

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS
DE QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO**

Thais Carvalho Valadares

Brasília, julho de 2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS
DE QUANTIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO**

Thais Carvalho Valadares

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, ENE/UnB
Orientador

Prof. Marcus Vinícius Chaffim Costa, ENE/UnB
Co-Orientador

Prof. Ivan Marques de Toledo Camargo, ENE/UnB
Examinador interno

FICHA CATALOGRÁFICA

VALADARES, T. C.

Avaliação Comparativa entre Métodos de Quantificação do Desequilíbrio de Tensão. [Distrito Federal] 2009.

54p., 297 mm (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2009)

Projeto Final de Graduação. Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Desequilíbrio de tensão

2. Qualidade da energia elétrica

3. Métodos de quantificação do fator K

4. Normas

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VALADARES, T. C. (2009). Avaliação Comparativa entre Métodos de Quantificação do Desequilíbrio de Tensão. Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação ENE-1/09, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 54p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thais Carvalho Valadares.

ORIENTADORES : Anésio de Leles Ferreira Filho e Marcus Vinícius Chaffim Costa.

TÍTULO: Avaliação Comparativa entre Métodos de Quantificação do Desequilíbrio de Tensão.

ANO: 2009

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

Dedicatória

Ao meu esposo, Guilherme.

Thais Carvalho Valadares

Agradecimentos

A Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, pelo empenho realizado em me proporcionar um estudo de qualidade, e pelo apoio, dedicação e amor eternos.

Agradeço a toda minha família, especialmente minhas irmãs, Luana e Amanda, pelo carinho, incentivo e atenção.

Ao meu esposo, Guilherme, pelo amor, paciência, dedicação e ajuda incondicional.

Agradeço aos meus orientadores, Professores Anésio e Chaffim, pela presteza, competência, oportunidades e incentivos proporcionados.

Aos amigos Jorge, Petrus e Luciano, pelas grandes contribuições prestadas.

Aos amigos de graduação, pelas alegrias que vivenciamos juntos.

Thais Carvalho Valadares

Avaliação Comparativa entre Métodos de Quantificação do Desequilíbrio de Tensão**Autor: Thais Carvalho Valadares****Orientador: Anésio de Leles Ferreira Filho****Co-orientador: Marcus Vinícius Chaffim Costa****Brasília, julho de 2009**

Apesar do número crescente de pesquisas e estudos na área de qualidade de energia elétrica, nota-se deficiências na elaboração de protocolos de medição padronizados para os fenômenos relacionados a essa área.

Neste íterim, este trabalho apresenta um estudo comparativo acerca de possíveis métodos de quantificação do fenômeno desequilíbrio de tensão. As metodologias propostas foram elaboradas com base nas normas nacionais e internacionais mais recentes relativas ao supracitado fenômeno. O intuito dessa pesquisa é avaliar o quanto as possíveis divergências protocolares impactam na quantificação do indicador. Adicionalmente, objetiva-se verificar a influência das condições do sinal sobre o comportamento do fator K dos diversos métodos abordados. Tendo em vista esses objetivos, sinais com desequilíbrios, afundamentos e harmônicas serão submetidos aos métodos propostos, possibilitando a comparação e análise dos resultados.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ASPECTOS GERAIS	1
1.2	OBJETIVOS DO PROJETO.....	2
1.3	ESTRUTURA DO PROJETO.....	2
2	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	3
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
2.2	DEFINIÇÕES E NORMAS	3
2.3	MÉTODOS E PROCEDIMENTOS	11
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	21
3	RESULTADOS E ANÁLISES	22
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	22
3.2	RESULTADOS E ANÁLISES.....	22
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
4	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
I	ANEXO A	49
II	ANEXO B	53

LISTA DE FIGURAS

2.1	Sistematização gráfica do protocolo de medições	12
2.2	Tipos de janelas	18
2.3	Tipos de afundamentos.....	19
3.1	Visão bidimensional do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrio constante no módulo da tensão	23
3.2	Visão tridimensional do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrio constante no módulo da tensão	24
3.3	Curvas de nível do fator K para sinais com desequilíbrio constante no módulo da tensão	25
3.4	Visão bidimensional do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrio constante no ângulo da tensão	25
3.5	Visão tridimensional do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrio constante no ângulo da tensão	26
3.6	Curvas de nível do fator K para sinais com desequilíbrio constante no ângulo da tensão	27
3.7	Fator K para sinais com desequilíbrio aleatório a cada minuto	28
3.8	Retas de regressão linear para sinais com desequilíbrios aleatórios a cada minuto	29
3.9	Fator K para sinais com desequilíbrio aleatório a cada janela	31
3.10	Retas de regressão linear para sinais com desequilíbrios aleatórios a cada janela	31
3.11	Fator K para o sinal com desequilíbrio aleatório a cada minuto e $\Delta p = 5$ volts submetido a diferentes tipos de janelas de amostragem	33
3.12	Fator K para o sinal com desequilíbrio aleatório a cada janela e $\Delta p = 10$ volts submetido a diferentes tipos de janelas de amostragem	34
3.13	Fator K para sinais com diferentes tipos de afundamentos	35
3.14	Fator K para sinais com afundamentos de médias distintas	36
3.15	Fator K para sinais com afundamentos de desvios padrão distintos	37
3.16	Fator K para sinais com afundamentos de durações distintas.....	38
3.17	Fator K para sinais com afundamentos de recorrências distintas	39
3.18	Fator K para sinais com afundamentos e/ou desequilíbrios aleatórios a cada minuto	40
3.19	Fator K para sinais com afundamentos e/ou desequilíbrios aleatórios a cada janela.....	41
3.20	Fator K para o sinal com DHT= 9,16% em duas fases	42
3.21	Fator K para o sinal com DHT= 18,33% em uma fase e 36,66% na outra	43
I.1	Diagrama fasorial das tensões de fase e de linha	49

