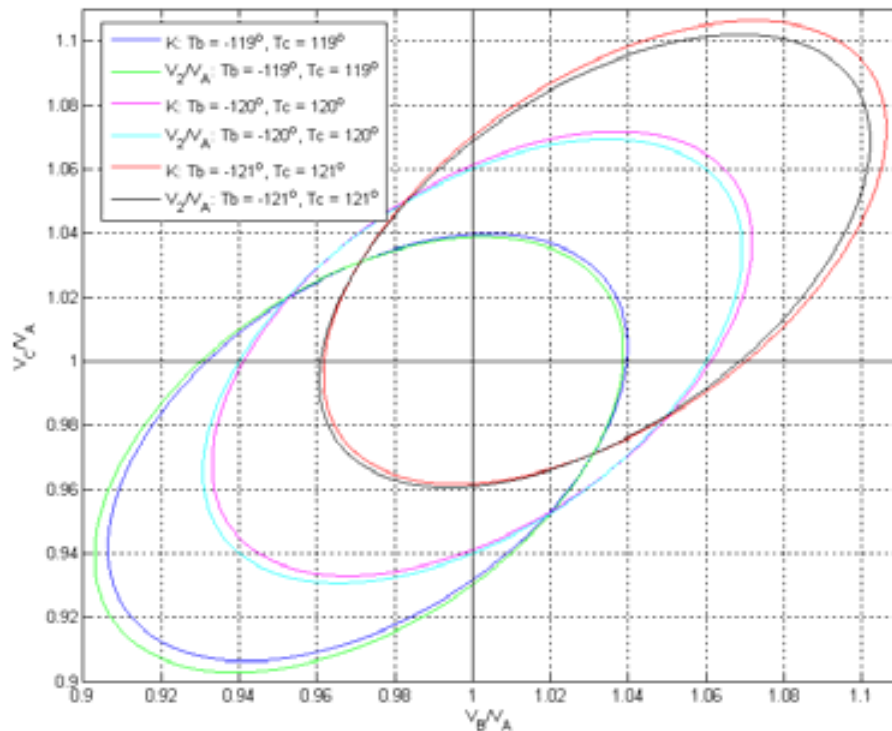


Figura 4.13 – Lugares geométricos das tensões para condições onde os módulos de V_2/V_A e do fator K são iguais a 2%, para 3 condições distintas dos ângulos

Da Figura 4.13, identifica-se que assim como acontece com o fator K , há um lugar geométrico das amplitudes e dos ângulos das tensões onde $V_2/V_A=2\%$. Apesar das diferenças ilustradas na Figura 4.13 entre os lugares geométricos de $V_2/V_A=2\%$ e do fator $K=2\%$, conclui-se que eles são próximos entre si. Na verdade, as discrepâncias alteram-se à medida que se modifica os ângulos das tensões.

A Figura 4.14 apresenta o comportamento dos módulos da componente negativa para condições onde o fator K é igual a 2%, considerando-se variações dos ângulos de até 1° .

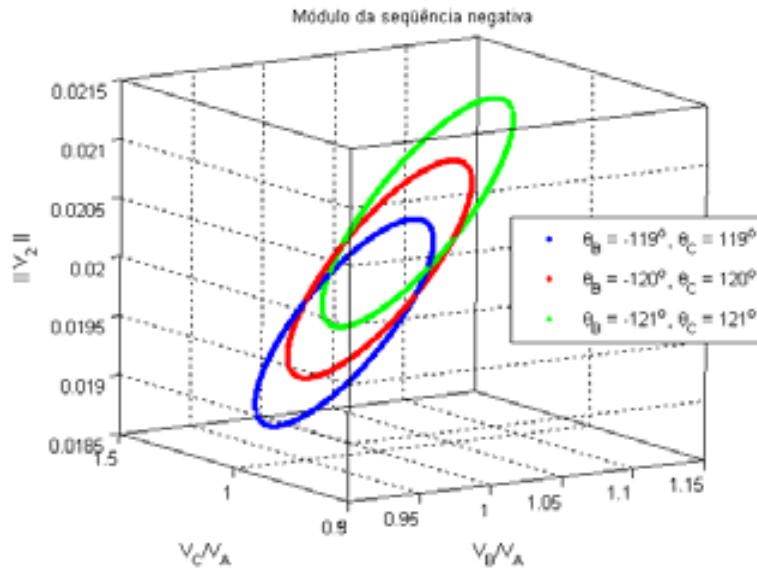


Figura 4.14 - Comportamento do módulo da componente negativa para condições onde o fator K é igual a 2%, considerando-se variações dos ângulos de até 1°

Da figura 4.14 nota-se que apesar do fator K permanecer com valor constante e igual a 2%, o módulo da componente negativa, considerando-se 3 condições de ângulos e a faixa de 201 a 231 volts, varia de acordo com o exposto na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 - Valores máximos e mínimos e faixa de variação dos módulos da componente negativa para fator K igual a 2%, considerando-se a variação dos ângulos das tensões

Ângulos das tensões	$V_2/V_A \times 10^{-2}$		
	Máximo	Mínimo	Faixa de variação
$\Theta_A=0^\circ$ $\Theta_B=-120^\circ$ $\Theta_C=120^\circ$	2,0401	1,8876	0,1525
$\Theta_A=0^\circ$ $\Theta_B=-120^\circ$ $\Theta_C=120^\circ$	2,0833	1,9231	0,1603
$\Theta_A=0^\circ$ $\Theta_B=-120^\circ$ $\Theta_C=120^\circ$	2,1294	1,9607	0,1687

Da investigação da Figura 4.14 e da Tabela 4.3, destaca-se que além do módulo da componente negativa exibir valores máximos e mínimos distintos de acordo com a condição dos ângulos das tensões, a faixa de variação não é constante. Com isso conclui-se que as elipses formadas por cada valor de ângulos das tensões não têm a mesma inclinação.

Logo, pode-se concluir para condições onde o fator K e V_2/V_A são iguais a 2%, que apesar de próximos, os citados índices não são semelhantes. Na verdade, os valores de V_2 são coordenadamente variados de forma que a razão formada com os respectivos módulos de V_1 justificam o K constante. Assim sendo, entende-se que a existência de lugares geométricos das tensões para V_2/V_A constante, inviabiliza a utilização da componente negativa em substituição ao módulo do fator K , para análises de desequilíbrio.

A Figura 4.15 apresenta o comportamento dos módulos da componente positiva para condições onde o fator K é igual a 2%, considerando-se variações dos ângulos de até 1° .

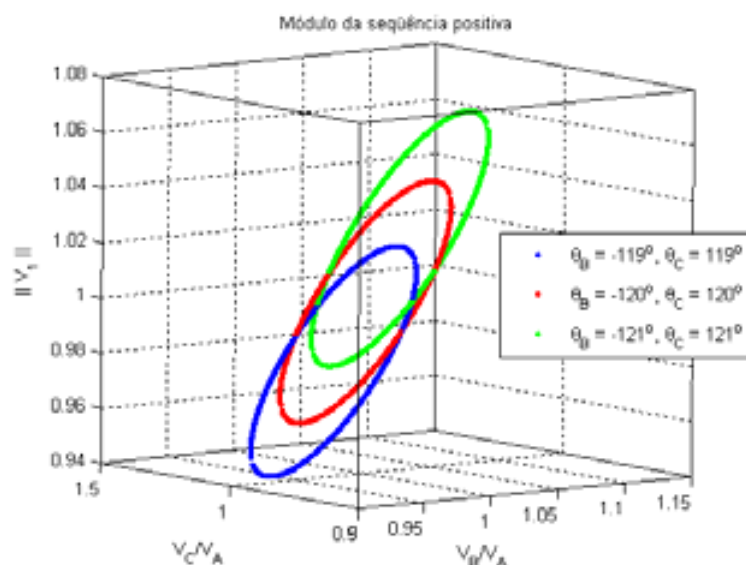


Figura 4.15 - Comportamento do módulo da componente positiva para condições onde o fator K é igual a 2%, considerando-se variações dos ângulos de até 1°

Observa-se da figura 4.15, para o fator K igual a 2%, considerando-se 3 condições de ângulos e o intervalo de 201 a 231 volts, que o módulo da componente positiva modifica-se dentro das faixas de variação expostas na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 - Valores máximos e mínimos e faixa de variação dos módulos da componente positiva para fator K igual a 2%, considerando-se a variação dos ângulos das tensões

Ângulos das tensões	V_1/V_N (%)		
	Máximo	Mínimo	Faixa de variação
$\Theta_A=0^\circ$ $\Theta_B=-120^\circ$ $\Theta_C=120^\circ$	1,0200	0,9438	0,7625
$\Theta_A=0^\circ$ $\Theta_B=-120^\circ$ $\Theta_C=120^\circ$	1,0416	0,9615	0,8013
$\Theta_A=0^\circ$ $\Theta_B=-120^\circ$ $\Theta_C=120^\circ$	1,0647	0,9803	0,8435

Da investigação da Figura 4.15 e da Tabela 4.4, destaca-se que as faixas de variação entre os valores máximos e mínimos dos módulos da componente positiva para cada condição dos ângulos das tensões são diferentes entre si. Os valores das faixas de variação encontrados nas análises da componente positiva comparados, respectivamente, com os da negativa, são mais elevados. Na verdade, para condições onde o fator K é constante, devido às semelhanças entre a componente negativa e o fator K, tem-se uma variação mais acentuada da componente positiva. Há de se destacar também que, em função do seu comportamento e da existência de lugares geométricos das tensões para V_1 constante, a componente positiva não representa uma solução viável para se contornar o possível problema de associação correlacionada entre o desequilíbrio e seu efeito sobre equipamentos do sistema elétrico.

A Figura 4.16 ilustra os lugares geométricos das amplitudes das tensões para V_1 iguais a 210, 215 e 220 volts, para condições onde o fator K é igual a 2%.

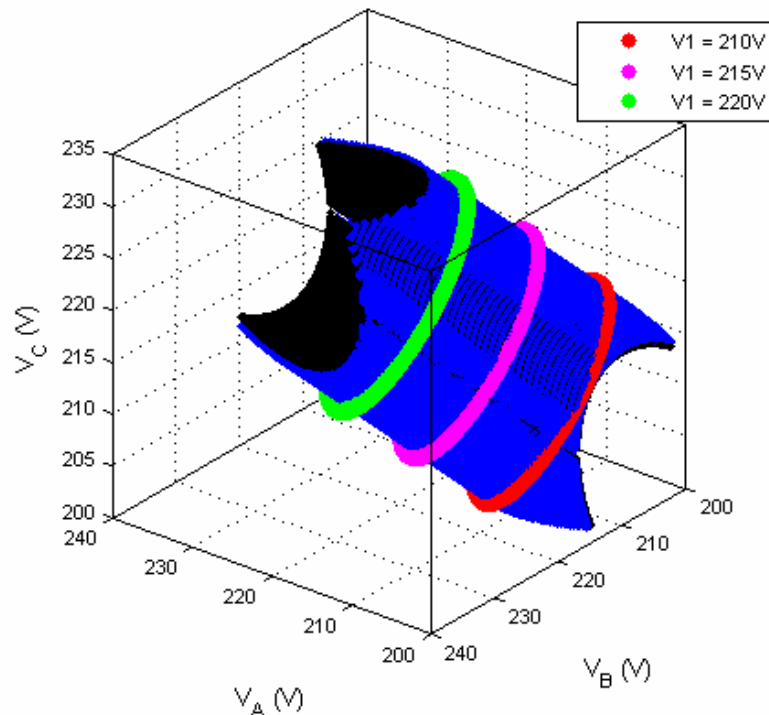


Figura 4.16 – Lugares geométricos das amplitudes das tensões para V_1 iguais a 210, 215 e 220 volts, para condições onde o fator K é igual a 2%.

Da Figura 4.16, onde tem-se o cilindro com as amplitudes da tensão que geram fator $K=2\%$, identifica-se que cada valor constante de V_1 produz uma elipse específica como lugar geométrico. Obviamente, o atendimento simultâneo destas 2 premissas, a saber, o lugar geométrico com K constante e o V_1 fixo, reduz o número de condições de desequilíbrio que produzem K constante, mas não afasta a possibilidades de existência de fasores, dentro de uma mesma elipse, gerando efeitos distintos.

Novamente se faz presente a necessidade de execução de investigações voltadas a determinação dos efeitos da aplicação dos desequilíbrios sobre equipamentos do sistema elétrico, com vistas a sanar a questão da sua quantificação.

Considerando-se os resultados adquiridos na abordagem de todos os tópicos mencionados neste capítulo, e ainda o fato de que não é objetivo deste trabalho o estudo de efeitos sobre equipamentos, tem-se no próximo item uma sugestão de procedimento voltado à criação de

uma metodologia para a quantificação do desequilíbrio. Tal processo está alicerçado na hipótese de que, para eficientemente se solucionar o impasse vinculado à existência de diversos fatores que geram um mesmo fator K, é fundamental correlacionar efeitos com as condições dos desequilíbrios das tensões.

4.4 – PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO

Considerando-se as citadas limitações intrínsecas à utilização do ângulo do fator K e da associação do seu módulo com a componente positiva quando da tentativa de quantificação do desequilíbrio de tensão, surgiu a idéia de geração do guia de procedimentos para o desenvolvimento da pesquisa itemizada a seguir. Tal processo baseia-se em duas proposições:

- Identificação dos efeitos da variação dos ângulos e das amplitudes das tensões sobre os equipamentos; e
- Localização do lugar geométrico das amplitudes da tensão para efeitos semelhantes.

4.4.1 – Efeitos da variação dos ângulos e das amplitudes das tensões

Para a identificação dos efeitos da variação dos ângulos e das amplitudes das tensões sobre os MIT, sugere-se:

- Efetuar um levantamento na literatura atinente dos modelos térmicos dos MIT. Com estes modelos e partindo-se da aplicação de um conjunto de 3 tensões, adquire-se a vida útil do motor. Em seguida, todos eles são avaliados de forma a se escolher um para a aplicação nos estudos aqui idealizados.
- Inicialmente, considerando-se as amplitudes das tensões constantes nos seus valores nominais, levanta-se o valor da vida útil do MIT relacionado a cada condição de desequilíbrio obtido quando tem-se um conjunto de combinações de valores de 2 ângulos da tensão.

- Em seguida, determina-se a vida útil dos MIT para condições onde tem-se a variação das amplitudes, baseado na consideração dos ângulos das tensões constantes nos seus valores nominais.
- Para o caso onde tem-se as amplitudes constantes, pode-se gerar uma figura tridimensional com a vida útil do MIT em um dos eixos e a variação dos ângulos nos demais.
- Em se tratando da variação das amplitudes, pode-se normalizar os valores de V_B e V_C por V_A , e plotar um gráfico tridimensional com a vida útil em um dos eixos e as amplitudes nos outros.
- Em laboratório, aplica-se sobre o MIT alguns dos resultados simulados computacionalmente, com o intuito de se validar os cálculos teóricos.
- Em se tratando das condições onde as amplitudes estão constantes, efetua-se, novamente, todo o procedimento supramencionado para os valores de tensões iguais a 201 e 231 volts.
- Para as situações onde os ângulos permanecem constantes, executa-se todo o procedimento sugerido acima, para valores de ângulos com variação de 1° , por exemplo.
- Identifica-se as possíveis quedas na vida útil do MIT, previstas para variação dos ângulos e também para a variação das amplitudes.

4.4.2 – Lugar geométrico das amplitudes das tensões para efeitos iguais

Para o segundo e último objetivo, propõem-se:

- Buscar na literatura atinente informações sobre quais são os níveis toleráveis de perda de vida útil.
- De posse do conjunto de informações adquiridas, identifica-se o lugar geométrico das amplitudes das tensões para ângulos constantes em seus valores nominais, em que tem-se a vida útil semelhante.
- Determinar a variação máxima de tensão permitida para que a vida útil do MIT não ultrapasse um determinado patamar preestabelecido.

- Estes patamares podem constituir um conjunto de faixas de variação das tensões para cada fase, que o sistema não pode transgredir.

É possível que com a execução destas ações, se adquira uma metodologia preliminar que venha a culminar em um processo capaz de associar as características do desequilíbrio com os seus efeitos.

4.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas observações efetuadas no capítulo 3, desenvolveu-se um exame analítico e gráfico dos valores de amplitudes e ângulos das tensões que acarretam módulos do fator K iguais. O comportamento das componentes de seqüência foi investigado com o intuito de se avaliar as possibilidades de sua utilização, quando da necessidade de quantificação do desequilíbrio de tensão.

Inicialmente, observou-se que o lugar geométrico das amplitudes das tensões para K idênticos, é um cilindro com forma de elipse. Tanto pelo desenvolvimento analítico como pela avaliação gráfica, conclui-se que para um mesmo valor de K, há inúmeros fasores de tensões que podem gerar efeitos diferentes se aplicados sobre equipamentos do sistema elétrico. Tal conclusão pode também ser estendida às análises onde se identifica o lugar geométrico dos ângulos das tensões que produzem um mesmo patamar de fator K. Nesse caso, observou-se que os lugares geométricos dos ângulos para fator K igual a 2%, considerando-se separadamente as condições onde as amplitudes são 201, 220 e 231 volts, são idênticos.

Em seguida, observou-se que os ângulos do fator K não exibem informações úteis às análises do desequilíbrio, devido ao fato de que os mesmos variam à medida que se modifica os ângulos das tensões.

Identificou-se com o estudo do lugar geométrico dos módulos das tensões para $K=0\%$, inúmeros valores de amplitudes desequilibradas que se aplicadas a, por exemplo, um MIT, podem reduzir, consideravelmente, a sua vida útil. Observou-se também que quanto maior o fator K maior o comprimento das elipses que constituem o lugar geométrico normalizado para fatores K iguais. Com isso, o número de pontos que constituem cada elipse aumenta à medida que cresce o valor do fator K , e em conseqüência, amplia-se a possibilidade de se ter efeitos diferentes para o mesmo fator K .

Com a identificação dos já mencionados lugares geométricos, determinou-se alguns fasores de tensão onde tem-se fator $K=1,5\%$. O mesmo foi efetuado para valores de fator $K=2\%$. Devido as suas especificidades, pode-se concluir que, alguns fasores, apesar de produzirem um desequilíbrio cujo fator K é igual a $1,5\%$, aparentam poder provocar efeitos mais nocivos a equipamentos do sistema de potência, do que outros fasores onde alcança-se fator K igual 2% .

Quanto às investigações dos comportamentos das componentes de seqüência para fasores de tensão que produzem $K=2\%$, detectou-se que a componente negativa apresenta valores próximos aos ilustrados pelo fator K . Verificou-se também a existência de um lugar geométrico para as amplitudes das tensões onde os módulos da componente negativa são iguais a 2% . Logo, a sua utilização em substituição ao fator K quando da necessidade de quantificação do desequilíbrio de tensão é inviável. De fato, teoricamente, a componente negativa não representa uma solução útil para análise do desequilíbrio, no que diz respeito à indicação da exata situação do sistema, do ponto de vista físico, quando da verificação de fatores K iguais.

A avaliação do comportamento da componente positiva permitiu a constatação de que a mesma, tratada isoladamente, não é recomendável para a quantificação do desequilíbrio. Verificou-se também que, a associação do fator K com a componente positiva para a quantificação do desequilíbrio em condições onde o fator K permanece constante, reduz o

número de fasores capazes de gerar efeitos distintos, mas não elimina por completo o problema.

Neste ínterim e mediante todas as conclusões adquiridas nesse estudo, entende-se que tanto o fator K como as componentes negativa e positiva exibem limitações que podem inviabilizar a sua utilização para a quantificação do desequilíbrio de tensão. Para a confirmação dessa proposição, sugerem-se estudos de avaliação dos efeitos do desequilíbrio sobre equipamentos do sistema, com o intuito, inclusive, de se identificar metodologias capazes de solucionar a dificuldade supramencionada.