LISTA DE TABELAS

2.1	Quadro comparativo das normas atuais de quantificação do desequilíbrio de tensão	11
2.2	Caracterização dos intervalos.....	12
2.3	Métodos propostos para o protocolo de medição do fator K.....	15
2.4	Classificação dos afundamentos segundo sua duração	19
3.1	Inclinação da reta de regressão linear do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrios constantes no módulo da tensão	23
3.2	Coefficientes da regressão linear para o sinal desequilibrado a cada minuto	29
3.3	Coefficientes da regressão linear para o sinal desequilibrado a cada janela	32
3.4	Aumento do fator K para um acréscimo de 66,7% na média dos afundamentos.....	36
3.5	Redução do fator K para um decréscimo de 50% no desvio padrão dos afundamentos.....	37
3.6	Proporcionalidade entre duração do afundamento e o fator K.....	39
3.7	Grau de sensibilidade do fator K dos métodos propostos aos diferentes sinais de entrada	45

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Símbolos

K	Fator K	
$K_{95\%}$	Fator K referente a probabilidade acumulada de 95%	
$K_{99\%}$	Fator K referente a probabilidade acumulada de 99%	
K_{rms}	Valor <i>rms</i> das amostras do fator K	
pu	Por Unidade	
FFT	Transformada rápida de Fourier (do inglês, <i>Fast Fourier Transform</i>)	
<i>rms</i>	Valor quadrático médio (do inglês, <i>Root Mean Square</i>)	
M1 a M9	Métodos propostos	
dp	Desvio Padrão	
DHT	Distorção Harmônica Total	
V	Tensão elétrica	[V]
$\overline{V}_a, \overline{V}_b$ e \overline{V}_c	Fasores de tensão das fases A, B e C	[V]
V_a, V_b e V_c	Módulo das tensões das fases A, B e C	[V]
$V_{a,rms}$	Valor eficaz da tensão da fase A	[V]
$V_{b,rms}$	Valor eficaz da tensão da fase B	[V]
$V_{c,rms}$	Valor eficaz da tensão da fase C	[V]
V_{ab}, V_{bc} e V_{ca}	Módulos das tensões trifásicas de linha	[V]
$V_{ab,rms}$	Valor eficaz da tensão de linha AB	[V]
$V_{bc,rms}$	Valor eficaz da tensão de linha BC	[V]
$V_{ca,rms}$	Valor eficaz da tensão de linha CA	[V]
\overline{V}_1 e \overline{V}_2	Fasores de tensão da sequência positiva e negativa, respectivamente	[V]
V_1 e V_2	Tensão de sequência positiva e negativa, respectivamente, em módulo	[V]
V_{max} e V_{min}	Maior e menor valores das tensões trifásicas	[V]
V_m	Valor médio das tensões de linha	[V]
ΔV	Máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio	[V]
V_h	Módulo da tensão harmônica de ordem h	[V]
V_{sobre} e V_{sub}	Tensão acima e abaixo do valor nominal	[V]
V_f	Tensão fundamental	[V]
T_j	Intervalo janela	[ms]
T_{mc}	Intervalo de curtíssima duração	[s]
T_c	Intervalo de curta duração	[min]
T_l	Intervalo de longa duração	[hr]
T_d	Intervalo diário	[hr]
T_s	Intervalo semanal	[dias]

V_j	Valor referente a uma janela de amostragem	[V]
V_{mc}	Valor referente a um interval de curtíssima duração	[V]
V_c	Valor referente a um interval de curta duração	[V]
V_l	Valor referente a um intervalo de longa duração	[V]
V_d	Valor diário	[V]
V_s	Valor semanal	[V]
V_{rms}	Valor <i>rms</i> das amostras de tensão	[V]
f	Frequência	[Hz]
t	Tempo	[s]
r	Recorrência	[Hz]
d	Duração	[s]

Siglas

QEE	Qualidade da Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema
ANEEL	Agência Nacional da Energia Elétrica
IEC	International Electrotechnical Commission
CENELEC	European Commitee for Electrotechnical Standardization
GCOI	Grupo Coordenador da Operação do Sistema Interligado
GCPS	Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos
SIN	Sistema Interligado Nacional
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NEMA	National Electrical Manufactures Association
CIGRÉ	Congress Internationale des Grand Réseaux Életriques a Haute Tension
Prodist	Procedimentos de Distribuição
CCPE	Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas
MAE	Mercado Atacadista de Energia Elétrica

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

Nos últimos anos, a qualidade da energia elétrica (QEE) tornou-se uma necessidade impreterível. É possível enumerar diversos fatores que contribuíram esse despertar. O surgimento de equipamentos cada vez mais sensíveis a distúrbios, por exemplo, aliado a um processo de produção intransigente a operação incorreta dos mesmos aceleraram a busca pela segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade dos sistemas de energia elétrica [1]. Além disso, as empresas tornaram-se menos tolerantes a interrupção na produção, assim como os consumidores residenciais mais exigentes quanto à qualidade do serviço que lhe é prestado. Portanto, associados a distúrbios de qualidade de energia, surgiram custos elevados, os quais inviabilizaram a recorrência de operações inadequadas.

Diante desse cenário, órgãos nacionais e internacionais têm efetuado um esforço considerável na elaboração de definições, indicadores e normas que regulem, com qualidade, o mercado de energia elétrica. No âmbito nacional, tanto a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) quanto o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) buscam, por meio dos seus documentos elaborados recentemente, a saber, Procedimentos de Distribuição (Prodist) e Procedimentos de Rede, respectivamente, reger a qualidade do produto e do serviço. Internacionalmente, observa-se a importante parceria de duas grandes entidades, a IEC (*International Electrotechnical Commission*) e o CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*), para a elaboração uniformizada de normas referentes à QEE. Sendo assim, nota-se uma mobilização conjunta em vários níveis para suprir as necessidades de um mercado altamente exigente.

No entanto, devido à atualidade do problema, ainda não há soluções únicas para as metodologias de quantificação dos fenômenos associados à qualidade de energia. Um dos distúrbios responsáveis por conseqüências danosas ao sistema elétrico e cuja metodologia de medição ainda não está padronizada é o desequilíbrio de tensão. Este é definido pelo Prodist como sendo o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição [2]. Suas causas estão associadas a desequilíbrios nas correntes de carga ou na tensão de suprimento. Como cargas sensíveis a esse fenômeno, é possível citar os motores de indução trifásicos e os geradores síncronos, cujas vidas úteis são comprometidas devido a aumentos indesejáveis em suas temperaturas de operação [1]. Logo, observa-se que é de grande interesse dos consumidores industriais e comerciais, especialmente, que esse fenômeno seja controlado, evitando prejuízos em suas produções.

Sendo assim, é importante que haja uma padronização nos métodos de quantificação e nos índices de conformidade, a fim de que o mesmo fenômeno, medido por aparelhos distintos, indique o mesmo resultado. Com base nessa motivação, este trabalho traz um estudo comparativo de diferentes metodologias de quantificação do desequilíbrio de tensão. Essas metodologias foram desenvolvidas tendo em vista diversas possibilidades vislumbradas no contexto das normas. A comparação será feita em simulações computacionais, a partir de sinais de teste envolvendo desequilíbrios, afundamentos e componentes harmônicas.

1.2 OBJETIVOS DO PROJETO

A avaliação comparativa de métodos propostos para o cálculo do indicador de desequilíbrio de tensão, fator K, é o objetivo principal desse trabalho. Conforme será visto na subseção 2.2.4, há divergências entre os protocolos de medição das normas nacionais e das internacionais. Sendo assim, este estudo pretende avaliar o quanto as possíveis diferenças entre os métodos impactam na quantificação do indicador. Além disso, também faz parte do escopo desse trabalho verificar a influência das condições do sinal sobre os métodos utilizados para o cálculo do fator K. Com base nesses objetivos gerais, deseja-se:

- Avaliar a influência sobre o fator K da escolha de quantos e quais intervalos de medição utilizar no protocolo;
- Verificar as implicações do cálculo do indicador em diferentes intervalos de agregação;
- Analisar a influência de sinais com desequilíbrios, afundamentos e componentes harmônicas na quantificação do fator K;
- Verificar as consequências da escolha do tipo da janela de amostragem na quantificação do indicador;
- Averiguar as implicações da utilização da transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) e do valor quadrático médio (*rms*, do inglês *root mean square*) na magnitude do fator K para sinais com harmônicas.

1.3 ESTRUTURA DO PROJETO

Este projeto apresenta-se estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 2 é destinado a apresentar os principais conceitos e fundamentações teóricas referentes a desequilíbrio de tensão. As principais normas e recomendações nacionais e internacionais são descritas sucintamente. Com base nestas, nove métodos de quantificação do fator K são propostos e detalhados. Por fim, é feita a descrição de seis casos envolvendo sinais de teste, os quais foram elaborados de forma a alcançar os objetivos mencionados.