5 – ESTUDO DE EFEITOS - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

5.1 – Considerações iniciais

Apresentam-se neste capítulo, os principais resultados das medições efetuadas em um laboratório com vistas à ratificação, com base na análise de efeitos sobre um motor de indução, de que o emprego do fator K como índice único e suficiente para a quantificação do desequilíbrio de tensão, é inadequado.

Considerando-se o mencionado objetivo, este capítulo inicia-se com a apresentação dos dados empregados nos ensaios. Em seguida, têm-se os resultados oriundos das medições em laboratório.

De fato, a meta ensejada neste tópico é, baseado nas condições de desequilíbrio que culminam em fatores K iguais a 1,5%, 2%, 4% e 0%, demonstrar que:

- Para um mesmo valor de fator K há inúmeras condições de desequilíbrio capazes de gerar efeitos diferentes sobre cargas como um MIT;
- Existem valores de tensão que, apesar de gerarem fatores K iguais a 2% e 4%, os seus efeitos são menos nocivos ao MIT do que os encontrados para fator K igual a 1,5%; e
- Há diversos valores de tensões para fator K igual a 0%, que aplicados sobre o MIT culminam em efeitos mais nocivos do que os encontrados quando da aplicação de combinações com o fator K igual a 4%.

É importante ressaltar que não se objetiva neste trabalho a determinação das razões que justificam porque uma determinada condição de desequilíbrio culmina em uma redução mais ou menos acentuada do que outra onde o fator K é o mesmo. Muito provavelmente, essas explicações surgirão quando da descoberta de uma nova metodologia de quantificação do desequilíbrio de tensão.

5.2 - Casos Estudados

São empregados nesta etapa do estudo, valores de tensão (amplitudes e ângulos), estrategicamente escolhidos, com vistas à geração de resultados que permitam concluir a respeito dos propósitos supramencionados. No primeiro instante, trabalha-se com um conjunto trifásico de tensões equilibradas. Em seguida, aplica-se sobre o motor tensões desequilibradas que possuem fator K igual a 2%. A Tabela 5.1 ilustra tais valores seguidos das razões que conduziram às suas escolhas.

Tabela 5.1 – Fasores de tensão para fator K=2%

Fasores de tensões	Condição da amplitude da tensão	Razões da escolha
$V_A = 231 \angle 0^\circ$ $V_B = 231 \angle -121,70^\circ$ $V_C = 231 \angle +116,08^\circ$ $K = 2,0003\%$	Amplitudes das fases A, B e C acima do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 231 volts
$V_A = 210 \angle 0^\circ$ $V_B = 225 \angle -120^\circ$ $V_C = 215 \angle 120^\circ$ $K = 2,0350\%$	Amplitudes das fases A e C abaixo do valor nominal e amplitude da fase B acima do valor nominal	Apresenta uma amplitude um pouco acima de 220 volts, e duas outras um pouco abaixo.
$V_A = 201 \angle 0^\circ$ $V_B = 201 \angle -121,59^\circ$ $V_C = 201 \angle 116,09^\circ$ $K = 2,0004\%$	Amplitudes das fases A, B e C abaixo do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 201 volts
$V_A = 231 \angle 0^\circ$ $V_B = 217 \angle -120^\circ$ $V_C = 230 \angle +120^\circ$ $K = 1,9952\%$	Amplitudes das fases A e C acima do valor nominal e amplitude da fase B abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes próximas de 231 volts
$V_A = 231 \angle 0^\circ$ $V_B = 231 \angle -120^\circ$ $V_C = 216 \angle +120^\circ$ $K = 2,212\%$	Amplitudes das fases A e B acima do valor nominal e amplitude da fase C abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 231 volts
$V_A = 201 \angle 0^\circ$ $V_B = 202 \angle -120^\circ$ $V_C = 214 \angle +120^\circ$ $K = 2,0308\%$	Amplitudes das fases A, B e C abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes próximas de 201 volts
$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 220 \angle -121,44^\circ$ $V_C = 220 \angle 116,11^\circ$ $K = 1,9999\%$	Amplitudes das fases A, B e C com o valor nominal	Apresenta três amplitudes em 220 volts

$V_A = 210 \angle 0^\circ$ $V_B = 225 \angle -120^\circ$ $V_C = 215 \angle 120^\circ$ $K = 2,035\%$	Amplitudes das fases A e C abaixo do valor nominal e amplitude da fase B acima do valor nominal	Apresenta três amplitudes em torno de 220 volts
--	---	---

Observa-se da Tabela 5.1 a existência de valores de tensão com variação das amplitudes para ângulos constantes, de variações dos ângulos das tensões para amplitudes constantes, e de variações simultâneas das amplitudes e dos ângulos.

Na seqüência, 3 diferentes conjuntos de dados são empregados (Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4), respectivamente, para valores de fator K iguais a 1,5%, 0% e 4%.

Tabela 5.2 – Fasores da tensão para fator K=1,5%

Fasores de tensões	Condição do desequilíbrio em relação ao valor nominal de 220 volts	Razões da escolha
$V_A = 231 \angle 0^\circ$ $V_B = 231 \angle -121,20^\circ$ $V_C = 231 \angle +117,06^\circ$ $K = 1,5003\%$	Amplitudes das fases A, B e C acima do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 231 volts
$V_A = 201 \angle 0^\circ$ $V_B = 201 \angle -121,32^\circ$ $V_C = 201 \angle +117,05^\circ$ $K = 1,5001\%$	Amplitudes das fases A, B e C abaixo do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 201 volts
$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 220 \angle -121,20^\circ$ $V_C = 220 \angle +117,05^\circ$ $K = 1,506\%$	Amplitudes das fases A, B e C com o valor nominal	Apresenta três amplitudes em 220 volts
$V_A = 226 \angle 0^\circ$ $V_B = 226 \angle -120^\circ$ $V_C = 216 \angle +120^\circ$ $K = 1,497\%$	Amplitudes das fases A e B acima do valor nominal e amplitude da fase C abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 226 volts
$V_A = 216 \angle 0^\circ$ $V_B = 216 \angle -120^\circ$ $V_C = 226 \angle +120^\circ$ $K = 1,52\%$	Amplitudes das fases A e B abaixo do valor nominal e amplitude da fase C acima do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 216 volts
$V_A = 216 \angle 0^\circ$ $V_B = 226 \angle -120^\circ$ $V_C = 226 \angle +120^\circ$ $K = 1,497\%$	Amplitudes da fase A abaixo do valor nominal e amplitude das fases B e C acima do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 226 volts

$V_A=226 \angle 0^\circ$ $V_B=216 \angle -120^\circ$ $V_C=216 \angle +120^\circ$ $K = 1,52\%$	Amplitudes das fases A e C abaixo do valor nominal e amplitude da fase B acima do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 216 volts
--	---	--

Tabela 5.3 – Fasores da tensão para fator K=0%

Fasores de tensões	Condição do desequilíbrio em relação ao valor nominal de 220 volts	Razões da escolha
$V_A=220 \angle 0^\circ$ $V_B=213.576 \angle -119^\circ$ $V_C=213.576 \angle +119^\circ$ $K = 7,05 \cdot 10^{-5}\%$	Amplitudes das fases B e C abaixo do valor nominal	-
$V_A=220 \angle 0^\circ$ $V_B=217.838 \angle -119^\circ$ $V_C=215.610 \angle +120^\circ$ $K = 2,84 \cdot 10^{-5}\%$	Amplitudes das fases B e C abaixo do valor nominal	-
$V_A=220 \angle 0^\circ$ $V_B=222.271 \angle -121^\circ$ $V_C=224.477 \angle +120^\circ$ $K = 3,58 \cdot 10^{-4}\%$	Amplitudes das fases B e C acima do valor nominal	-
$V_A=220 \angle 0^\circ$ $V_B=226.893 \angle -121^\circ$ $V_C=226.893 \angle +121^\circ$ $K = 2,697 \cdot 10^{-5}\%$	Amplitudes das fases B e C acima do valor nominal	-
$V_A=224.323 \angle 0^\circ$ $V_B=217.773 \angle -119^\circ$ $V_C=217.773 \angle +119^\circ$ $K = 3,43 \cdot 10^{-5}\%$	Amplitudes das fases B e C abaixo do valor nominal e amplitude da fase A acima do valor nominal	-
$V_A=215.453 \angle 0^\circ$ $V_B=222.204 \angle -121^\circ$ $V_C=222.204 \angle +121^\circ$ $K = 4,15 \cdot 10^{-5}\%$	Amplitudes das fases B e C acima do valor nominal e amplitude da fase A abaixo do valor nominal	-
$V_A=197,8 \angle 0^\circ$ $V_B=204 \angle -121^\circ$ $V_C=204 \angle +121^\circ$ $K = 2,1356 \cdot 10^{-6}\%$	Amplitudes das fases A, B e C abaixo do valor nominal	-
$V_A=225,22 \angle 0^\circ$ $V_B=232,28 \angle -121^\circ$ $V_C=232,28 \angle +121^\circ$ $K = 2,1702 \cdot 10^{-4}\%$	Amplitudes das fases A, B e C acima do valor nominal	-

Tabela 5.4 – Fasores da tensão para fator K=4%

Fasores de tensões	Condição do desequilíbrio em relação ao valor nominal de 220 volts	Razões da escolha
$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=231 \angle -120^\circ$ $V_C=216 \angle +120^\circ$ $K = 4,009\%$	Amplitudes das fases A e C abaixo do valor nominal e amplitude da fase B acima do valor nominal	Apresenta uma amplitude em 201 volts, e uma em 231 volts
$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=201 \angle -115^\circ$ $V_C=201 \angle +128^\circ$ $K = 4,005\%$	Amplitudes das fases A, B e C abaixo do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 201 volts
$V_A=220 \angle 0^\circ$ $V_B=220 \angle -115^\circ$ $V_C=220 \angle +128^\circ$ $K = 4,005\%$	Amplitudes das fases A, B e C com o valor nominal	Apresenta três amplitudes em 220 volts
$V_A=231 \angle 0^\circ$ $V_B=231 \angle -115^\circ$ $V_C=231 \angle +128^\circ$ $K = 4,005\%$	Amplitudes das fases A, B e C acima do valor nominal	Apresenta três amplitudes em 231 volts
$V_A=231 \angle 0^\circ$ $V_B=231 \angle -120^\circ$ $V_C=204 \angle +120^\circ$ $K = 4,054\%$	Amplitudes das fases A e B acima do valor nominal e amplitude da fase C abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 231 volts
$V_A=231 \angle 0^\circ$ $V_B=204 \angle -120^\circ$ $V_C=231 \angle +120^\circ$ $K = 4,054\%$	Amplitudes das fases A e C acima do valor nominal e amplitude da fase B abaixo do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 231 volts
$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=201 \angle -120^\circ$ $V_C=226 \angle +120^\circ$ $K = 3,98\%$	Amplitudes das fases A e B abaixo do valor nominal e amplitude da fase C acima do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 201 volts
$V_A=201 \angle 0^\circ$ $V_B=226 \angle -120^\circ$ $V_C=201 \angle +120^\circ$ $K = 3,98\%$	Amplitudes das fases A e C abaixo do valor nominal e amplitude da fase B acima do valor nominal	Apresenta duas amplitudes em 201 volts

As Tabelas 5.2 e 5.4 seguem o mesmo princípio de construção adotado na Tabela 5.1, ou seja, a menos dos valores onde o fator K é igual a 0%, tem-se ensaiados conjuntos de tensões com 231, 220, e 201 volts, além de condições onde se tem a combinação de patamares acima, abaixo e iguais ao valor nominal.

A seguir serão apresentados os resultados das aplicações dos fasores mencionados nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 sobre o MIT. Em função das suas especificidades e ainda dos objetivos deste capítulo, os mesmos serão detalhadamente expostos e analisados.

5.3 – Resultados dos ensaios em laboratório

A primeira condição operacional será abordada com o propósito de fornecer dados a respeito do funcionamento do motor submetido às tensões equilibradas. Posteriormente, os resultados deste ensaio se prestarão como referência para as discussões comparativas com os demais oriundos de situações não ideais de operação. Neste interim, o motor de indução foi então submetido a uma tensão de 220 V senoidal e sem qualquer tipo de distúrbio. As temperaturas internas do motor, as correntes elétricas e as tensões de suprimento foram individualmente monitoradas.

5.3.1 – Condição ideal de suprimento

A Tabela 5.5 ilustra os resultados gerais oriundos da aplicação das tensões nominais sobre o MIT.

Tabela 5.5 – Resultados oriundos da aplicação de tensões equilibradas sobre o MIT

Ensaio	Tensões idealizadas para o ensaio	Tensões aplicadas sobre o MIT	Fator K [%]	Correntes nas 3 Fases do Motor [A]			Temperatura [°C]		Redução da Vida Útil [%]
				A	B	C	Máxima	Ambiente	
1	$V_A = 220 \angle 0^\circ$ $V_B = 220 \angle -120^\circ$ $V_C = 220 \angle 120^\circ$	$V_A = 220,22 \angle 0^\circ$ $V_B = 220,10 \angle 240,1^\circ$ $V_C = 219,94 \angle 120,1^\circ$	0	5,79	5,14	4,93	70,5	27,573	0

Da Tabela 5.5, observa-se que os valores aplicados de fato sobre o MIT são muito próximos aos idealizados teoricamente. Apesar do sistema de tensões ser equilibrado, as correntes elétricas não são. Isso se dá devido às impedâncias dos enrolamentos. A temperatura máxima alcançada no ensaio com as tensões nominais é igual a 70,5°C. Para esta condição, estabelece-se que não há redução da vida útil do motor.

A Figura 5.1 ilustra as formas de onda das tensões aplicadas aos terminais do motor de indução no ensaio 1.

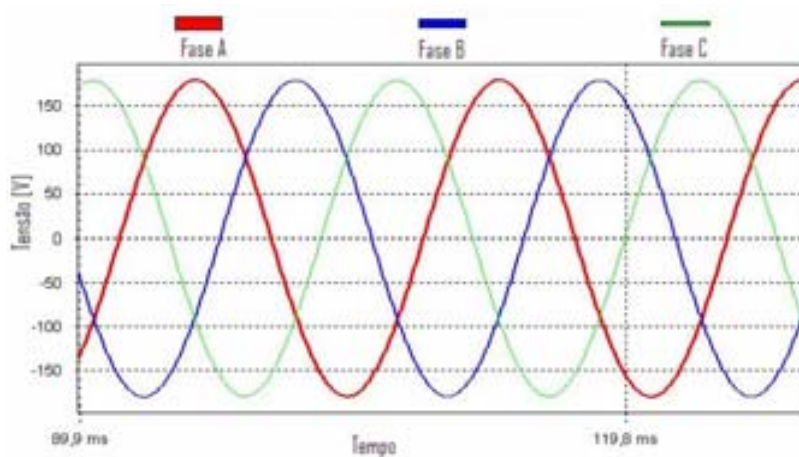


Figura 5.1 – Tensões trifásicas de alimentação senoidais

Embora tenha sido programada na fonte de suprimento uma tensão perfeitamente senoidal, o espectro da forma de onda apresentou uma distorção harmônica total (DHT) de 0,5%, que pode ser atribuída ao equipamento de medição e (ou) à fonte de suprimento. Apesar disso, através de uma inspeção visual (Figura 5.1), pode-se constatar que a mesma é praticamente senoidal, reproduzindo-se assim as condições experimentais estabelecidas teoricamente.

Empregando-se um sistema de aquisição de dados, procedeu-se o monitoramento das temperaturas ao longo do tempo, até que o regime térmico fosse atingindo. Dentro da estratégia apresentada, obteve-se a Figura 5.2, que fornece a elevação da temperatura na cabeça da bobina do estator em função do tempo de funcionamento, além da temperatura ambiente para cada instante da medição.

Como já mencionado anteriormente, o motor encontra-se acionando um gerador de corrente contínua que resulta na absorção de 75% do seu valor nominal de corrente. Em outras palavras, a carga mecânica é correspondente a 75% do valor nominal de placa da máquina de indução.

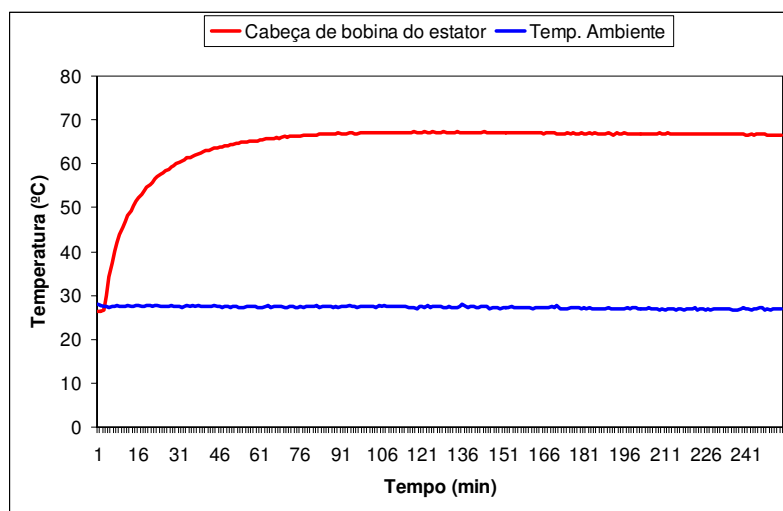


Figura 5.2 – Elevação da temperatura do enrolamento do estator

A análise da Figura 5.2 permite constatar que a elevação da temperatura do enrolamento do estator é inferior àquela estabelecida pela classe de isolamento do motor, qual seja a classe B, que permite uma temperatura máxima da ordem de 130 °C, ou elevação, em relação à temperatura ambiente, não superior a 80°C.

Vale ressaltar que em análises preliminares (Souto, 2001), evidenciou-se que o ponto mais quente localiza-se nas “cabeças de bobina”. De fato, nesta região, o enrolamento do estator além de receber calor do restante do próprio enrolamento e do núcleo do estator, absorve energia térmica proveniente do rotor.

5.3.2 – Condições não ideais de suprimento

Neste tópico serão abordadas, inicialmente, duas condições de desequilíbrio onde as tensões geram um fator K igual a 2%. Para estas situações, serão exibidos os gráficos de tensão e de temperatura. Em seguida, os demais resultados obtidos para os ensaios envolvendo valores de fator K iguais a 2%, 1,5%, 0% e 4%, serão expostos e analisados visando-se alcançar os objetivos supramencionados.

A) Resultados gerais dos ensaios onde têm-se duas condições com K=2%

A Tabela 5.6 apresenta os resultados gerais oriundos da aplicação de tensões com fator K igual a 2% sobre o MIT.

Tabela 5.6 – Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=2% sobre o MIT

Ensaio	Tensões idealizadas para o ensaio	Tensões aplicadas sobre o MIT	Fator K [%]	Correntes nas 3 Fases do Motor [A]			Temperatura [°C]		Redução da Vida Útil [%]
				A	B	C	Máxima	Ambiente	
2	$V_A = 231 \angle 0^\circ$ $V_B = 231 \angle -121,7^\circ$ $V_C = 231 \angle 116,8^\circ$	$V_A = 230,47 \angle 0^\circ$ $V_B = 231,84 \angle 239,2^\circ$ $V_C = 231,06 \angle 113,2^\circ$	2,0003 %	5,47	6,62	6,4	89,682	27,012	74%
3	$V_A = 210 \angle 0^\circ$ $V_B = 225 \angle -120^\circ$ $V_C = 215 \angle 120^\circ$	$V_A = 209,98 \angle 0^\circ$ $V_B = 225,03 \angle 240,9^\circ$ $V_C = 215,15 \angle 121,6^\circ$	2,035 %	5,2	6,57	3,93	75,977	28,182	42%

Da Tabela 5.6 observa-se que apesar das diferenças encontradas entre os valores teóricos a serem aplicados sobre o MIT e os de fato empregados, o ensaio não fica comprometido, sobretudo porque o fator K permanece em 2%. As correntes elétricas que exibiram discrepâncias já para o sistema de alimentação equilibrado, apresentam agora desequilíbrios mais acentuados, nos dois casos em estudo. A temperatura máxima alcançada no primeiro ensaio em avaliação é igual a 89,682 °C. No segundo experimento, a temperatura atingida é de 75,977 °C. As reduções da vida útil previstas para o MIT para os dois casos em avaliação são, respectivamente, de 74% e 42%. Trata-se de valores elevados, podendo culminar em prejuízos financeiros significativos quando da necessidade de substituição do MIT. Vale ressaltar que os efeitos das aplicações destas duas condições de tensões sobre o MIT, para o mesmo valor de fator K, representados partindo-se do cálculo da vida útil, são bastante diferentes.