No Capítulo 3, são expostos todos os resultados das simulações computacionais realizadas para a comparação entre os métodos de quantificação do indicador de desequilíbrio de tensão. As análises e conclusões decorrentes desses resultados são também apresentadas.

O Capítulo 4 ilustra as principais conclusões obtidas a partir desse trabalho e apresenta algumas sugestões de possíveis trabalhos futuros.

Os anexos contêm material complementar referente a duas demonstrações. No Anexo A, comprova-se a equivalência entre dois métodos de cálculo do fator K, a saber, o método das componentes simétricas e o método do Cigré. Já no Anexo B, ratifica-se que fazer um agrupamento de tamanho m e depois outro de tamanho n é o mesmo de agrupar uma única vez $m \times n$.

2 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será realizada a fundamentação teórica no que concerne a desequilíbrio de tensão, objetivando sua correta compreensão e seu posicionamento dentro do escopo deste trabalho. Além disso, os métodos e procedimentos propostos, que culminam nos objetivos deste estudo, são descritos detalhadamente.

Inicialmente, são apresentados o conceito e os métodos de quantificação de desequilíbrio de tensão. Em seguida, é feita a caracterização do sinal de tensão e dos intervalos de medição presentes nos protocolos. As normas e recomendações nacionais e internacionais são também exibidas sucintamente.

Em seguida, nove métodos de quantificação do desequilíbrio são propostos e detalhados, enfatizando-se os seus objetivos e motivações. Por fim, são apresentados seis casos de sinais de teste, os quais serão utilizados nas simulações computacionais para comparação entre os métodos. Os resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

2.2 DEFINIÇÕES E NORMAS

As definições relativas a desequilíbrio de tensão serão apresentadas nesse tópico, assim como as normas mais relevantes referentes ao protocolo de medição do fator K.

2.2.1 Conceito

O sistema elétrico trifásico equilibrado é composto por três tensões cossenoidais de mesmo módulo e defasadas entre si de 120 graus elétricos ($2\pi/3$ radianos), de acordo com equações 2.1, 2.2 e 2.3:

$$V_a = V_{a,max} \cos(2\pi ft) \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b,max} \cos(2\pi ft - 2\pi/3) \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c,max} \cos(2\pi ft + 2\pi/3) \quad (2.3)$$

onde $V_{a,max}$, $V_{b,max}$, $V_{c,max}$ são os valores máximos das tensões das fases a, b e c, respectivamente.

Em termos fasoriais, essas tensões podem ser escritas conforme as equações 2.4, 2.5 e 2.6 :

$$\bar{V}_a = V_{a,rms} \angle 0^\circ \quad (2.4)$$

$$\bar{V}_b = V_{b,rms} \angle -120^\circ \quad (2.5)$$

$$\bar{V}_c = V_{c,rms} \angle +120^\circ \quad (2.6)$$

onde $V_{a,rms}$, $V_{b,rms}$, $V_{c,rms}$ são os valores *rms* das tensões das fases a, b e c, respectivamente [3].

Caso esses fasores não apresentem o mesmo módulo ou possuam uma defasagem angular diferente de 120° , diz-se que o sistema está desequilibrado.

2.2.2 Métodos de quantificação

Existem diferentes métodos de cálculo do desequilíbrio de tensão. A seguir, serão descritos os quatro mais empregados na literatura atinente, a saber, método das componentes simétricas, CIGRÉ, NEMA e IEEE.

- **Método das componentes simétricas**

Este método é baseado no Teorema de Fortescue (1918):

Teorema de Fortescue "*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*" [3].

Portanto, um sistema trifásico desequilibrado, com seqüência de fases ABC, pode ser resolvido em três outros sistemas simétricos: sistema de seqüência positiva (três fasores equilibrados com seqüência de fases ABC), sistema de seqüência negativa (três fasores equilibrados com seqüência de fases ACB) e sistema de seqüência zero (três fasores paralelos).

O sistema trifásico equilibrado, conforme definido na seção 2.2.1, possui apenas o sistema de seqüência positiva. O desequilíbrio faz surgir componentes de seqüências negativa e zero. Com base nisso, este método define o fator K como a razão entre os módulos das seqüências negativa (V_2) e positiva (V_1) [1], conforme indicado na equação 2.7 e detalhado nas equações 2.8 e 2.9:

$$K\% = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 \quad (2.7)$$

onde

$$\bar{V}_1 = \frac{1}{3}(\bar{V}_a + a^2\bar{V}_b + a\bar{V}_c) \quad (2.8)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{3}(\bar{V}_a + a\bar{V}_b + a^2\bar{V}_c) \quad (2.9)$$

e a é o operador rotacional ($a = 1\angle 120^\circ$).