As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram as formas de onda das tensões aplicadas aos terminais do motor de indução nos ensaios 2 e 3, respectivamente.

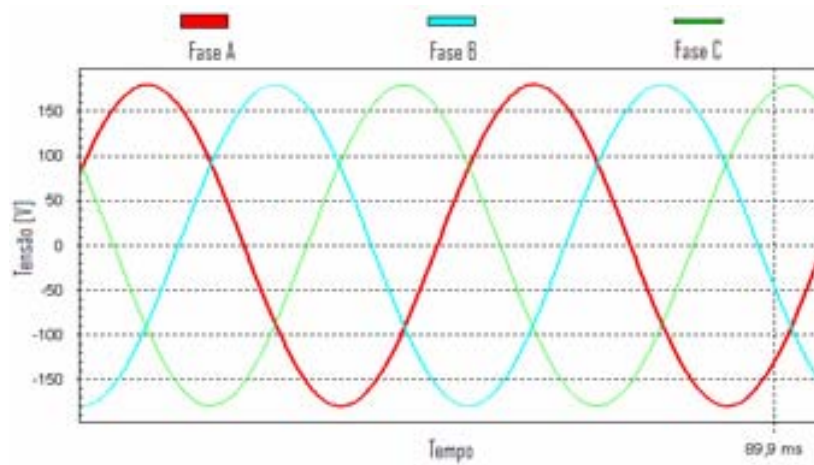


Figura 5.3 – Formas de onda empregadas no ensaio 2

$$V_A = 231 \angle 0^\circ \quad V_B = 231 \angle -121,7^\circ \quad V_C = 231 \angle 116,8^\circ$$



Figura 5.4 – Formas de onda empregadas no ensaio 3

$$V_A = 210 \angle 0^\circ \quad V_B = 225 \angle -120^\circ \quad V_C = 215 \angle 120^\circ$$

Assim como na condição onde as tensões eram equilibradas (ensaio 1), os espectros das formas de onda observadas nas Figuras 5.3 e 5.4 apresentaram uma distorção harmônica total (DHT) de aproximadamente 0,5%. Tal fato implica em erros desprezíveis, considerando-se os propósitos desta pesquisa. Quanto aos desequilíbrios aplicados nos ensaios 2 e 3, visualmente, só é possível detectá-los na Figura 5.4, onde constata-se diferenças entre as amplitudes das tensões.

As Figuras 5.5 e 5.6 fornecem, respectivamente para os ensaios 2 e 3, o comportamento da temperatura na cabeça da bobina do estator em função do tempo de funcionamento, além da temperatura ambiente para cada instante da medição.

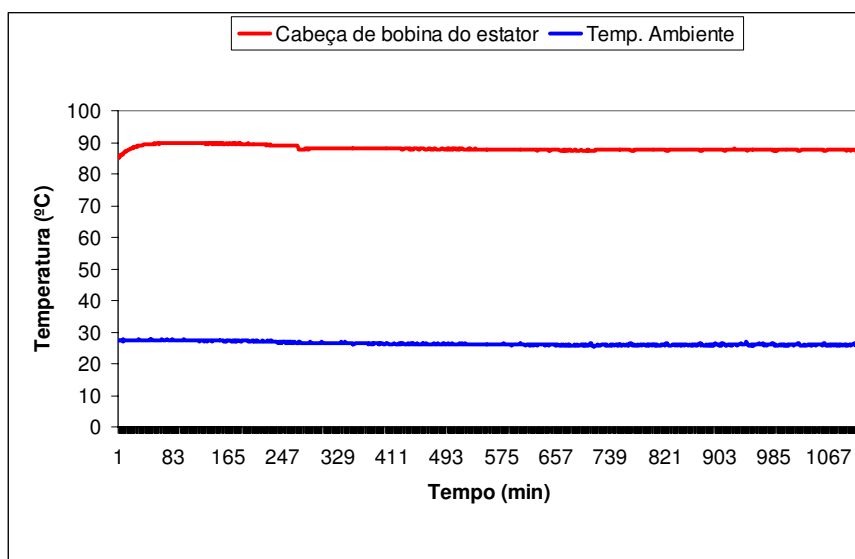


Figura 5.5 – Elevação da temperatura do enrolamento do estator no ensaio 2

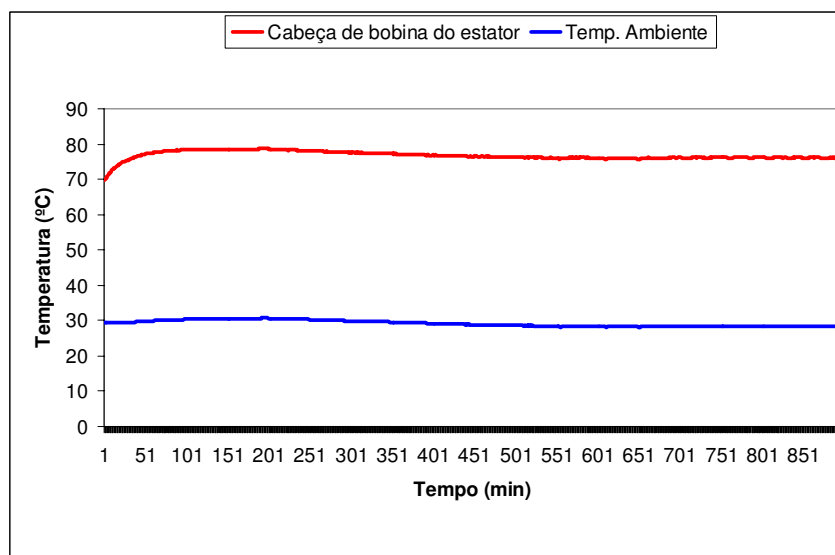


Figura 5.6 – Elevação da temperatura do enrolamento do estator no ensaio 3

A análise das Figuras 5.5 e 5.6 permite constatar que a elevação da temperatura do enrolamento do estator é inferior à temperatura de 130 °C, estabelecida pela classe de

isolamento do motor. Contudo, ressalta-se que as temperaturas experimentadas pelo MIT quando da realização dos ensaios 2 e 3 são mais elevadas do que na condição onde o mesmo encontrava-se submetido às tensões equilibradas. Sendo assim, há uma redução da sua vida útil, conforme descrito e comentado nas análises antecedentes.

b) Resultados gerais dos ensaios onde têm-se fator K igual a 2%, 1,5%, 0% e 4%

As Tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 ilustram os principais resultados da aplicação sobre o motor de tensões desequilibradas que possuem fator K igual a 2%, 1,5%, 0% e 4%, respectivamente.

Tabela 5.7 – Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=2% sobre o MIT

Ensaio	Tensões idealizadas para o ensaio	Tensões aplicadas sobre o MIT	Fator K [%]	Correntes nas 3 Fases do Motor [A]			Temperatura [°C]		Redução da Vida Útil [%]
				A	B	C	Máxima	Ambiente	
2	VA = 231 L 0o VB = 231 L - 121,7o VC = 231 L 116,8o	VA = 230,47 L 0o VB = 231,84 L 239,2o VC = 231,06 L 113,2o	2,0003	5,4 7	6,6 2	6,4	89,7	27,0	74%
3	VA = 210 L 0o VB = 225 L - 120o VC = 215 L 120o	VA = 209,98 L 0o VB = 225,03 L 240,9o VC = 215,15 L 121,6o	2,035	5,2	6,5 7	3,9 3	76,0	28,2	42
4	VA = 201 L 0o VB = 201 L - 121,59o VC = 201 L 116,09o	VA = 201,03 L 0o VB = 201,66 L 239,3o VC = 201,45 L 113,2o	2,0004	3,9 9	4,6 9	4,3 7	55,3	26,9	-244,8
5	VA = 231 L 0o VB = 217 L - 120o VC = 230 L 120o	VA = 231,13 L 0o VB = 217,04 L 240,9o VC = 229,91 L 121,5o	1,9952	6,7 9	4,1 4	6,8	91,62	33,9	79,0
6	VA = 231 L 0o VB = 231 L - 120o VC = 216 L 120o	VA = 231,02 L 0o VB = 230,96 L 240,9o VC = 215,96 L 121,5o	2,212	7,7 9	6,2	3,8	95,02 5	28,0	77,5
7	VA = 201 L 0o VB = 202 L - 120o VC = 214 L 120o	VA = 200,83 L 0o VB = 202,50 L 240,9o VC = 214,26 L 120o	2,0308	3,6 9	4,6 4	5,3 6	61,5	28,0	-107,3
8	VA = 220 L 0o VB = 220 L - 121,44o VC = 220 L 116,11o	VA = 219,84 L 0o VB = 220,18 L 239,5o VC = 219,85 L 117,7o	1,9999	5,8 3	5,1 5	4,9 3	72,4	28,4	14,5
9	VA = 210 L 0o VB = 225 L - 120o VC = 215 L 120o	VA = 209,98 L 0o VB = 225,03 L 240,9o VC = 215,15 L 121,6o	2,035	5,2	6,5 7	3,9 3	76,0	28,2	32,2

Tabela 5.8 – Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=1,5% sobre o MIT

Ensaio	Tensões idealizadas para o ensaio	Tensões aplicadas sobre o MIT	Fator K [%]	Correntes nas 3 Fases do Motor [A]			Temperatura [°C]		Redução da Vida Útil [%]
				A	B	C	Máxima	Ambiente	
10	VA = 231∠ 0o VB = 231∠ -121,20o VC = 231∠ 117,06o	VA = 231,19∠ 0o VB = 231,10∠ 239,7o VC = 230,83∠ 113,2o	1,5003	5,35	6,54	6,57	88,6	28,0	74,1
11	VA = 201∠ 0o VB = 201∠ -121,32o VC = 201∠ 117,05o	VA = 201,07∠ 0o VB = 201,26∠ 239,6o VC = 201,11∠ 118,6o	1,5001	4,76	4,11	3,93	55,4	28,0	-244,8
12	VA = 220∠ 0o VB = 220∠ -121,20o VC = 220∠ 117,05o	VA = 220,07∠ 0o VB = 219,95∠ 239,7o VC = 220,2∠ 118,05o	1,506	5,76	5,12	4,95	72,2	28,0	14,5
13	VA = 226∠ 0o VB = 226∠ -120o VC = 216∠ 120o	VA = 226,12∠ 0o VB = 226,25∠ 240,9o VC = 216,13∠ 121,5o	1,497	7	5,68	4,07	82,5	27,2	59,9
14	VA = 216∠ 0o VB = 216∠ -120o VC = 226∠ 120o	VA = 216,14∠ 0o VB = 215,95∠ 240,9o VC = 225,91∠ 121,5o	1,52	4,92	5,1	5,96	69,8	27,3	-8,2
15	VA=216∠ 0° VB=226∠ -120° VC=226∠ +120°	VA = 215,14∠ 0o VB = 226,05∠ 240o VC = 226,14∠ 120,1o	1,49	5,12	6,7	5,37	76,1	27,2	37,2
16	VA=226∠ 0° VB=216∠ -120° VC=216∠ +120°	VA = 216∠ 0o VB = 216∠ -120o VC = 226∠ 120o	1,52	6,71	4,39	4,94	77	27,7	41,1

Tabela 5.9 – Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=0% sobre o MIT

Ensaio	Tensões idealizadas para o ensaio	Tensões aplicadas sobre o MIT	Fator K [%]	Correntes nas 3 Fases do Motor [A]			Temperatura [°C]		Redução da Vida Útil [%]
				A	B	C	Máxima	Ambiente	
17	VA = 220┘0o VB = 213,576┘ - 119o VC = 213,576┘119o	VA = 220,09┘0o VB = 213,62┘241,9o VC = 213,55┘120,6o	7,05*1 0E-5%	6,24	4,31	4,75	70,5	28,3	0%
18	VA = 220┘0o VB = 217,838┘ - 119o VC = 215,610┘120o	VA = 219,93┘0o VB = 217,52┘241,9o VC = 215,52┘113,2o	2,84*1 0E-5%	4,4	5,7	5,61	69,3	27,5	-8,2%
19	VA = 220┘0o VB = 222,271┘ - 121o VC = 224,477┘120o	VA = 220,05┘0o VB = 222,24┘239,9o VC = 224,37┘113,2o	3,58*1 0E-4%	3,81	6,69	6,92	74,7	28,0	26,8%
20	VA = 220┘0o VB = 226,893┘ - 121o VC = 226,893┘121o	VA = 219,97┘0o VB = 227┘239,9o VC = 226,80┘122,6o	2,697* 10E- 5%	5,48	6,12	5,36	78,6	27,8	46%
21	VA = 224,323┘0o VB = 217,773┘ - 119o VC = 217,773┘119o	VA = 224,38┘0o VB = 217,62┘241,9o VC = 217,55┘120,5o	3,43*1 0E-5%	6,57	4,56	4,99	73,8	27,4	20,91%
22	VA = 215,453┘0o VB = 222,204┘ - 120o VC = 222,204┘120o	VA = 215,53┘0o VB = 222,38┘239,9o VC = 222,31┘121,5o	4,15E- 5%	5,2	5,79	5,06	72,4	27,9	14,5%
23	VA = 197,8┘0o VB = 204┘ -121o VC = 204┘121o	VA = 197,68┘0o VB = 204,06┘238,9o VC = 203,99┘121,1o	2,1355 8E- 06%	4,25	4,8	3,84	55,3	26,9	-244,8%
24	VA = 225,22┘0o VB = 232,28┘ - 121o VC = 232,28┘121o	VA = 225,20┘0o VB = 232,25┘238,9o VC = 232,38┘121,1o	0,0002 1702	5,76	6,82	5,81	83,3	26,5	62,8%

Tabela 5.10 – Resultados oriundos da aplicação de tensões com K=4% sobre o MIT

Ensaio	Tensões idealizadas para o ensaio	Tensões aplicadas sobre o MIT	Fator K [%]	Correntes nas 3 Fases do Motor [A]			Temperatura [°C]		Redução da Vida Útil [%]
				A	B	C	Máxima	Ambiente	
25	VA = 201 L 0o VB = 231 L -120o VC = 216 L 120o	VA = 201,17 L 0o VB = 231,25 L 240,9o VC = 216,14 L 120o	4,009	3,46	9,04	6,26	95,6	30,1	93,4
26	VA = 201 L 0o VB = 201 L -115o VC = 201 L 128o	VA = 200,85 L 0o VB = 200,97 L 245o VC = 201,07 L 124,5o	4,0005	4,07	4,37	4,24	53,8	26,59	-310
27	VA = 220 L 0o VB = 220 L -115o VC = 220 L 128o	VA = 220,29 L 0o VB = 220,01 L 245o VC = 220,38 L 124,5o	4,0005	5,15	5,44	5,51	69,6	27,8	-8,23
28	VA = 231 L 0o VB = 231 L -115o VC = 231 L 128o	VA = 231,22 L 0o VB = 230,93 L 245o VC = 230,87 L 128,1o	4,0005	6,62	5,9	5,69	87,3	28,5	72,2
29	VA = 231 L 0o VB = 231 L -120o VC = 204 L 120o	VA = 231,17 L 0o VB = 231,16 L 240,1o VC = 204,02 L 120o	4,054	8,77	6,84	2,54	109,3	27,8	93,7
30	VA = 231 L 0o VB = 204 L -120o VC = 231 L 120o	VA = 230,96 L 0o VB = 203,98 L -120o VC = 231,09 L 120o	4,054	7,26	2,64	8,11	92	27,3	80,4
31	VA = 201 L 0o VB = 201 L -120o VC = 226 L 120o	VA = 201,02 L 0o VB = 201,08 L 239,9o VC = 226,19 L 119,9o	3,98	3,56	5,2	7,32	72,8	27,4	14,5
32	VA = 201 L 0o VA = 226 L -120o VA = 201 L 120o	VA = 200,94 L 0o VA = 226,02 L 240,1o VA = 200,97 L 120,1o	3,98	5,93	7,59	2,43	85,4	27,6	37,2

O sinal negativo no valor da vida útil do motor representa um acréscimo da mesma, justificado pela redução da temperatura alcançada, quando da utilização de tensões inferiores ao valor nominal. Vale a ressalva que a alimentação do MIT com tensões inferiores a tensão nominal pode implicar em danos que nem sempre são considerados com a análise exclusivamente da vida útil de uma máquina. Da observação das Tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, pode-se concluir que:

- Os efeitos das aplicações de condições de tensões sobre o MIT, para o mesmo valor de fator K, podem ser bastante diferentes. A comprovação deste fato se dá através

da comparação dois a dois dos ensaios 5 e 8 (K=2%), 10 e 12 (K=1,5%), 20 e 22 (K=0%), e 25 e 31 (K=4%).

- A mudança na seqüência de fases do sistema de suprimento pode conduzir a efeitos diferentes do desequilíbrio de tensão sobre o motor. Por exemplo, quando da alimentação do MIT empregando-se, respectivamente, as amplitudes 231, 231 e 204 volts nas fases A, B e C (ensaio 29), com fator K igual a 4%, tem-se uma redução na vida útil do mesmo diferente a encontrada considerando a seqüência de fases A, C e B.
- Verificou-se nas Tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 em avaliação que, em geral, patamares de tensão mais elevados do que o valor nominal geram uma redução na vida útil do MIT mais acentuada do que a encontrada quando do emprego de tensões inferiores ao valor nominal. A comparação, dois a dois dos ensaios 2 e 7, 10 e 14, 18 e 19 e 25 e 27, permitem a comprovação da mencionada hipótese, considerando-se os valores de fator K iguais a 2%, 1,5%, 0% e 4%, respectivamente.
- Há valores de tensão que, apesar de gerarem fatores K iguais a 2% e 4% (ensaios 8 e 31, respectivamente), apresentam efeitos menos nocivos ao MIT do que os encontrados para fator K igual a 1,5% (ensaios 10 e 13); e
- Existem valores de tensões para fator K igual a 0% (ensaios 19 e 20), que aplicados sobre o MIT culminam em efeitos mais nocivos do que os encontrados quando da aplicação de combinações com o fator K igual a 2%, 1,5% e 4% (ensaios 8, 12 e 31, respectivamente).

Por fim, é necessário enfatizar que, os tópicos relatados acima ratificam a tese de que o fator K não é um índice suficientemente adequado para a representação dos efeitos do desequilíbrio de tensão sobre os equipamentos do sistema elétrico. Logo, o emprego de tal índice na quantificação e na regulamentação do desequilíbrio de tensão pode conduzir a situações onde o mesmo caracteriza-se como excessivamente rígido, ou ainda, excessivamente brando.

5.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os principais resultados dos ensaios efetuados em um laboratório, com vistas à avaliação da eficácia do fator K na representação dos efeitos do desequilíbrio sobre um motor de indução.

Inicialmente, efetuou-se a aplicação de um conjunto de tensões equilibradas no motor para se obter a temperatura final que o mesmo alcança nesta condição. Observaram-se desses ensaios que mesmo com uma tensão equilibrada, as correntes apresentaram discrepâncias entre si.

Em seguida, aplicou-se sobre o motor uma série de condições de tensões desequilibradas, estrategicamente escolhidas, com o intuito de se identificar os efeitos que cada uma delas provoca. A temperatura máxima atingida nos ensaios não ultrapassou a estabelecida pela classe de isolamento do motor. Em alguns casos, detectaram-se reduções acentuadas na vida útil dos motores, capazes de gerar prejuízos financeiros significativos caso seja necessário substituí-los. Há situações onde a aplicação de tensões abaixo do valor nominal culmina na possibilidade de acréscimo da vida útil do motor.