Por considerar a magnitude e o ângulo das tensões nas três fases, o método das componentes simétricas é o mais rigoroso, necessitando de medidores que registrem os módulos e as defasagens angulares dessas tensões. Muitas normas nacionais e internacionais referentes à quantificação do desequilíbrio recomendam esse método de cálculo do fator K, conforme será visto adiante.

- **CIGRÉ (Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension)**

O método recomendado pelo CIGRÉ utiliza apenas o valor dos módulos das tensões de linha (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) do sistema, com base em uma grandeza adimensional (equações 2.10 e 2.11) [4]:

$$K\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100 \quad (2.10)$$

onde

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (2.11)$$

Este método é obtido a partir do método das componentes simétricas por meio de manipulações algébricas. Esta demonstração encontra-se no Anexo A [1]. Sendo assim, por não necessitar dos ângulos dos fasores e ser equivalente, em módulo, ao método das componentes simétricas, ele é apresentado como uma alternativa para o cálculo do fator K em algumas das normas citadas mais adiante, e será o método utilizado nos procedimentos propostos por este trabalho.

- **NEMA** (*National Electrical Manufactures Association*)

Segundo a norma NEMA - MG1 -14.34 , o fator K é dado pela razão entre o máximo desvio das tensões de linha em relação ao seu valor médio e o próprio valor médio [4], segundo a equação 2.12:

$$K\% = \frac{\Delta V}{V_m} \cdot 100 \quad (2.12)$$

onde

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

V_m é o valor médio das tensões de linha.

- **IEEE** (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

O método de cálculo do fator K recomendado pelo IEEE considera a maior diferença entre as tensões medidas e o somatório das mesmas [4], em conformidade com a equação 2.13:

$$K\% = \frac{3(V_{max} - V_{min})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} \cdot 100 \quad (2.13)$$

onde

V_{max} é o valor do maior módulo das tensões trifásicas;

V_{min} é o valor do menos módulo das tensões trifásicas;

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

2.2.3 Caracterização dos sinais e dos intervalos de medição

É imprescindível para a construção de um indicador de qualidade de energia a caracterização do sinal de tensão em estudo. Somente após essa etapa é possível estabelecer um protocolo de medição que, levando em conta o comportamento do sinal, extraia a informação desejada. Neste item é realizada uma breve caracterização dos sinais e dos intervalos de medição mencionados nos protocolos.

2.2.3.1 Caracterização dos sinais

Um sinal é uma função de uma ou mais variáveis que veicula informação, sendo o objetivo do processamento de sinais extrair um determinado conteúdo, ou conjunto de dados, inerente a ele. O método de extração depende da sua classificação e da natureza da informação transportada [5]. Sendo assim, a caracterização é uma etapa importante antes de iniciar o processamento do sinal.

A tensão em estudo é uma função da variável independente tempo, sendo classificada como contínua no tempo. Como ela assume amplitudes também contínuas, é qualificada como analógica. As formas de onda analógicas são comumente encontradas em nosso cotidiano e são normalmente geradas por meios naturais. Em contrapartida, as digitais são discretas no tempo e apresentam amplitudes quantizadas, não sendo comuns na natureza. No entanto, para realizar o processamento digital do sinal basta utilizar conversores analógico-digital (A/D) e digital-analógico (D/A) [5].

Os sinais elétricos podem ser classificados também quanto ao seu comportamento no tempo, sendo quase estacionários, flutuantes ou rápidos. Aqueles cujo comportamento se dá com variações lentas são os quase estacionários. Estes permitem medições com intervalos sem registro, isto é, não exigem monitoramento contínuo. As formas de onda de tensão em estudo estão dentro dessa categoria. Já os flutuantes e rápidos necessitam de um monitoramento contínuo para que não haja perda de informação durante o processo de amostragem [6].

2.2.3.2 Caracterização dos intervalos de medição

Considerando a classificação do sinal elétrico de tensão dada anteriormente, faz-se necessário distinguir período efetivo de medição de período de observação. O primeiro refere-se ao período efetivo de registro, não contabilizando os possíveis intervalos sem registro entre as janelas. Já o período de observação engloba tanto o período efetivo de medição quanto os intervalos sem registros [6].

Os protocolos de medição de desequilíbrio de tensão utilizam a metodologia de agregação da informação no tempo. Este processo é o responsável por transformar uma característica do sinal obtida durante um certo período em um valor único e representativo [1]. Em se tratando do fator K, a agregação é feita com base nos valores *rms* obtidos durante intervalos de medição. Estes intervalos são caracterizados de acordo com sua duração, a saber:

- *Intervalo janela (T_j)*: É a duração da janela de amostragem utilizada para calcular o valor de cada amostra (V_j) por meio da FFT, sendo um segmento elementar de tempo de medida. Sua duração é de 12 ciclos considerando um sinal de tensão na frequência de 60 Hz.
- *Intervalo de curtíssima duração (T_{mc})*: Possui duração de 180 ciclos, o que equivale a 3 segundos na frequência de 60 Hz, e indica o valor *rms* da tensão (V_{mc}) durante esse período.
- *Intervalo de curta duração (T_c)*: Possui duração de 10 minutos, representando também o valor *rms* da tensão (V_c) nessa etapa.
- *Intervalo de longa duração (T_l)*: Possui duração de 2 horas, indicando também o valor *rms* da tensão (V_l) nesse período. Diferentemente dos demais, este está presente apenas em algumas normas.