Os efeitos das aplicações de tensões sobre o motor, para condições onde tem-se o mesmo valor de fator K , podem ser acentuadamente diferentes entre si. Observou-se também que a mudança na ordem das fases do sistema de alimentação do motor pode conduzir a resultados diferentes da vida útil, para o mesmo conjunto de amplitudes de tensões.

Há valores de tensões que, embora produzam fator K mais elevado do que em outros casos, culminam em reduções menores da vida útil do motor.

Considerando-se todos os mencionados aspectos, conclui-se que o fator K não é um índice suficientemente adequado para, isoladamente, representar os efeitos do desequilíbrio de tensão sobre os equipamentos do sistema elétrico.

6 – CONCLUSÕES GERAIS

Não obstante a existência de comentários conclusivos ao final de cada capítulo, considera-se digna de menção uma abordagem global das atividades desenvolvidas e dos resultados obtidos, para se proporcionar ao leitor uma visão ampla e sucinta das investigações propostas e executadas no decorrer desta tese. Nesse sentido, este capítulo tem por objetivo a apresentação de uma síntese das principais constatações observadas no decorrer de todo o trabalho.

O capítulo 1 buscou exprimir, de uma forma geral, a atual condição do tema com relação à área de qualidade da energia elétrica, e ainda, a necessidade de estudos direcionados ao desequilíbrio de tensão. Adicionalmente, ressaltou-se as lacunas a serem preenchidas, e estabeleceu-se os objetivos gerais desta tese.

O capítulo 2 prestou-se à abordagem dos principais conceitos e definições relacionados com o tema qualidade da energia elétrica. Um enfoque especial foi dado ao desequilíbrio de tensão. Assim sendo, enfatizou-se os métodos de cálculo do desequilíbrio, suas causas, seus efeitos e a sua normalização. Foram apresentadas algumas normas e recomendações utilizadas em países de todo o mundo, no que diz respeito ao mencionado fenômeno. Para a quantificação do desequilíbrio, 4 métodos foram ilustrados. Destes, 3 não fazem uso dos ângulos das tensões para o cálculo do fator de desequilíbrio. Diversos aspectos que podem causar desequilíbrio foram citados.

Adicionalmente, alguns de seus efeitos sobre cargas como transformadores, motores de indução, cabos e conversores foram ressaltados. De todo o exposto, observou-se que o fator K calculado partindo-se do método das componentes simétricas é empregado por diversas normas sobre desequilíbrio de tensão. O limite máximo de 2% é, predominantemente, utilizado como índice de conformidade pela maioria das normas.

Procedeu-se também nesse capítulo, a uma extensa revisão bibliográfica que detectou duas frentes de trabalho mais intensamente populadas, a saber: a tentativa de determinação de metodologias de quantificação mais precisas e a identificação dos efeitos causados pelo desequilíbrio de tensão. Observou-se dos trabalhos examinados que diversas condições de desequilíbrio conduzem a um mesmo valor de fator K. Tal fato não é considerado nas normas. Com isso, tem-se a possibilidade de existência de 2 ou mais conjuntos de fasores de tensão com fatores K iguais, culminando em efeitos diferentes sobre os equipamentos da rede. Com o intuito de superar esse percalço, alguns pesquisadores sugeriram a utilização do ângulo do fator K e da componente de seqüência positiva associada ao fator K para a quantificação do desequilíbrio. Entretanto, ambas haviam sido desenvolvidas considerando-se que o desequilíbrio ocorre sobre condições onde somente as amplitudes das tensões variam. Assim sendo, identificou-se a necessidade de uma avaliação do comportamento do fator K frente a variação das amplitudes e também dos ângulos das tensões. No final do citado capítulo, tem-se a ilustração dos métodos e procedimentos utilizados para se alcançar os objetivos desta tese.

Na seqüência de propostas de investigações para esta tese, o capítulo 3 prestou-se para mostrar os resultados de um estudo do comportamento do fator K e das componentes de seqüência frente a variação das amplitudes e dos ângulos das tensões. Dada a sua importância, enfatizou-se os aspectos fundamentais empregados por algumas referências

encontradas na literatura atinente, como a aplicabilidade ou não do ângulo do fator K nas análises do desequilíbrio, observação da existência de valores semelhantes de fator K para valores de tensão diferentes, dentre outros.

Conforme observado, o fator K e a componente negativa são mais sensíveis às alterações nos ângulos das tensões do que nas amplitudes. Os ângulos do fator K não trazem informações úteis quando se sabe que o sistema tem uma variação acentuada dos ângulos e das amplitudes das tensões, simultaneamente. Para se conhecer melhor o comportamento do desequilíbrio é recomendável, inicialmente, uma avaliação da variação dos ângulos das tensões. Assim sendo, recomenda-se a execução de uma pesquisa que avalie as faixas de variação dos ângulos e das amplitudes das tensões oriundas de medições reais no sistema elétrico de potência.

Para determinadas condições de desequilíbrio o valor médio das amplitudes das tensões de fase em relação à tensão nominal não exhibe valores próximos ao módulo da componente de seqüência positiva. Tais discrepâncias, em alguns casos, justificam as diferenças entre o fator K e o módulo da componente negativa. Contudo, quando em algumas condições de desequilíbrio a componente de seqüência positiva é praticamente igual à tensão nominal (variação dos ângulos com as amplitudes das tensões constantes em seus valores nominais), a componente de seqüência negativa torna-se muito próxima ao fator K. Detectou-se nesse estudo a existência de conjuntos de diferentes combinações de tensões que culminam em fatores K idênticos em módulos. Contudo, não era ainda possível naquele instante, nenhum pronunciamento com propriedade sobre as características desses valores de tensão.

Com base nas observações efetuadas no capítulo 3, desenvolveu-se no capítulo 4 um exame analítico e gráfico relacionada aos valores de amplitudes e ângulos das tensões que acarretam módulos do fator K iguais. O comportamento das componentes de seqüência foi investigado com o intuito de se avaliar as possibilidades de suas utilizações quando da necessidade de quantificação do desequilíbrio de tensão.

Inicialmente, observou-se que o lugar geométrico das amplitudes das tensões para K idênticos é um cilindro com forma elíptica. No interior desse cilindro encontram-se os valores de amplitudes que geram fatores K menores que o pré-estabelecido para a análise. Tanto pelo desenvolvimento analítico como pela avaliação gráfica, conclui-se que para um mesmo valor de fator K, há inúmeros fatores de tensões que podem gerar efeitos diferentes se aplicados sobre equipamentos do sistema elétrico. Tal conclusão pode também ser estendida às análises onde se identifica o lugar geométrico dos ângulos das tensões que produzem um mesmo patamar de fator K. Nesse caso, observou-se que os lugares geométricos dos ângulos para fator K igual a 2%, considerando-se separadamente as condições onde as amplitudes são 201, 220 e 231 volts, são idênticos.

Identificaram-se com o estudo do lugar geométrico dos módulos das tensões para $K=0\%$, inúmeros valores de amplitudes desequilibradas que se aplicadas a, por exemplo, um MIT, podem reduzir, consideravelmente, a sua vida útil. Observou-se também que quanto maior o fator K maior o comprimento das elipses que constituem o lugar geométrico normalizado para fatores K iguais. Com isso, o número de pontos que constituem cada elipse aumenta à medida que cresce o valor do fator K, e em conseqüência, amplia-se a possibilidade de se ter efeitos diferentes para o mesmo fator K.

Com a identificação dos já mencionados lugares geométricos, determinou-se alguns fasores de tensão onde tem-se fator $K=1,5\%$. O mesmo foi efetuado para valores de fator $K=2\%$. Devido as suas especificidades, pode-se concluir teoricamente que, alguns fasores, apesar de provocarem um desequilíbrio cujo fator K é igual a $1,5\%$, aparentam provocar efeitos mais nocivos a equipamentos do sistema de potência, do que outros fasores onde alcança-se fator K igual a 2% .

Quanto às investigações dos comportamentos das componentes de seqüência para fasores de tensão que produzem $K=2\%$, detectou-se que a componente negativa apresenta valores próximos aos ilustrados pelo fator K . Verificou-se também a existência de um lugar geométrico para as amplitudes das tensões onde os módulos da componente negativa são iguais a 2% . Logo, a sua utilização em substituição ao fator K quando da necessidade de quantificação do desequilíbrio de tensão é inviável. De fato, teoricamente, a componente negativa não representa uma solução útil para análise do desequilíbrio, no que diz respeito à indicação da exata situação do sistema, do ponto de vista físico, quando da verificação de fatores K iguais.

A avaliação do comportamento da componente positiva permitiu a constatação de que a mesma, tratada isoladamente, não é recomendável para a quantificação do desequilíbrio. Verificou-se também que, a associação do fator K com a componente positiva para a quantificação do desequilíbrio em condições onde o fator K permanece constante, reduz o número de fasores capazes de gerar efeitos distintos, mas não elimina por completo o problema.

No capítulo 5 apresentou-se os principais resultados dos ensaios efetuados em um laboratório, com vistas à avaliação da eficácia do fator K na representação dos efeitos do desequilíbrio sobre um motor de indução.

Inicialmente, para um conjunto de tensões equilibradas, observou-se que as correntes apresentaram discrepâncias entre si. Deste ensaio, identificou-se o valor que se prestou como referência de temperatura do motor para todos os demais testes.

Na continuidade, aplicou-se sobre o motor uma série de condições de tensões desequilibradas. Em alguns casos, detectaram-se reduções acentuadas na vida útil dos motores, capazes de gerar prejuízos financeiros significativos caso seja necessário substituí-los.

Há situações onde a aplicação de tensões abaixo do valor nominal culmina na possibilidade de acréscimo da vida útil do motor. Os efeitos das aplicações de tensões sobre o motor, para condições onde tem-se o mesmo valor de fator K , podem ser acentuadamente diferentes entre si.

Observou-se também que a mudança na seqüência de fases do sistema de alimentação do motor pode conduzir a reduções diferentes da vida útil, para o mesmo conjunto de amplitudes de tensões. E finalmente, depois da execução de todos os testes previstos, tornou-se possível inferir que, embora alguns valores de tensões produzam fator K mais elevado do que em outros casos, suas aplicações sobre o motor podem culminar em reduções menores da vida útil.

Considerando-se todos os aspectos mencionados nesta tese, conclui-se que o fator K não é um índice suficientemente adequado para, isoladamente, representar os efeitos do desequilíbrio de tensão sobre os equipamentos do sistema elétrico.

Ora ilustrados, concisamente, os resultados alcançados em cada capítulo desta tese, pode-se concluir que as principais contribuições foram:

Apresentação e análise crítica dos principais inconvenientes relacionados ao emprego do fator K e das componentes negativa e positiva frente a variação das amplitudes e ângulos das tensões;

Identificação dos lugares geométricos das amplitudes e dos ângulos das tensões que culminam em fatores K iguais;

Comprovação com base nos ensaios em laboratório, da existência de condições de desequilíbrio com fator K igual a 0%, que culminam em reduções da vida útil de um motor mais acentuadas do que as encontradas quando da aplicação de tensões onde o tem-se fator K igual a 1,5%, 2% e 4%;

Ratificação, teoricamente e também com base nos ensaios em laboratório, de que o fator K é um índice inadequado para a quantificação do desequilíbrio de tensão; e

Provimento de material didático com ampla e atual bibliografia a respeito dos assuntos pesquisados; e para os próximos meses.

Ademais, constata-se a necessidade de estudos voltados à quantificação dos níveis de desequilíbrio de tensão presentes no sistema elétrico de potência brasileiro. Para tanto, recomenda-se o desenvolvimento de índices de quantificação do desequilíbrio que apresentem uma inter-relação com os efeitos do supradito fenômeno. Caracterizam-se também como necessárias, investigações destinadas ao levantamento dos efeitos do desequilíbrio sobre equipamentos como os motores de indução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, W. G., Freitas, F. D. (1995). “Circuitos Polifásicos”, Apoio da Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos – FINATEC, Brasília.
- Afonso J.L e Martins, J.S.. (2004). “Qualidade da Energia Elétrica”. Departamento de Eletrônica Industrial – Universidade do Minho In: Revista o Electricista, No. 9, pp 66-71.
- ANEEL. (2000a). Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica – Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas. Relatório Parcial 6 – Resultados das Medições e Tratamentos. Universidade Federal de Uberlândia.
- ANEEL. (2000b). Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica – Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas. Relatório Parcial 4 – Estado da Arte. Universidade Federal de Uberlândia.
- ANEEL. (2001). Resolução 505 In: Site da Agencia Nacional de Energia, novembro.
- Brancato, E. L., (1992). “Estimation of Lifetime Expectancies of Motors.” In: IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 8, no. 3, pp. 5 – 13.
- Bronzeado, H. S. (2002) “Qualidade da Energia Elétrica - Conceitos, Problemas e Soluções”, Maio.
- Dugan, R. C., Rzy, D. T. (1988). “Harmonic Considerations for Technical Distribution Feeders”. In: ORNL/Sub/81-95011/4, Oak Ridge, TN 37831.
- Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Beaty, H. W. (1995) “Electrical Power Systems - Power Quality”, Editora McGraw-Hill, E.U.A..
- Emanuel, A. E., Policarpo, J. G. A, (2002). “Induction Motor Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and Its Estimated Cost” In: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no 1, January/February.
- Faiz, J., Ebrahimpour, H., Pillay P. (2004) “Influence of Unbalanced Voltage on the Steady-State Performance of a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor.” In: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 4.
- Gafford, B. N., Duesterhdeft, W. C., Mosher, C. C., (1954). “Heating of Induction Motors on Unbalanced Voltage”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-73, April.
- Kersting, W. H. (2001) “Causes and Effects of Unbalanced Voltages Serving an Induction Motor.” In: IEEE Transactions on Industry Applications, vol 37, no. 1, pp. 165 – 170.

- Lee, C. Y., Chen, B. K., Lee, W. J., Hsu, Y. F. (1997). "Effects of Various Voltages on the Operation Performance of an Induction Motor under the Same Unbalance Factor Condition". In: Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, pp. 51 – 59.
- ONS. (2002). Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica.
- Pillay P.; Manyage M., (2006). "Loss of Life in Induction Machines Operating With Unbalanced Supplies." In: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 21, no. 4, pp. 813 – 822.
- Siddique, A., Yadava G. S., Sing B. (2004). "Effects of Voltage Unbalance on Induction Motors." In: Conference Record of The 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 26 – 29, Indianapolis, E.U.A.
- Souto, O. C. N., (2001). "Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições Não Ideais de Alimentação." Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, pp. 399.
- Wang, Y. J., (2000). "An Analytical Study on Steady-state Performance of an Induction Motor Connected to Unbalanced Three-phase Voltage." In: Power Engineering Society Winter Meeting, vol 1, p. 159 – 164.
- Wang Y. J. (2001). "Analysis of Effects of Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor". In: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 16, n° 3, pp. 270 -275.
- Williams, J. E., (1954) "Operation of 3-Phase Induction Motors on Unbalanced Voltages", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-73, April, pp. 125-133.

APÊNDICE

A - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA NEGATIVA E POSITIVA

A.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esse apêndice apresenta os resultados das avaliações do módulo e do ângulo das componentes de sequência negativa e positiva frente a: variação das amplitudes das tensões de duas fases com os ângulos constantes; dos ângulos das tensões de duas fases com as amplitudes constantes; da amplitude e do ângulo da tensão de uma mesma fase; e da amplitude da tensão de uma fase e do ângulo de outra fase. Em seguida, são apresentados os principais aspectos observados durante as análises efetuadas em cada uma das citadas condições.

Em todos os casos simulados assume-se a amplitude da tensão da fase A como tensão de base. O ângulo da tensão da fase A é sempre tomado como igual a 0° , e os valores nominais das fases B e C são, respectivamente, -120° e $+120^\circ$.

A.2 – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DE SEQUÊNCIA NEGATIVA

Inicia-se a apresentação dos resultados das simulações, conforme descrito no item 4.1, considerando-se a variação das amplitudes das tensões de duas fases. Em cada um dos tópicos aqui abordados são avaliados o módulo e o ângulo do parâmetro em estudo. As variações das amplitudes das tensões de cada fase serão apresentadas em porcentagem da tensão da fase A. Já as variações dos ângulos das tensões de cada fase são tomadas em porcentagem do valor igual a 120° .

A.2.1 - Variação das amplitudes das tensões de duas fases

Vale ressaltar que em toda esta análise os ângulos das tensões de cada fase permanecem constantes nos seus valores nominais.

A.2.1.1 - Comportamento do módulo da componente negativa

As figuras A.1 e A.2 ilustram o comportamento dos módulos da seqüência negativa frente a variação das amplitudes de duas fases.

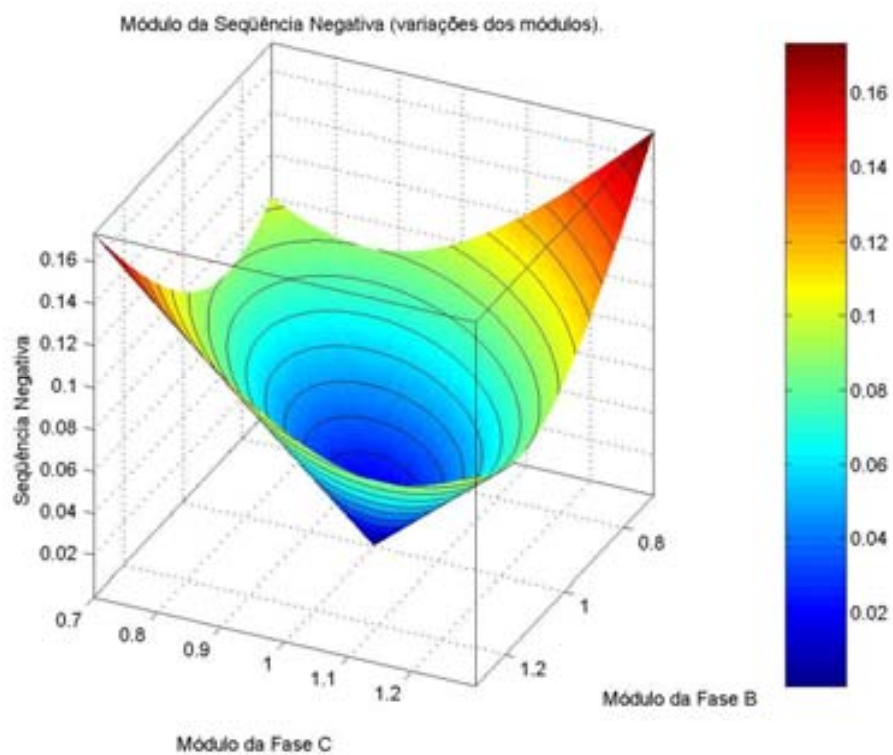


Figura A.1- Comportamento do módulo da componente negativa frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases

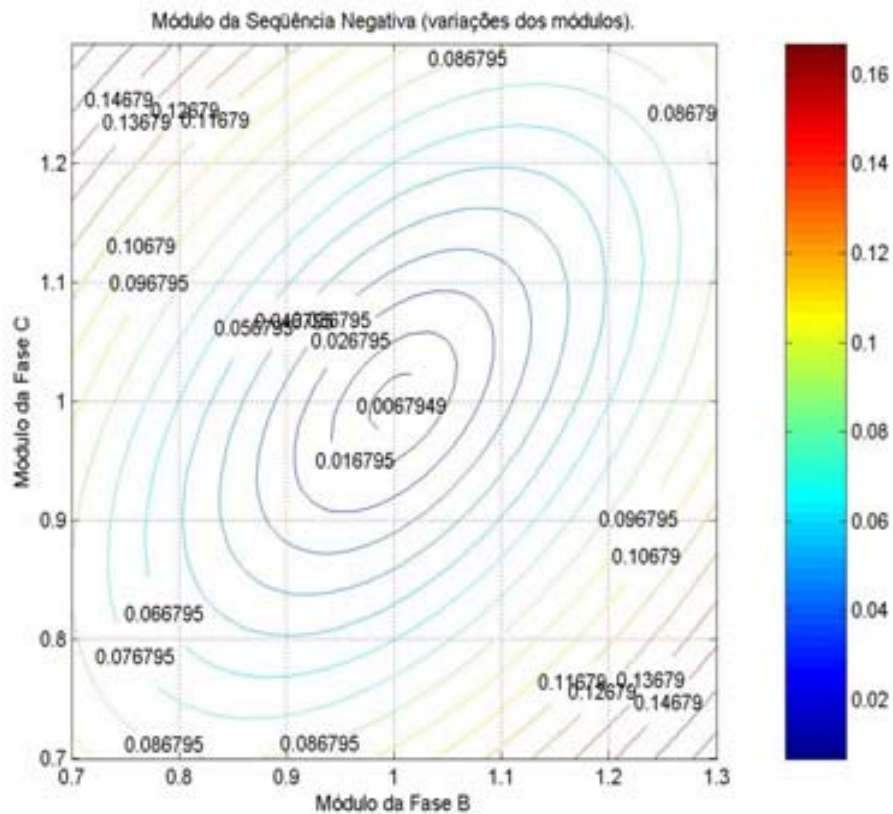


Figura A.2- Comportamento do módulo da componente negativa frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Curvas de nível

Observa-se das figuras A.1 e A.2 que variações nas amplitudes das tensões da ordem de 10% acarretam, em geral, valores da componente de seqüência negativa da ordem de 3 a 6%. Na verdade, vislumbra-se valores da componente negativa da ordem de 3 a 4% quando tem-se somente a amplitude de uma fase variando, e por volta de 3 a 6% quando observa-se duas fases com modificações de até 10% nos seus módulos.