- *Intervalo diário* (T_d): Corresponde a 24 horas de observação e, com o auxílio de um tratamento estatístico, fornece o valor da função de distribuição acumulada de 95% das amostras (V_d).
- *Intervalo semanal* (T_s): Corresponde a 7 dias de monitoramento contínuo e retorna o maior dentre os sete valores diários registrados (V_s).

onde

V_j : Valor do módulo da FFT do sinal de tensão referente a uma janela de amostragem;

$$V_{mc} = \sqrt{\frac{\sum_1^{15} V_j^2}{15}} : \text{Valor } rms \text{ das 15 amostras obtidas durante o intervalo } T_{mc} ;$$

$$V_c = \sqrt{\frac{\sum_1^{200} V_{mc}^2}{200}} : \text{Valor } rms \text{ das 200 amostras de } V_{mc} \text{ obtidas durante o intervalo } T_c ;$$

$$V_l = \sqrt{\frac{\sum_1^{12} V_c^2}{12}} : \text{Valor } rms \text{ das 12 amostras de } V_c \text{ obtidas durante o intervalo } T_l ;$$

V_d : Maior valor de tensão dentre as fases monitoradas considerando o tratamento probabilístico de 95%;

V_s : Grandeza representante do resultado final da medição, sendo o maior dos sete valores diários V_d .

As durações especificadas para os intervalos foram baseadas na recomendação IEC61000-4-30 [7] [1], sendo semelhante a de outras normas, conforme será visto adiante.

Os intervalos intermediários de integração, que são o de curtíssima, curta e longa duração, são importantes para gerar um banco de dados compactado que otimize a ocupação de memória e represente adequadamente o sinal desejado, facilitando também a interpretação final dos resultados [1]. Portanto, a finalidade desse procedimento é formar um banco de dados representativo, permitindo realizar o tratamento dos sinais e obter o indicador de desequilíbrio de tensão desejado. Este será comparado com os índices de conformidade, isto é, com os valores máximos permitidos, para que seja analisada a aceitabilidade do mesmo [6].

2.2.4 Normas e recomendações

As normas nacionais e internacionais a respeito de qualidade da energia elétrica e, especificamente, desequilíbrio de tensão, foram fundamentadas com base nas definições e na estratégia de medição expostas na subseção 2.2.3. A seguir tem-se uma breve descrição das mesmas.

2.2.4.1 Normas internacionais

As normas internacionais, em especial as elaboradas pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) e pelo CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*), são de grande importância, pois com base nelas que a legislação nacional é estabelecida. A seguir, tem-se uma síntese desses protocolos.

- **IEC**

Organização mundial cuja missão é preparar e publicar normas internacionais nas áreas de Engenharia Elétrica, Eletrônica e outras áreas associadas, a fim de servir como base para a elaboração de normas nacionais e como referência em contratos internacionais. Sendo assim, seus documentos consistem em diretrizes gerais a serem observadas pelas regulamentações que normatizam o assunto.

A recomendação IEC 61000-4-30, cuja versão atual foi publicada em abril de 2008, estabelece procedimentos para medição de diversos problemas relacionados à qualidade de energia elétrica, inclusive o desequilíbrio de tensão. Sua importância é ressaltada neste trabalho visto que diversas normas são fundamentadas a partir desta.

De acordo com essa norma, o desequilíbrio de tensão deve ser calculado a cada janela de 12 ciclos, considerando a frequência de 60Hz, a partir do método das componentes simétricas. Os intervalos intermediários sugeridos são o de curtíssima, curta e longa duração, os quais duram, respectivamente, 180 ciclos, 10 minutos e 2 horas [7][1].

Segundo [1], a IEC não estabelece uma maneira única de obter o valor final do fator K, o qual será comparado aos níveis de conformidade. Em seu anexo informativo, a norma propõe que, para aplicações contratuais, é possível definir o índice de desequilíbrio de tensão de diversas maneiras, a saber: o maior valor dentre os intervalos de 10 minutos, ou o maior valor do intervalo de 2 horas, ou a probabilidade de 95% dos intervalos de 10 minutos ou de 2 horas. Portanto, a norma deixa a critério dos interessados escolher a forma mais apropriada para sua aplicação.

Com relação aos indicativos de aceitabilidade para o desequilíbrio de tensão, a recomendação IEC 1000-2-2, publicada em 1990, indica que o limite de desequilíbrio de sequência negativa em sistemas de baixa tensão é de 2%, podendo haver valores mais elevados apenas em casos excepcionais, e por períodos limitados [4].