Quando as duas amplitudes das tensões estão variando igualmente e simultaneamente no mesmo sentido com os ângulos constantes, sabe-se que um acréscimo nas amplitudes das tensões em relação à condição nominal gera um módulo da componente de seqüência negativa igual ao detectado quando da redução das amplitudes das tensões na mesma proporção.

Quando as duas amplitudes das tensões estão variando proporcionalmente e simultaneamente em sentidos opostos com os ângulos constantes, sabe-se que os

valores do módulo da componente de seqüência negativa independem da escolha da fase que esta experimentando o acréscimo.

O aumento na amplitude da tensão de uma única fase mantendo-se as demais constantes em seus valores nominais e considerando-se inalterados os ângulos de fase das tensões, gera um módulo da componente negativa **igual** ao detectado com a redução desta mesma tensão sob as mesmas condições.

Nem sempre a variação das amplitudes de duas fases simultaneamente gera um maior módulo da componente de seqüência negativa comparado às alterações da amplitude de uma única fase, mantendo-se as proporções.

A.2.1.2 - Comportamento do ângulo da componente negativa

As figuras A.3 e A.4 ilustram o comportamento dos ângulos da seqüência negativa frente a variação das amplitudes de duas fases.

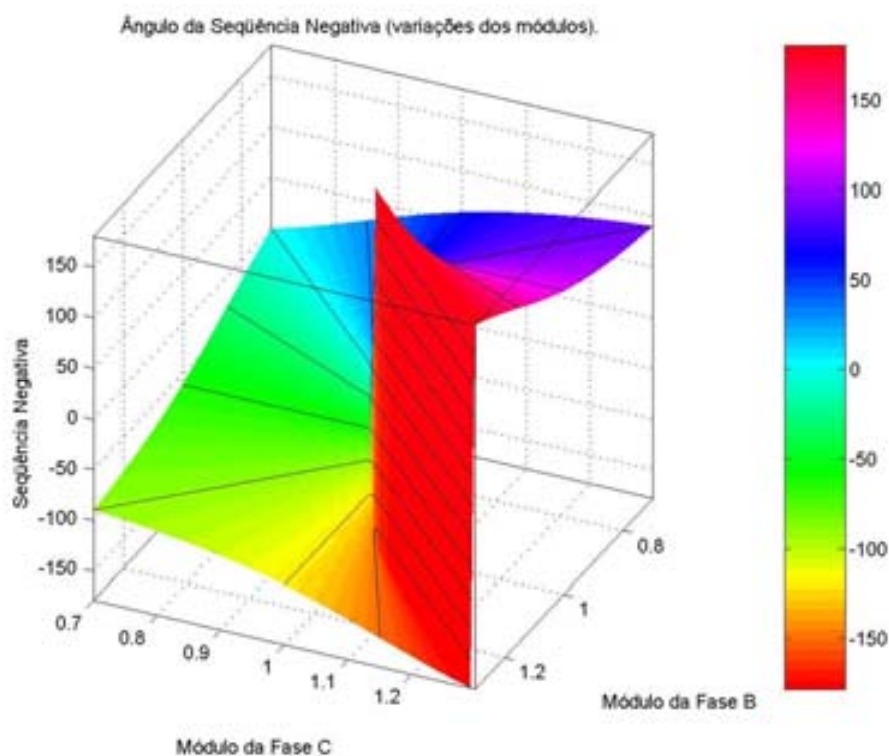


Figura A.3- Comportamento do ângulo da componente negativa frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases

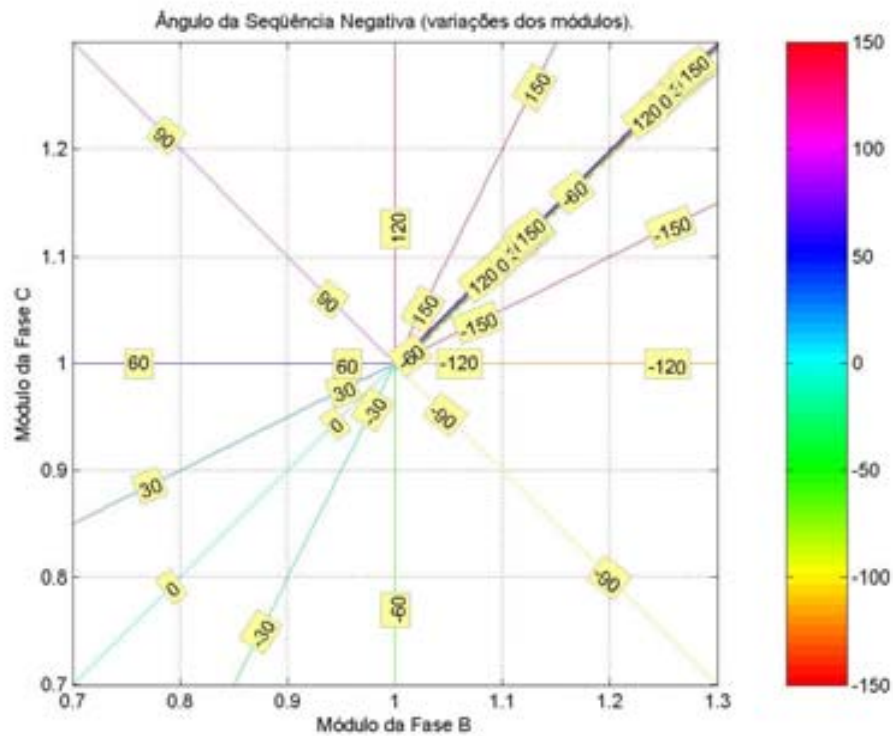


Figura A.4- Comportamento do ângulo da componente negativa frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Curvas de nível

Das Figuras A.3 e A.4 pode-se concluir que há um conjunto de fasores de tensão onde têm-se as amplitudes das tensões de duas fases acima do valor de base, para o qual não se consegue definir o valor do ângulo da componente negativa. A Tabela A.1 apresenta os ângulos da componente negativa para algumas condições de desequilíbrio.

Tabela A.1 – Ângulos da componente negativa

Quadrante	Condição do desequilíbrio	Varição do ângulo da componente negativa
Primeiro	Amplitudes das tensões de duas fases acima do valor de base	-120° a 180° e de 180° a 120°
Segundo	Amplitude da tensão de uma fase acima e de outra abaixo do valor de base	+120° a +60°
Terceiro	Amplitudes das tensões de duas fases abaixo do valor de base	60° a -60°
Quarto	Amplitude da tensão de uma fase acima e de outra abaixo do valor de base	-60° a -120°

Da Tabela A.1 constata-se que:

Condições de desequilíbrio em que as amplitudes das **tensões** de duas fases estão acima do valor de base geram ângulos da componente negativa no primeiro quadrante (entre 120° e -120°, passando por 180°);

- Para condições onde a amplitude de uma fase está acima do valor de base e a outra encontra-se abaixo, têm-se o ângulo da componente negativa nos segundo e quarto quadrantes (entre -120° e -60° e entre 60° e 120°, respectivamente); e
- As condições do desequilíbrio em que as amplitudes das tensões de duas fases encontram-se abaixo da tensão de base culminam em ângulos da componente negativa K no terceiro quadrante (entre -60° e 60°, passando por 0°).

Quando constata-se a inexistência de variações nos ângulos das tensões, pode-se utilizar o módulo da componente de seqüência negativa para se compreender quão desequilibrado o sistema está, e os ângulos da componente negativa para se compreender quais foram as condições que geraram o desequilíbrio.

A.2.2 - Variação dos ângulos das tensões de duas fases

Em todos os casos mencionados neste item, as amplitudes das tensões de cada fase permanecem com seus valores constantes e nominais.

A.2.2.1 - Comportamento do módulo da componente negativa

As Figuras A.5 e A.6 ilustram o comportamento dos módulos da componente negativa frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases.

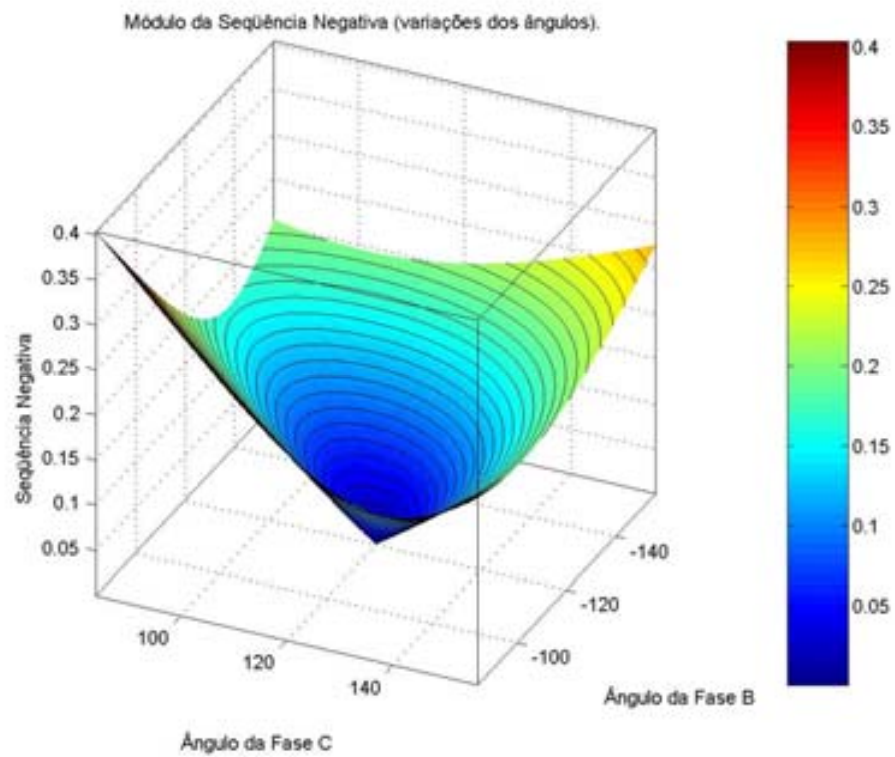


Figura A.5- Comportamento do módulo da componente negativa frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases

módulo da componente negativa do que onde se tem um decréscimo no ângulo da B e um aumento do ângulo da fase C, mantendo-se as proporções.

Quando a variação dos ângulos das tensões se dá em sentidos opostos, o módulo da componente negativa aumenta mais aceleradamente às variações na mesma proporção de igual sentido.

Quando os ângulos das tensões de duas fases variam em iguais proporções tendendo a reduzir as suas distâncias angulares em relação à referência 0° , têm-se módulos das componentes negativas **menores** às suas variações nas mesmas proporções tendendo para 180° .

O aumento no ângulo da tensão de uma única fase mantendo-se as demais constantes em seus valores nominais, e considerando-se inalterado as amplitudes das tensões, gera o **mesmo** módulo da componente negativa à redução do ângulo desta tensão sob as mesmas condições.

Variações dos ângulos das tensões implicam em módulos das componentes negativas sempre mais elevados aos adquiridos quando de variações nas mesmas condições das amplitudes das tensões. Na verdade, a variação dos ângulos das tensões em 10% gera um **maior** módulo da componente negativa do que a variação das amplitudes das tensões em 10%. Logo, observa-se que o módulo da componente negativa é mais sensível às alterações nos ângulos das tensões do que nas amplitudes.

A.2.2.2 - Comportamento do ângulo da componente negativa

As Figuras A.7 e A.8 ilustram o comportamento dos ângulos da componente negativa frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases.

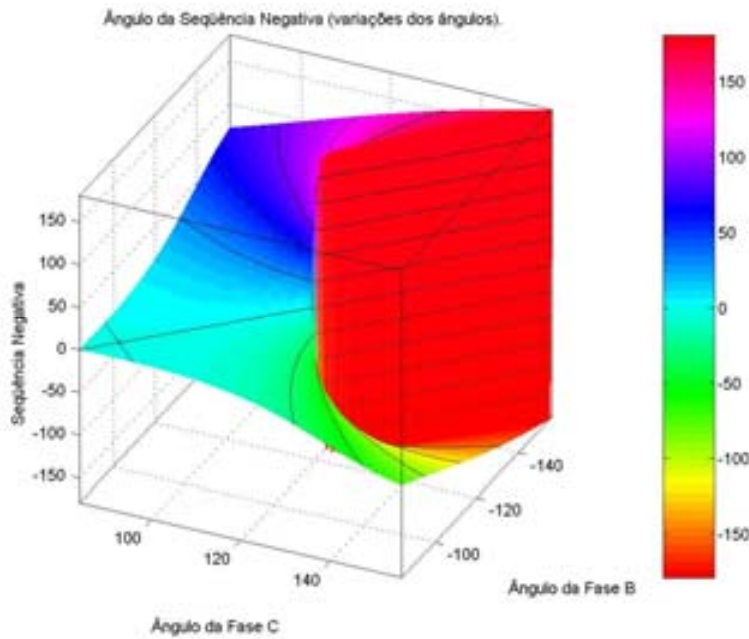


Figura A.7 - Comportamento dos ângulos da componente negativa frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases

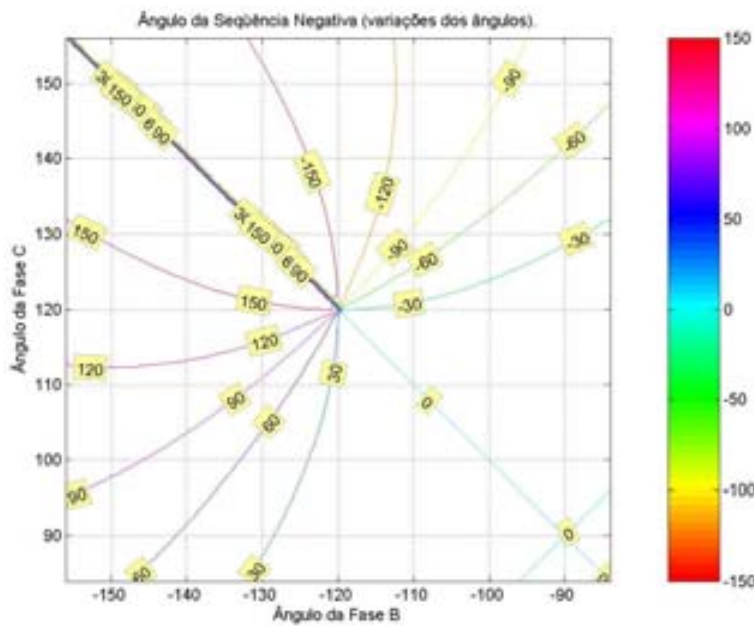


Figura A.8 - Comportamento dos ângulos da componente negativa frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases – Curvas de nível

Das Figuras A.7 e A.8 destaca-se que não é possível indicar faixa de variação dos ângulos da componente negativa considerando-se todas as possibilidades de variação dos ângulos das tensões.

Contudo, considerando-se o limite máximo de variação dos ângulos das tensões de 10% dos valores nominais ($\pm 12^\circ$), com as amplitudes das tensões constantes, pode-se utilizar os resultados dos ângulos da componente negativa para se identificar as condições que produziram o desequilíbrio, conforme apresentado na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Ângulos da componente negativa para algumas condições de desequilíbrio

Quadrante	Condição do desequilíbrio	Variação do ângulo da componente negativa
Primeiro	Ângulos das fases B e C da tensão acima dos valores nominais	De -150° a -30°
Segundo	Ângulo da fase B da tensão menor do que o nominal e ângulo da fase C acima do valor nominal	De
Terceiro	Ângulos das fases B e C da tensão abaixo dos valores nominais	De 30° a 150°
Quarto	Ângulo da fase C da tensão menor do que o nominal e ângulo da fase B acima do valor nominal	De 30° a -30°

Da Tabela A.2 constata-se a existência das seguintes relações entre ângulos da componente negativa e as condições dos desequilíbrios:

- Condições de desequilíbrio em que os ângulos das tensões das fases B e C são superiores aos seus respectivos valores nominais geram ângulos da componente negativa no primeiro quadrante (entre 150° e -30° , passando por 180°);
- Para condições onde os ângulos da fase B são superiores ao seu valor nominal, com os ângulos da fase C inferiores ao seu valor nominal, têm-se o ângulo da componente negativa no segundo quadrante (entre -150° a 150°);
- Para condições onde os ângulos da fase B são inferiores ao seu valor nominal, com os ângulos da fase C superiores ao seu valor nominal, têm-se o ângulo da componente negativa no terceiro quadrante (entre 30° e 150°); e

- Condições de desequilíbrio em que os ângulos das tensões das fases B e C são inferiores aos seus respectivos valores nominais geram ângulos da componente negativa no quarto quadrante (entre -30° e 30°).

Para qualquer condição onde a variação dos ângulos das tensões se dá acima de 10% dos seus valores nominais ($\pm 12^\circ$), as curvas que dividem os quadrantes não são retas. Isto inviabiliza qualquer conclusão utilizando os ângulos da componente negativa.

A.2.3 – Variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma única fase

A.2.3.1 - Comportamento do módulo da componente negativa

As Figuras A.9 e A.10 ilustram o comportamento dos módulos da componente negativa frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase.