- **CENELEC**

É uma organização técnica sem fins lucrativos composta por Comitês Nacionais de 30 países europeus e mais 8 de países afiliados. A missão desse órgão é preparar voluntariamente as normas que irão regular o mercado de energia europeu unificado e ainda remover barreiras para o comércio da energia entre esses países.

Em 1991, iniciou-se um acordo entre a IEC e o CENELEC denominado *Lugano agreement*, cuja nova versão, em 1996, foi chamada de *Dresden agreement*. Esse acordo firmou uma parceria entre os dois órgãos baseada em um planejamento mútuo de novos trabalhos e uma votação paralela das normas internacionais, padronizando assim as novas publicações. Portanto, a norma sugerida pelo CENELEC para o protocolo de medição de desequilíbrio de tensão é a EN 61000-4-30, que é idêntica a IEC 61000-4-30 e foi publicada em janeiro de 2009.

2.2.4.2 Normas nacionais

As normas nacionais referentes a protocolos de medição de desequilíbrio de tensão são elaboradas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) no âmbito da rede elétrica e pela ANEEL (Agência

Nacional de Energia Elétrica) em se tratando de sistemas de distribuição de energia elétrica com tensões inferiores a 230 KV. Este item apresenta um breve histórico da legislação nacional.

- **GCOI/GCPS**

O GCOI (Grupo Coordenador da Operação do Sistema Interligado) era o órgão responsável pelo planejamento, operação e tratamento das questões comerciais entre geradores e distribuidores de energia elétrica. Este órgão foi extinto em março de 1999 e suas responsabilidades foram transferidas ao ONS e ao MAE (Mercado Atacadista de Energia Elétrica).

O GCPS (Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos) era o órgão responsável pelo planejamento da expansão dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Com a extinção desse órgão no ano de 1999, foi criado o CCPE (Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas).

Os grupos GCOI e GCPS elaboraram em conjunto dois documentos importantes relacionados à qualidade de energia, a saber: "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais" em 1993 e "Procedimentos de Medição para Aferição da Qualidade da Onda de Tensão Quanto ao Aspecto de Conformidade (Distorção Harmônica, Flutuação e Desequilíbrio de Tensão)" em 1997. O conteúdo desses documentos relativo ao desequilíbrio de tensão está brevemente descrito a seguir.

O fator de desequilíbrio de tensão, de acordo com essas recomendações, é definido pelo Método das Componentes Simétricas, sendo também indicado o método do CIGRÉ. Sua obtenção deve ser feita aferindo a tensão nas três fases no ponto de entrega. A transformada rápida de Fourier deve ser o procedimento adotado para processar esses sinais de 60 Hz, com um comprimento da janela de amostragem entre 6 e 30 (preferencialmente igual a 8) ciclos da frequência fundamental.

O intervalo de curtíssima duração adotado deve ser de 20 janelas de amostragem, podendo chegar a 60 segundos, caso haja intervalos sem medidas. O intervalo de curta duração deve ser equivalente a 100 amostras de curtíssima duração, não excedendo 1 hora. Os valores *rms* das tensões devem ser calculados para esses intervalos. A seguir tem-se o intervalo diário, no qual são calculadas as probabilidades acumuladas de 95% e 99%, correspondendo aos índices K95% e K99%, respectivamente. O intervalo semanal, que é o período de observação mínimo do indicador de desequilíbrio de tensão, representará o maior nível de tensão K99% dentre os 7 registros diários, sendo este o fator de desequilíbrio de tensão global [6].

É determinado que o limite global para esse indicador seja de 2%, contanto que o limite individual não ultrapasse 1,5%. Esses limites podem ser violados temporariamente em casos excepcionais.

- **Procedimentos de rede - ONS**

São documentos normativos elaborados pelo ONS, juntamente com os agentes envolvidos, e aprovados pela ANEEL. Um dos seus objetivos é especificar os requisitos técnicos do sistema de transmissão da rede básica do Sistema Interligado Nacional - SIN [8].

O submódulo 25.6 deste documento define o Fator de Desequilíbrio de Tensão (K) pelo método das Componentes Simétricas. Define-se também o indicador K95% como sendo o valor de K que foi superado

em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24 horas, considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 minutos, ao longo de 7 dias consecutivos.

No submódulo 2.8, é estabelecido que o limite global nos barramentos da rede básica é de 2% e o limite individual nos pontos de conexão com a rede básica é de 1,5%.

Ainda no submódulo 2.8 é citado que os instrumentos de medição utilizados no processo de apuração dos indicadores devem ter desempenho compatível com os requisitos estipulados pela recomendação IEC 1000-4-7, publicada em 1991, sendo uma versão anterior da atual IEC 61000-4-30, o que ressalta a importância das recomendações feitas por esse órgão internacional.