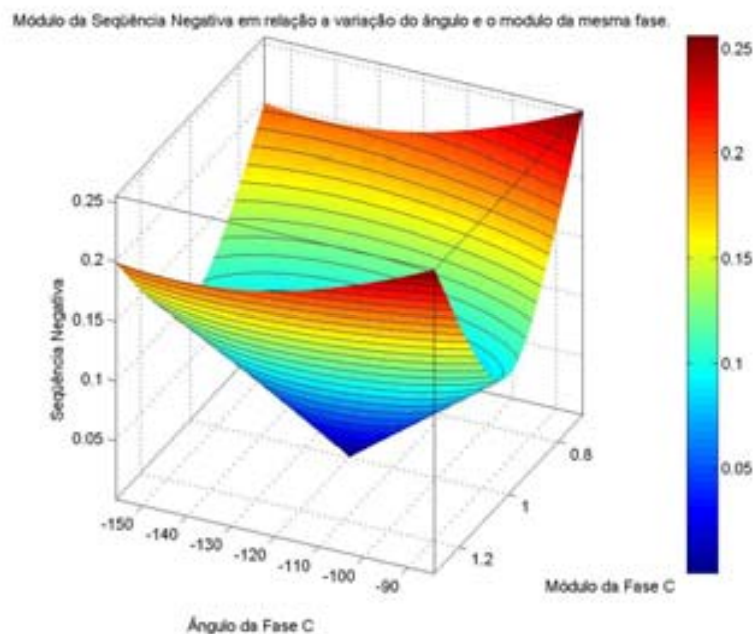


Figura A.9 - Comportamento dos módulos da componente negativa frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase

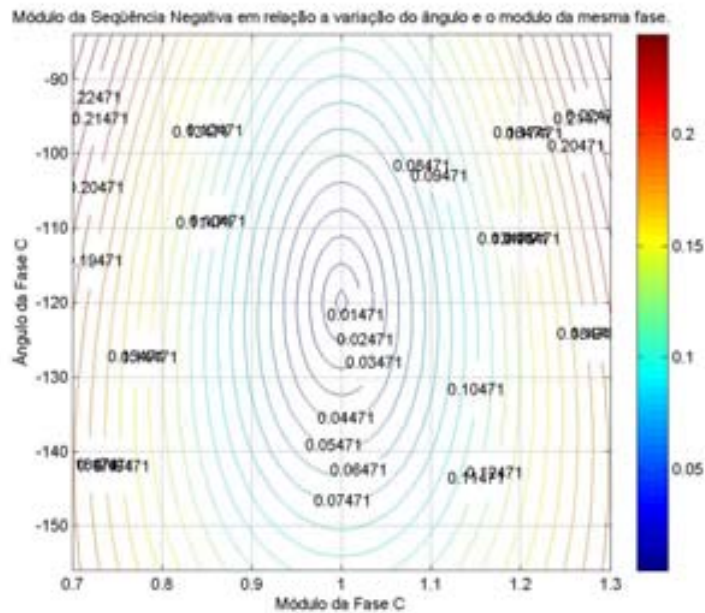


Figura A.10 - Comportamento dos módulos da componente negativa frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase– Curvas de nível

Observa-se das Figuras A.9 e A.10 que variações simultâneas na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão da ordem de 10% culminam, em geral, em valores de módulos da componente negativa da ordem de 7 a 9%.

As variações simultâneas na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão da ordem de 10% acarretam, em geral, maiores módulos da componente negativa às variações de duas amplitudes das tensões, sob as mesmas condições.

As variações simultâneas na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão da ordem de 10% acarretam, em geral, menores módulos da componente negativa às variações de dois ângulos das tensões, sob as mesmas condições.

Variações simultâneas na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão da ordem de 10% acarretam maiores módulos da componente negativa às variações de uma amplitude ou de um ângulo da tensão, sob as mesmas condições.

Quando duas fases da tensão apresentam-se com valores nominais, e uma terceira tem o seu módulo e ângulo variando simultaneamente em sentidos opostos, sabe-se que um acréscimo na amplitude e um decréscimo no ângulo da tensão em relação à condição

nominal geram um aumento no módulo da componente negativa **maior** do que o detectado quando da redução na amplitude e o acréscimo no ângulo, nas mesmas proporções.

Quando duas fases da tensão apresentam-se com valores nominais, e uma terceira tem o seu módulo e ângulo variando simultaneamente no mesmo sentido, sabe-se que um acréscimo na amplitude e no ângulo da tensão em relação à condição nominal gera um aumento no módulo da componente negativa **maior** do que o detectado quando da redução destes parâmetros na mesma proporção.

Observa-se que mantendo-se duas fases da tensão com valores nominais, e uma terceira com o seu módulo e ângulo variando igualmente e simultaneamente no mesmo sentido, tem-se semelhantes módulos da componente negativa detectados considerando-se as mesmas variações com os módulos e ângulos no sentido oposto.

A.2.3.2 - Comportamento do ângulo da componente negativa

As Figuras A.11 e A.12 ilustram o comportamento dos ângulos da componente negativa frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase.

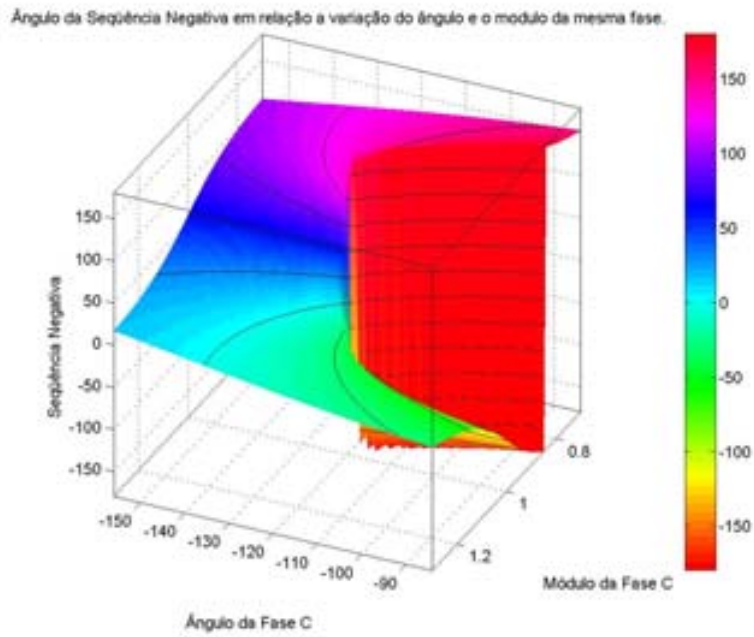


Figura A.11 - Comportamento dos ângulos componente negativa frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase

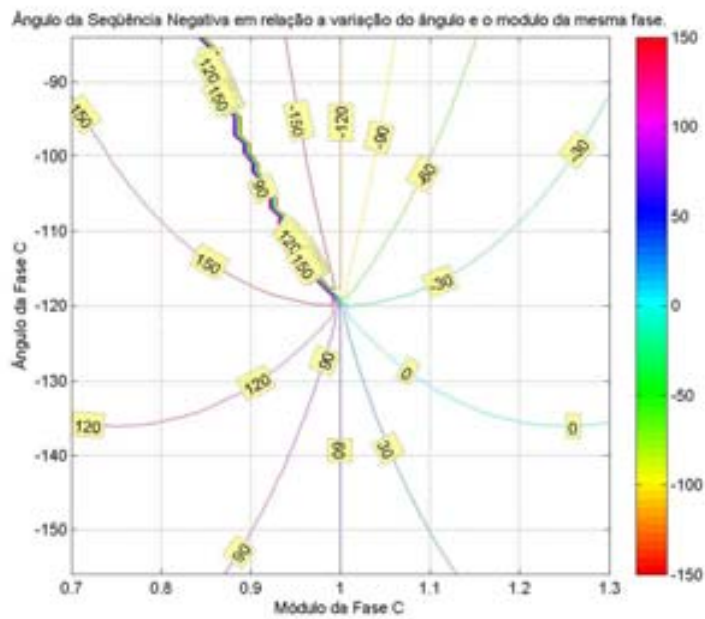


Figura A.12 - Comportamento dos ângulos da componente negativa frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase– Curvas de nível

Das Figuras A.11 e A.12 detecta-se a impossibilidade de se indicar uma faixa de variação dos ângulos da componente negativa considerando-se todas as possibilidades de variação do ângulo e da amplitude da tensão de uma fase.

Entretanto, considerando-se as amplitudes máximas da fase C de até 1.04 pu e os ângulos da fase C variando de -160° a -80° , com as demais grandezas constantes, tem-se a tabela A.3 que apresenta os ângulos da componente negativa versus as condições que produziram o desequilíbrio.

Tabela A.3 – Ângulos da componente negativa para algumas condições de desequilíbrio

Quadrante	Condição do desequilíbrio	Varição do ângulo da componente negativa
Primeiro	Amplitude acima do seu valor de base e ângulo acima do valor nominal	De -120° a -30°
Segundo	Amplitude abaixo do seu valor de base e ângulo acima do valor nominal	De -30° a 60°
Terceiro	Amplitude abaixo do seu valor de base e ângulo abaixo do valor nominal	De 60° a 150°
Quarto	Amplitude acima do seu valor de base e ângulo abaixo do valor nominal	De 150° a 180° e -180° a -120°

Da Tabela A.3 destaca-se que:

- Condições de desequilíbrio em que o ângulo e a amplitude da tensão da mesma fase têm valores superiores ao nominal e de base, respectivamente, geram ângulos da componente negativa no primeiro quadrante (entre -120° e -30°);
- Para condições onde observam-se o ângulo da tensão superior ao nominal e a amplitude inferior ao valor de base, têm-se o ângulo da componente negativa no segundo quadrante (entre 150° e -120°);
- Condições de desequilíbrio em que o ângulo e a amplitude da tensão da mesma fase têm valores inferiores ao nominal e de base, respectivamente, produzem ângulos da componente negativa no terceiro quadrante (entre 60° e 150°); e
- Para condições onde verificam-se o ângulo da tensão inferior ao nominal e a amplitude superior ao valor de base, têm-se o ângulo da componente negativa no quarto quadrante (entre -30° e 60°);

Para qualquer condição onde a variação das amplitudes da tensão se dá acima de 1.04 pu, as curvas que dividem os quadrantes não são retas. Isto inviabiliza qualquer conclusão utilizando os ângulos da componente negativa.

A.2.4 – Variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra

A.2.4.1 - Comportamento do módulo da componente negativa

As Figuras A.13 e A.14 ilustram o comportamento dos módulos da componente negativa frente a variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra.

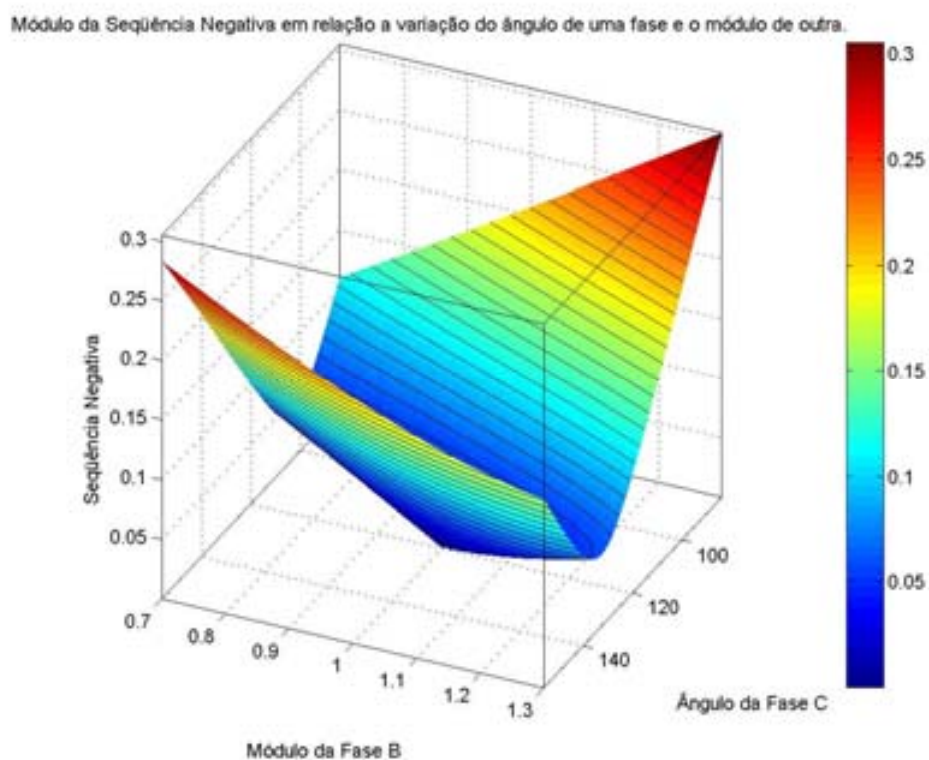


Figura A.13 - Comportamento dos módulos da componente negativa frente a variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra

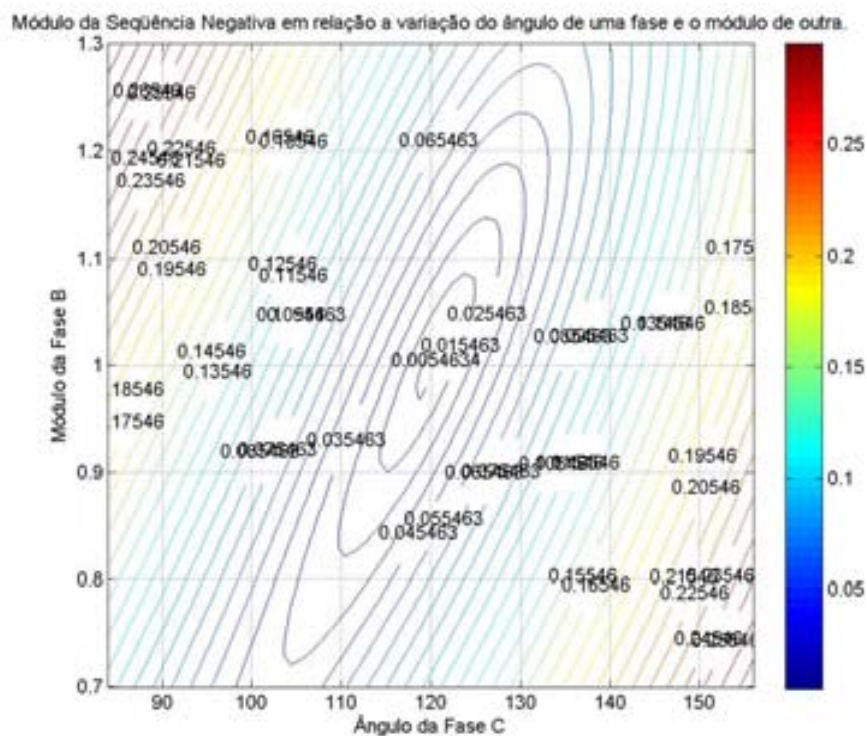


Figura A.14 - Comportamento dos módulos da componente negativa frente a variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra – Curvas de nível

Observa-se das Figuras A.13 e A.14 que variações simultâneas na amplitude de uma fase da tensão e no ângulo de uma outra da ordem de 10% culminam, em geral, em valores de módulos da componente negativa da ordem de 4 a 11%.

As variações simultâneas na amplitude de uma fase da tensão e no ângulo de uma outra da ordem de 10% acarretam, em geral, maiores módulos da componente negativa às variações de uma amplitude da tensão, sob as mesmas condições.

Quando uma tensão apresenta-se com valores nominais em módulo e ângulo, e uma outra tem somente o seu módulo variando igualmente e simultaneamente no mesmo sentido da variação do ângulo de uma outra fase, sabe-se que um acréscimo na amplitude e no ângulo da tensão em relação à condição nominal gera um aumento na componente negativa **maior** do que o detectado quando da redução da amplitude e do ângulo da tensão na mesma faixa de variação, em relação à condição nominal.

Quando uma tensão apresenta-se com valores nominais em módulo e ângulo, e uma outra tem somente o seu módulo variando igualmente e simultaneamente no sentido oposto da variação do ângulo de uma outra fase, sabe-se que um acréscimo na amplitude e uma redução no ângulo da tensão em relação à condição nominal geram um aumento na componente negativa maior do que o detectado quando da redução da amplitude e aumento do ângulo da tensão na mesma faixa de variação, em relação à condição nominal.

A.2.4.2 - Comportamento do ângulo da componente negativa

As Figuras A.15 e A.16 ilustram o comportamento dos ângulos da componente negativa frente a variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra.

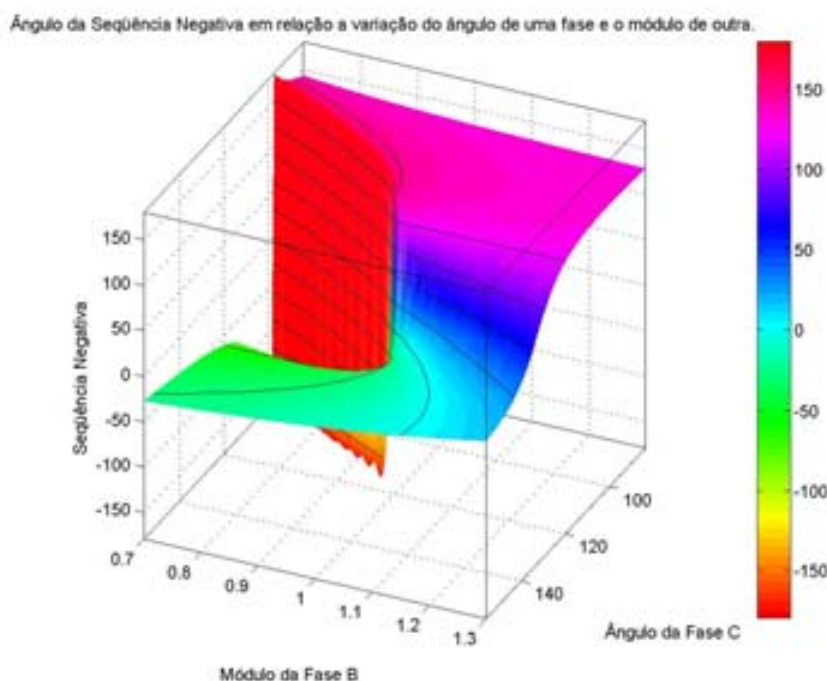


Figura A.15 - Comportamento dos ângulos da componente negativa frente a variação da amplitude de uma fase da tensão com o ângulo de uma outra

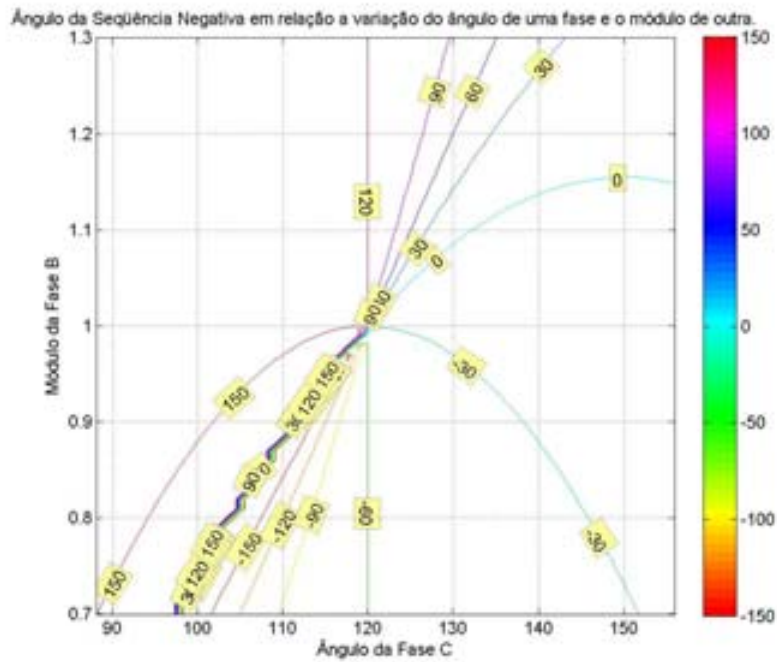


Figura A.16 - Comportamento dos ângulos da componente negativa frente a variação da amplitude de uma fase da tensão com o ângulo de uma outra – Curvas de nível

Ressalta das análises das Figuras A.15 e A.16 que não é possível indicar faixas de variação dos ângulos da componente negativa considerando-se todas as possibilidades de variação dos ângulos da tensão de uma fase e das amplitudes de uma outra.

Porém, considerando-se os ângulos da fase C variando entre 117° e 123° , com as demais grandezas constantes, tem-se a Tabela A.4 que apresenta os ângulos da componente negativa para algumas condições de desequilíbrio.

Tabela A.4 – Ângulos da componente negativa para algumas condições do desequilíbrio

Quadrante	Condição do desequilíbrio	Varição do ângulo da componente negativa
Primeiro	Amplitude da tensão de uma fase e ângulo de uma outra acima dos valores de base e nominal, respectivamente.	De -30° a 120°
Segundo	Amplitude da tensão de uma fase acima do seu valor de base e ângulo de uma outra abaixo do valor nominal	De 120° a 150°
Terceiro	Amplitude da tensão de uma fase e ângulo de uma outra abaixo dos valores de base e nominal, respectivamente.	De 150° a 180° e -180° a -60°
Quarto	Amplitude da tensão de uma fase abaixo do seu valor de base e ângulo de uma outra acima do valor nominal	De -60° a -30°

Da Tabela A.4 verifica-se que:

- Condições de desequilíbrio em que o ângulo da tensão de uma fase e a amplitude de uma outra apresentam valores superiores aos seus respectivos valores nominal e de base, geram ângulos da componente negativa no primeiro quadrante (entre -30° e 120°);
- Para condições onde observam-se o ângulo da tensão de uma fase superior ao nominal e a amplitude de uma outra inferior ao valor de base, têm-se o ângulo da componente negativa no segundo quadrante (entre 120° e 150°);
- Condições de desequilíbrio em que o ângulo da tensão de uma fase e a amplitude de uma outra apresentam valores inferiores aos seus respectivos valores nominal e de base, produzem ângulos da componente negativa no terceiro quadrante (entre 150° e -60°);
- Para condições onde verificam-se o ângulo da tensão de uma fase superior ao nominal e a amplitude de uma outra inferior ao valor de base, têm-se o ângulo da componente negativa no quarto quadrante (entre -60° e -30°);

A.3 – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DE SEQUÊNCIA POSITIVA

As variações das amplitudes das tensões de cada fase serão apresentadas em porcentagem da tensão da fase A. Já as variações dos ângulos das tensões de cada fase são tomadas em porcentagem do valor igual a 120° .

A.3.1 - Variação das amplitudes das tensões de duas fases

Vale ressaltar que em toda esta análise os ângulos das tensões de cada fase permanecem constantes nos seus valores nominais.

A.3.1.1 - Comportamento do módulo do fator K

As Figuras A.17 e A.18 ilustram o comportamento dos módulos da componente positiva frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases.

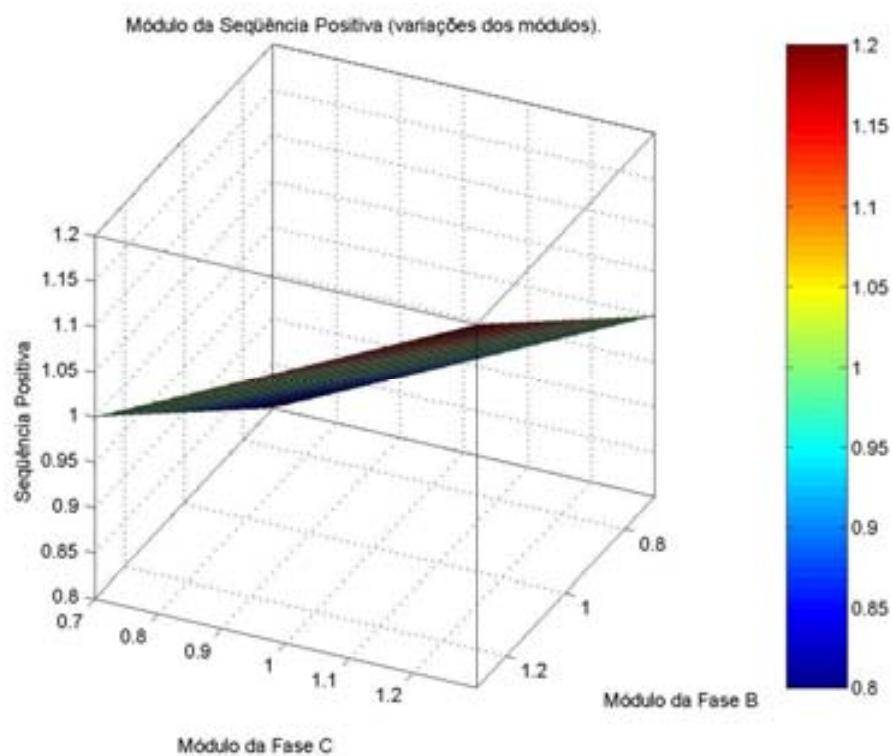


Figura A.17 - Comportamento do módulo da componente positiva frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases

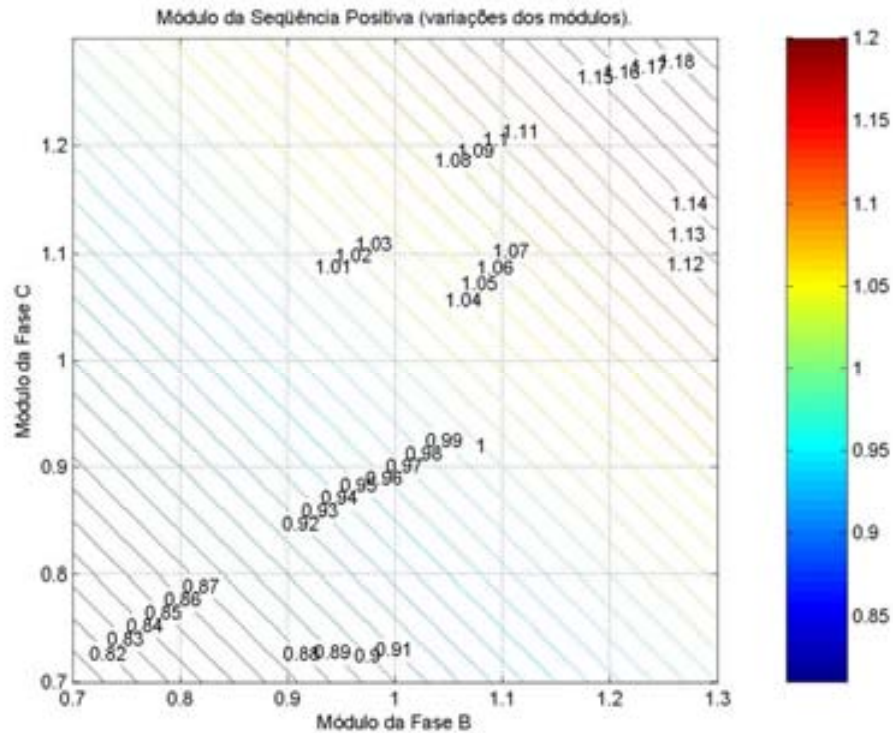


Figura A.18 - Comportamento do módulo da componente positiva frente a variação das amplitudes das tensões de duas fases – Curvas de nível

Observa-se das Figuras A.17 e A.18 que variações nas amplitudes das tensões da ordem de 10% acarretam, em geral, alterações da ordem de -7 a 7% nos valores da componente de seqüência positiva, com relação ao patamar de 1 pu. Na verdade, vislumbra-se alterações da ordem de -4 a 4% quando tem-se somente a amplitude de uma fase variando, e por volta de -7 a 7% quando observa-se duas fases com modificações de até 10% nos seus módulos. Em todos os casos supramencionados os ângulos das tensões permanecem com seus valores nominais.

Quando as duas amplitudes das tensões estão variando igualmente e simultaneamente no mesmo sentido com os ângulos constantes, sabe-se que um acréscimo nas amplitudes das tensões em relação à condição nominal gera um aumento no módulo da componente de seqüência positiva **menor** do que o decréscimo detectado neste parâmetro quando da

redução das amplitudes das tensões na mesma proporção. Há de se ressaltar que a diferença entre os valores supramencionados se dá, em geral, na quarta casa decimal. Entretanto, é esta pequena discrepância que justifica a diferença encontrada na análise do fator k sob as mesmas condições aqui expostas.

Quando as duas amplitudes das tensões estão variando igualmente e simultaneamente em sentidos opostos com os ângulos constantes, o módulo da componente de seqüência positiva será sempre igual a 1.

O aumento na amplitude da tensão de uma única fase mantendo-se as demais constantes em seus valores nominais e considerando-se inalterados os ângulos de fase das tensões, gera um **menor** módulo da componente positiva do que quando da redução desta mesma tensão sob as mesmas condições. Tal diferença é tão pequena que justifica-se, em alguns casos, a partir dos erros inerentes aos cálculos.

Nem sempre a variação das amplitudes de duas fases simultaneamente gera um maior módulo da componente de seqüência positiva comparado às alterações da amplitude de uma única fase, mantendo-se as proporções.

A.3.1.2 - Comportamento do ângulo da componente positiva

Para todas as condições onde os ângulos das tensões são mantidos em seus valores nominais, os ângulos da seqüência positiva são iguais a 0° .

A.3.2 - Variação dos ângulos das tensões de duas fases

Em todos os casos mencionados neste item, as amplitudes das tensões de cada fase permanecem com seus valores constantes e nominais.

A.3.2.1 - Comportamento do módulo da componente positiva

As Figuras A.19 e A.20 ilustram o comportamento dos módulos da componente positiva frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases.

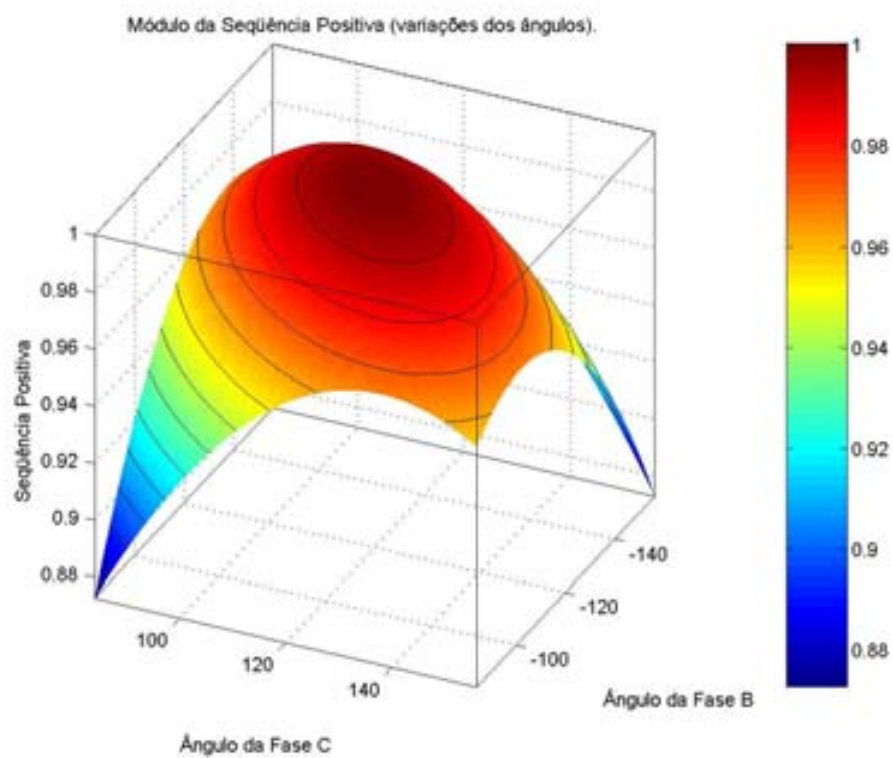


Figura A.19 - Comportamento do módulo da componente positiva frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases

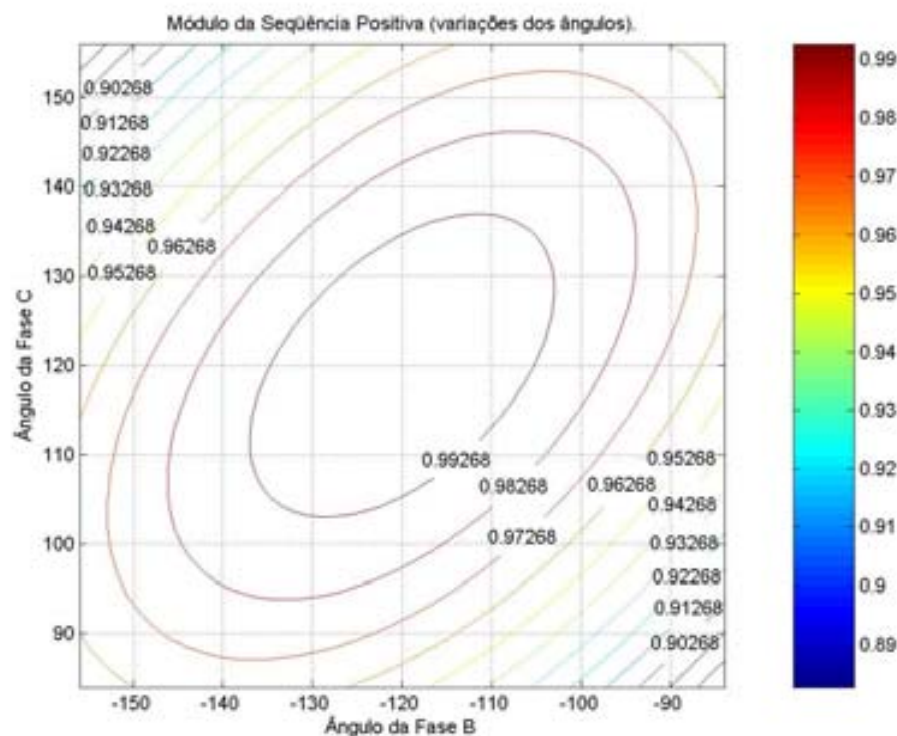


Figura A.20 - Comportamento do módulo da componente positiva frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases – Curvas de nível

Observa-se das Figuras A.19 e A.20 que variações nos ângulos das tensões da ordem de 10% acarretam, em geral, alterações da ordem de -0.4 a -2% nos valores da componente de seqüência positiva, em relação ao patamar de 1 pu. Na verdade, vislumbra-se alterações da ordem de -0.5% quando tem-se somente o ângulo de uma fase variando, e por volta de -2% quando observa-se duas fases com modificações de até 10% nos seus ângulos. Em todos os casos supramencionados as amplitudes das tensões permanecem com seus valores nominais.

Quando os dois ângulos das tensões estão variando igualmente e simultaneamente no mesmo sentido com as amplitudes constantes, há simetria entre os módulos da componente de seqüência positiva, em torno dos ângulos nominais das tensões.

Quando os dois ângulos das tensões estão variando igualmente e simultaneamente em sentidos opostos com as amplitudes constantes, há simetria, entre os módulos da componente de seqüência positiva, em torno dos ângulos nominais das tensões.

Quando a variação dos ângulos das tensões se dá em sentidos opostos, o módulo da componente positiva decresce mais acentuadamente do que variações na mesma proporção de igual sentido.

Quando os ângulos das tensões de duas fases variam em iguais proporções tendendo a reduzir as suas distâncias angulares em relação à referência 0° , têm-se módulos das componentes positivas semelhantes às suas variações nas mesmas proporções tendendo para 180° .

O aumento no ângulo da tensão de uma única fase mantendo-se as demais constantes em seus valores nominais, e considerando-se inalterado as amplitudes das tensões, gera o **mesmo** módulo da componente positiva à redução do ângulo desta tensão sob as mesmas condições.

A variação das amplitudes das tensões gera uma maior variação do módulo da componente de seqüência positiva comparado às alterações proporcionais dos ângulos sob as mesmas condições. Na verdade, a variação dos ângulos das tensões em 10% gera um **menor** módulo da componente positiva do que quando da variação das amplitudes das tensões em 10%.

A.3.2.2 - Comportamento do ângulo da componente positiva

As Figuras A.21 e A.22 ilustram o comportamento dos ângulos da componente positiva frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases.

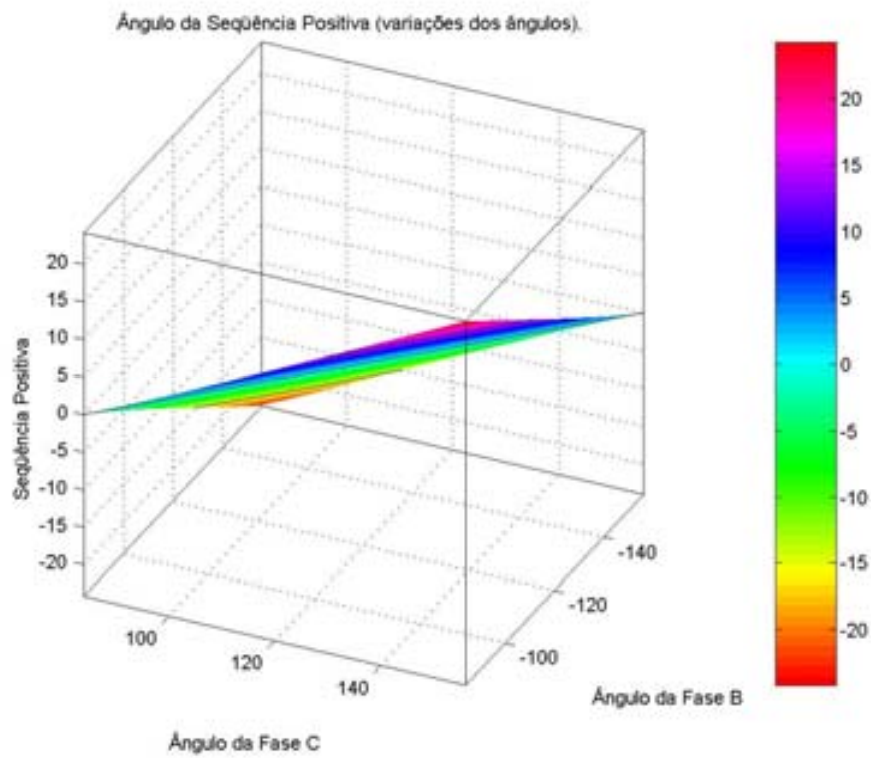


Figura A.21 - Comportamento dos ângulos componente positiva frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases

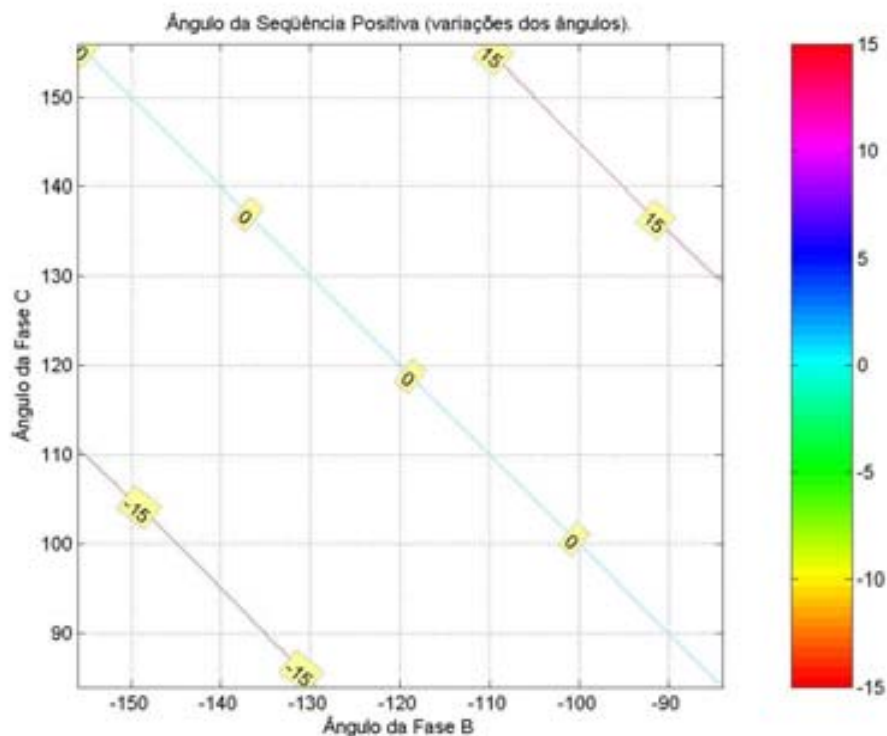


Figura A.22 - Comportamento dos ângulos da componente positiva frente a variação dos ângulos das tensões de duas fases – Curvas de nível

O mais importante a ser destacado aqui é que não é possível indicar faixa de variações dos ângulos da componente positiva considerando-se todas as possibilidades de variações dos ângulos das tensões.

Quando os ângulos das duas fases das tensões estão variando igualmente e simultaneamente em sentidos opostos com as amplitudes constantes, sabe-se que um acréscimo nos ângulos das tensões em relação à condição nominal gera um ângulo da componente de seqüência positiva **semelhante** ao detectado quando da redução dos ângulos das tensões na mesma proporção.

Quando os dois ângulos das tensões estão variando igualmente e simultaneamente no mesmo sentido com as amplitudes constantes, há simetria, em se tratando dos ângulos da componente de seqüência positiva, entre os eixos em torno do ângulo nominal da tensão.

A.3.3 – Variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma única fase

A.3.3.1 - Comportamento do módulo da componente positiva

As Figuras A.23 e A.24 ilustram o comportamento dos módulos da componente positiva frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase.

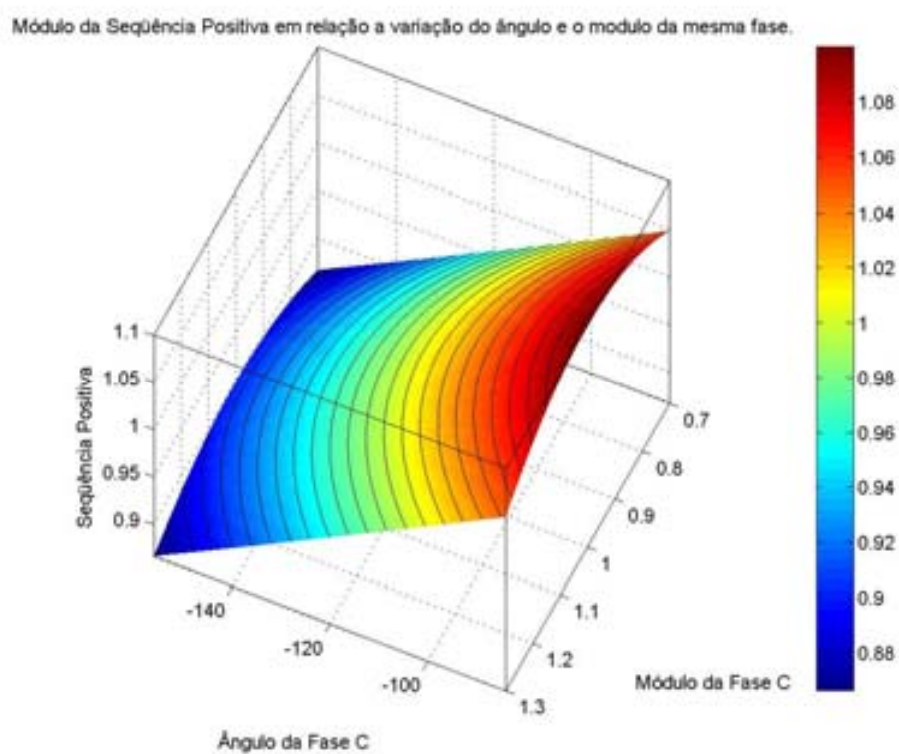


Figura A.23 - Comportamento dos módulos da componente positiva frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase

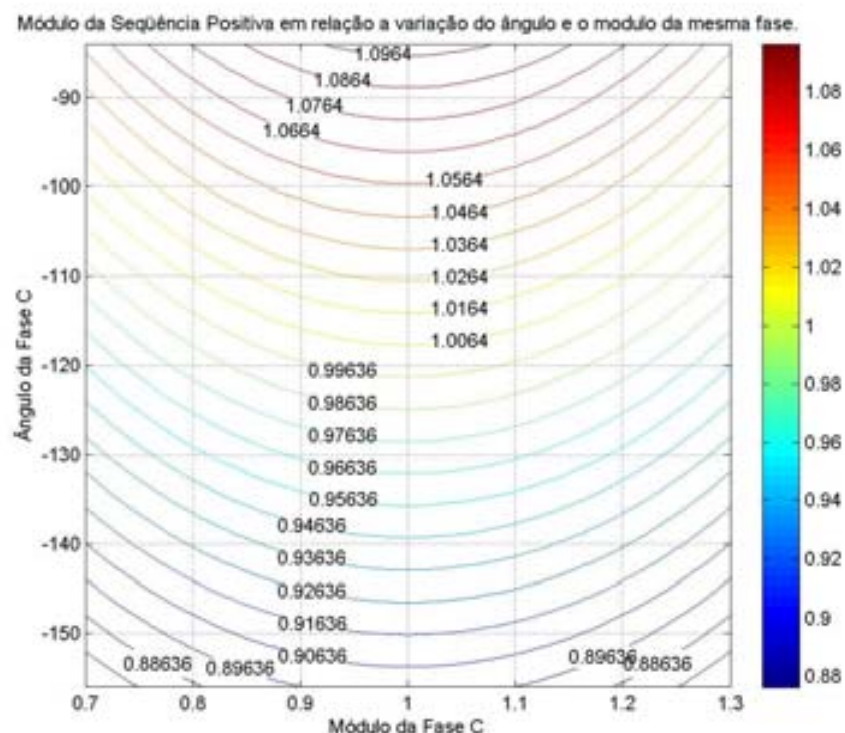


Figura A.24 - Comportamento dos módulos da componente positiva frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase – Curvas de nível

Observa-se das Figuras A.23 e A.24 que variações simultâneas na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão da ordem de 10% acarretam, em geral, alterações da ordem de 2 a 4% nos valores da componente de seqüência positiva.

As variações simultâneas na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão da ordem de 10% acarretam, em geral, menores módulos das componentes positivas do que das variações de duas amplitudes das tensões, sob as mesmas condições.

As variações simultâneas na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão da ordem de 10% acarretam, em geral, maiores módulos das componentes positivas do que das variações de dois ângulos das tensões, sob as mesmas condições.

Variações simultâneas na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão da ordem de 10% sempre culminam em maiores módulos da componente positiva do que das variações de uma amplitude ou de um ângulo da tensão, sob as mesmas condições.

Quando duas fases da tensão apresentam-se com valores nominais, e uma terceira tem o seu módulo e ângulo variando simultaneamente em sentidos opostos, sabe-se que um acréscimo na amplitude e um decréscimo no ângulo da tensão em relação à condição nominal geram um aumento no módulo da componente positiva menor do que o detectado quando da redução na amplitude e o acréscimo no ângulo, nas mesmas proporções.

Quando duas fases da tensão apresentam-se com valores nominais, e uma terceira tem o seu módulo e ângulo variando simultaneamente no mesmo sentido, sabe-se que um acréscimo na amplitude e no ângulo da tensão em relação à condição nominal gera um aumento do módulo da componente positiva menor do que o decréscimo detectado quando da redução destes parâmetros na mesma proporção.

A.3.3.2 - Comportamento do ângulo da componente positiva

As Figuras A.25 e A.26 ilustram o comportamento dos ângulos da componente positiva frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase.

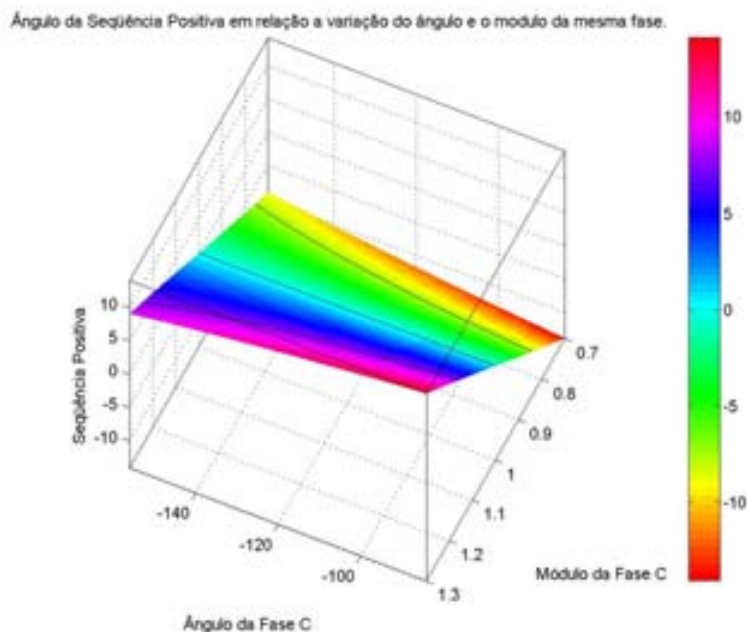


Figura A.25 - Comportamento dos ângulos da componente positiva frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase

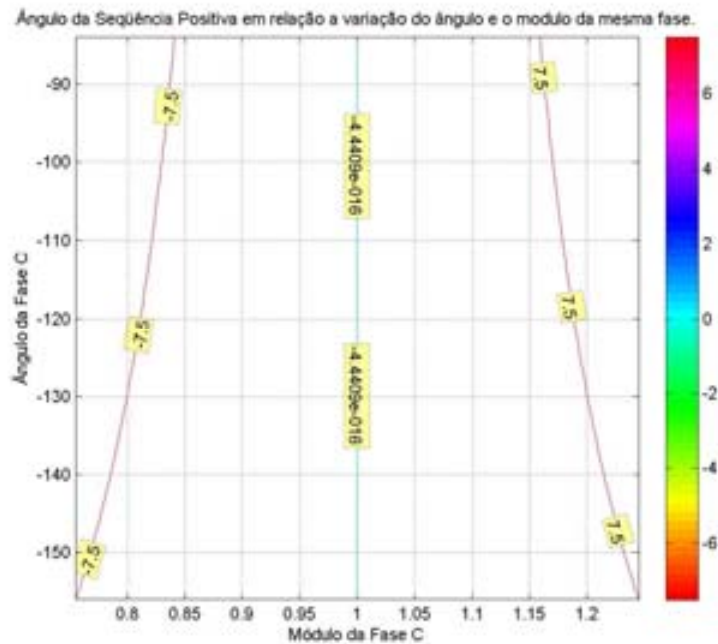


Figura A.26 - Comportamento dos ângulos da componente positiva frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão de uma fase– Curvas de nível

O mais importante a ser destacado aqui é que não é possível indicar faixa de variações dos ângulos da componente positiva considerando-se todas as possibilidades de variações dos ângulos e das amplitudes de uma fase da tensão.

Quando as amplitudes variam e os ângulos da tensão da mesma fase permanecem inalterados, considerando-se as demais grandezas constantes nos seus valores nominais, sabe-se que um acréscimo na amplitude gera um ângulo da componente positiva semelhante em módulo e com o sinal inverso do que o detectado quando da redução na amplitude na mesma proporção e condições.

A.3.4 – Variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra

A.3.4.1 - Comportamento do módulo da componente positiva

As Figuras A.27 e A.28 ilustram o comportamento dos módulos da componente positiva frente a variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra.



Figura A.27 - Comportamento dos módulos da componente positiva frente a variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra

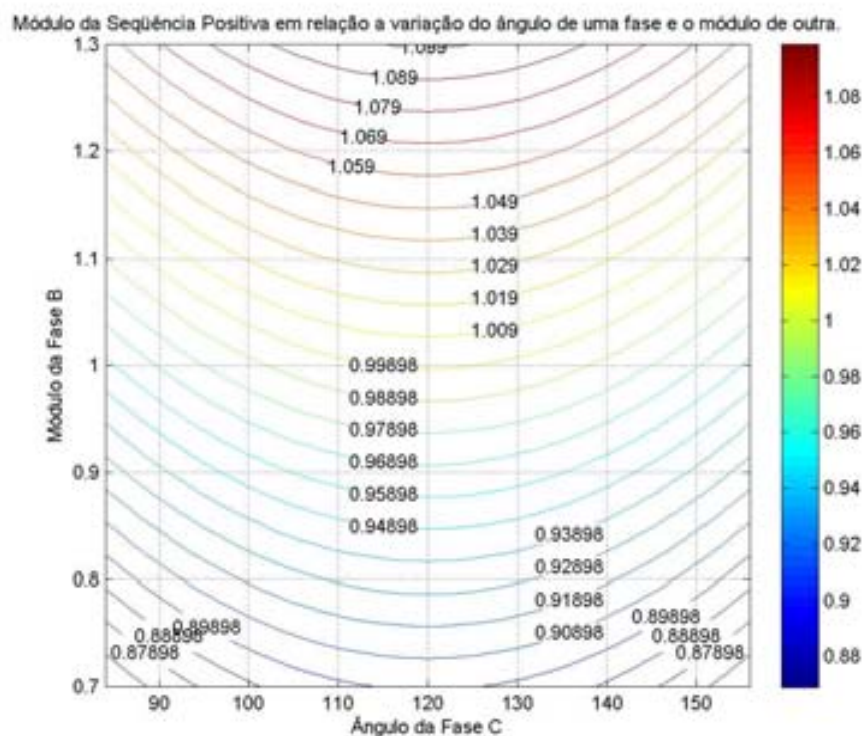


Figura A.28 - Comportamento dos módulos da componente positiva frente a variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra – Curvas de nível

Observa-se das figuras A.27 e A.28 que variações simultâneas na amplitude de uma fase da tensão e no ângulo de uma outra da ordem de 10% culminam, em geral, em alterações dos módulos da componente positiva da ordem de 2 a 4%.

As variações simultâneas na amplitude de uma fase da tensão e no ângulo de uma outra da ordem de 10% acarretam, em geral, alterações dos módulos da componente positiva maiores do que as variações de um ângulo da tensão ou de dois ângulos simultaneamente, sob as mesmas condições.

As variações simultâneas na amplitude de uma fase da tensão e no ângulo de uma outra da ordem de 10% acarretam, em geral, alterações dos módulos da componente positiva menores do que as variações de duas amplitudes simultaneamente da tensão, sob as mesmas condições.

Quando uma tensão apresenta-se com valores nominais em módulo e ângulo, e uma outra tem somente o seu módulo variando igualmente e simultaneamente no mesmo sentido da

variação do ângulo de uma outra fase, sabe-se que um acréscimo na amplitude e no ângulo da tensão em relação à condição nominal gera um elevação no módulo da componente positiva **menor** do que a redução detectada quando da diminuição da amplitude e do ângulo da tensão na mesma faixa de variação, em relação à condição nominal.

Quando uma tensão apresenta-se com valores nominais em módulo e ângulo, e uma outra tem somente o seu módulo variando igualmente e simultaneamente no sentido oposto da variação do ângulo de uma outra fase, sabe-se que um acréscimo na amplitude e uma redução no ângulo da tensão em relação à condição nominal geram um aumento no módulo da componente positiva **menor** do que a redução detectada quando da diminuição da amplitude e aumento do ângulo da tensão na mesma faixa de variação, em relação à condição nominal.

A.3.4.2 - Comportamento do ângulo da componente positiva

As Figuras A.29 e A.30 ilustram o comportamento dos ângulos da componente positiva frente a variação da amplitude da tensão de uma fase com o ângulo de uma outra.

Ângulo da Seqüência Positiva em relação a variação do ângulo de uma fase e o módulo de outra.

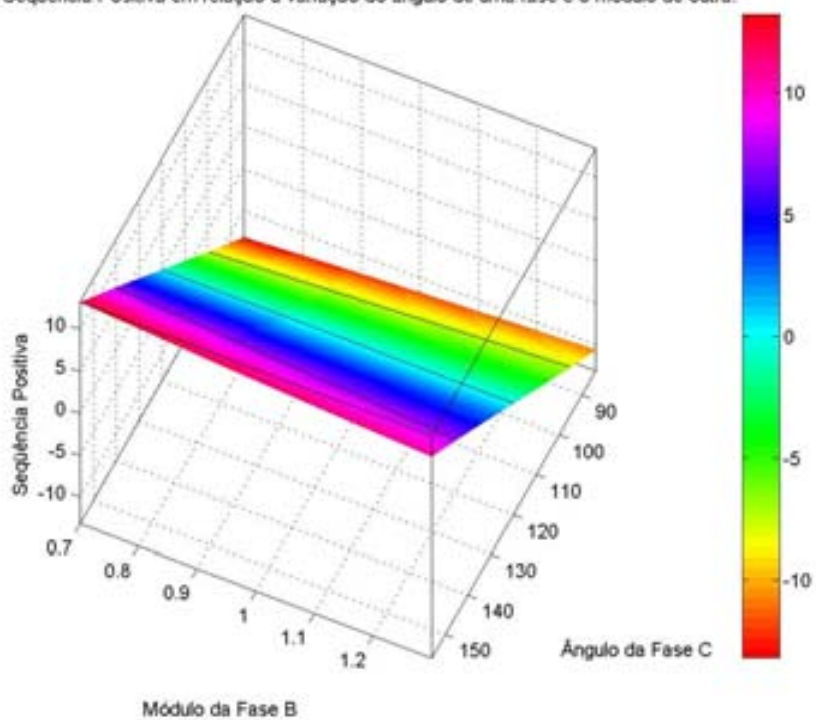


Figura A.29 - Comportamento dos ângulos da componente positiva frente a variação da amplitude de uma fase da tensão com o ângulo de uma outra

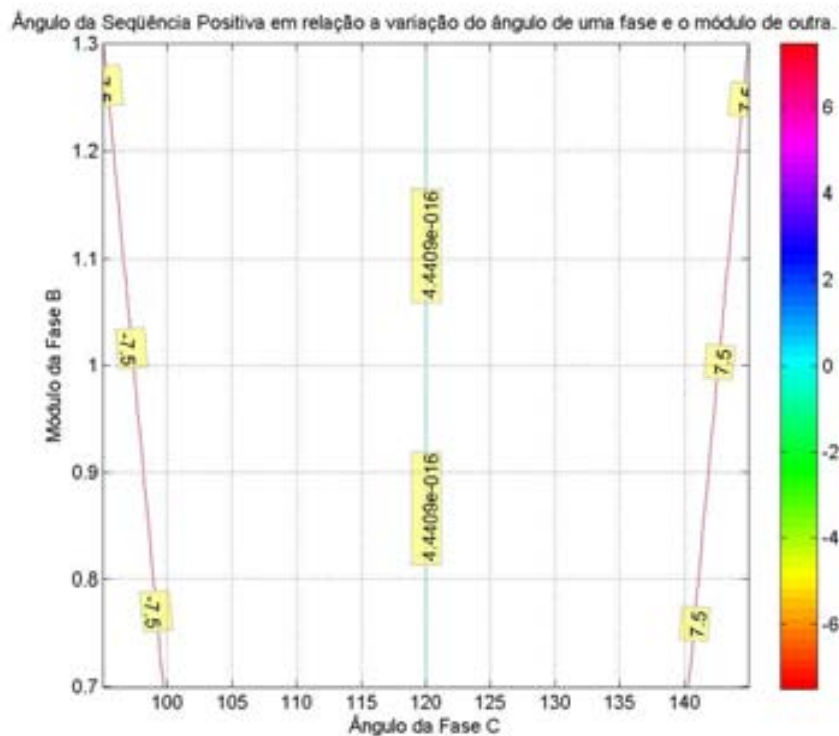


Figura A.30 - Comportamento dos ângulos da componente positiva frente a variação da amplitude de uma fase da tensão com o ângulo de uma outra – Curvas de nível

O mais importante a ser destacado aqui é que não é possível indicar faixa de variações dos ângulos da componente positiva considerando-se todas as possibilidades de variações dos ângulos de uma fase da tensão e das amplitudes de uma outra.

Quando os ângulos de uma fase da tensão variam e as amplitudes de uma outra permanecem inalteradas, considerando-se as demais grandezas constantes nos seus valores nominais, sabe-se que um acréscimo no ângulo da tensão gera um ângulo da componente positiva semelhante em módulo e com o sinal inverso ao detectado quando da redução no ângulo na mesma proporção e condições.