• **Procedimentos de distribuição - ANEEL**

São documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, incluindo toda as redes e linhas de distribuição em tensão inferior a 230 KV [2].

O módulo 8 deste documento é referente à qualidade de energia elétrica. Nele é definido o Fator de Desequilíbrio de Tensão (FD) pelo método das componentes simétricas e, alternativamente, também pelo método do Cigré. O valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição deve ser menor ou igual a 2%, com exceção dos de baixa tensão.

O protocolo de medição é citado em fase de elaboração e, até a data da apresentação deste trabalho, não foi divulgado. Portanto, pesquisas como esta aqui proposta caracterizam-se como relevantes quando se trata da escolha adequada de índices e de limites de normas para fenômenos como o desequilíbrio de tensão.

Na resolução 505 da ANEEL, são determinados os valores de conformidade dos níveis de tensão elétrica em regime permanente. Nos artigos 14 e 15, as características mínimas dos equipamentos de medição são especificadas, a saber: taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo, conversor A/D do sinal de tensão de 12 bits, precisão de até 1% da leitura, intervalos de medição de 10 minutos, com janelas fixas e consecutivas de 12 a 15 ciclos [9].

2.2.4.3 Quadro comparativo

As principais informações das normas mais recentes descritas anteriormente estão sintetizadas em um quadro resumo comparativo apresentado na tabela 2.1.

Conforme pode ser observado por esse quadro, não existe um consenso entre as normas de quais intervalos utilizar e qual estatística aplicar para chegar-se ao fator K diário, até mesmo a IEC abre margem para diversos caminhos. Apesar disso, como características gerais, tem-se que a duração da janela de amostragem é de aproximadamente 0,2 segundo e os intervalos de curtíssima, curta e longa duração, quando existentes, duram, respectivamente, 3 segundos, 10 minutos e 2 horas. O valor do fator K diário é baseado na porcentagem acumulada de 95% das amostras integralizadas em 10 minutos, segundo o ONS. A ANEEL não fornece essa informação, e a IEC e o CENELEC indicam diversas possibilidades de cálculo. Além disso, o maior valor do fator K, considerando os sete dias da semana, não deve ultrapassar o limite

global de 2%. Por fim, todas as normas indicam como principal método de quantificação de desequilíbrio o das componentes simétricas. No entanto, o método do Cigré pode ser utilizado alternativamente devido à equivalência entre ambos (Anexo A).

Tabela 2.1: Quadro comparativo das normas atuais de quantificação do desequilíbrio de tensão

	IEC e CENELEC	ONS	ANEEL
T_j (segundos)	0,2	-	0,2 a 0,25
T_{mc} (segundos)	3	-	-
T_c (minutos)	10	10	10
T_l (horas)	2	-	-
Fator K diário	-	95%	-
Limite global	2%	2%	2%
Método de quantificação	Componentes simétricas	Componentes simétricas	Componentes simétricas ou CIGRÉ

2.3 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

Os protocolos de medição de qualidade de energia não estão claramente especificados nas normas apresentadas anteriormente. Algumas regras são estipuladas, mas ainda há margem para divergência. Além disto, haja vista a atualidade da busca por indicadores representativos, existem protocolos de medição em fase de elaboração, como o da ANEEL. Sendo assim, torna-se necessário um estudo comparativo das diferentes formas de medição, a fim de avaliar a influência destas sobre o indicador de desequilíbrio de tensão.

Neste trabalho serão estudadas as implicações na quantificação do fator K resultantes da escolha de quantos e quais serão os intervalos de medição. Além disso, a influência decorrente da escolha do intervalo em que será efetivamente realizado o cálculo deste indicador também serão verificados. Para tanto, nove métodos representando diferentes protocolos serão propostos e simulados.

A tabela 2.2 resume as informações importantes dos intervalos, a saber: suas durações, a quantidade de janelas de amostragem contida em cada um deles e o tamanho da agregação (N). Foi considerado, na elaboração da tabela, um protocolo de medição composto por todos esses intervalos, inclusive o de longa duração.

O tamanho da agregação de determinado intervalo pode ser encontrado dividindo seu número de janelas pela quantidade de janelas presente no intervalo imediatamente anterior. O tamanho da agregação indica, por exemplo, que o intervalo de curta duração agrega os valores de 200 intervalos de curtíssima duração, neste caso realizando o valor *rms*.

Tabela 2.2: Caracterização dos intervalos

Intervalo	Duração	Número de janelas	Tamanho da agregação
Janela	0,2 segundo	1	segmento elementar
Curtíssima duração	3 segundos	15	15
Curta duração	10 minutos	3000	200
Longa duração	2 horas	36000	12
Diário	24 horas	432000	12
Semanal	7 dias	3024000	7

A figura 2.1 exemplifica o procedimento de agregação dos dados, com excessão do intervalo de longa duração, que não está presente nas normas nacionais.

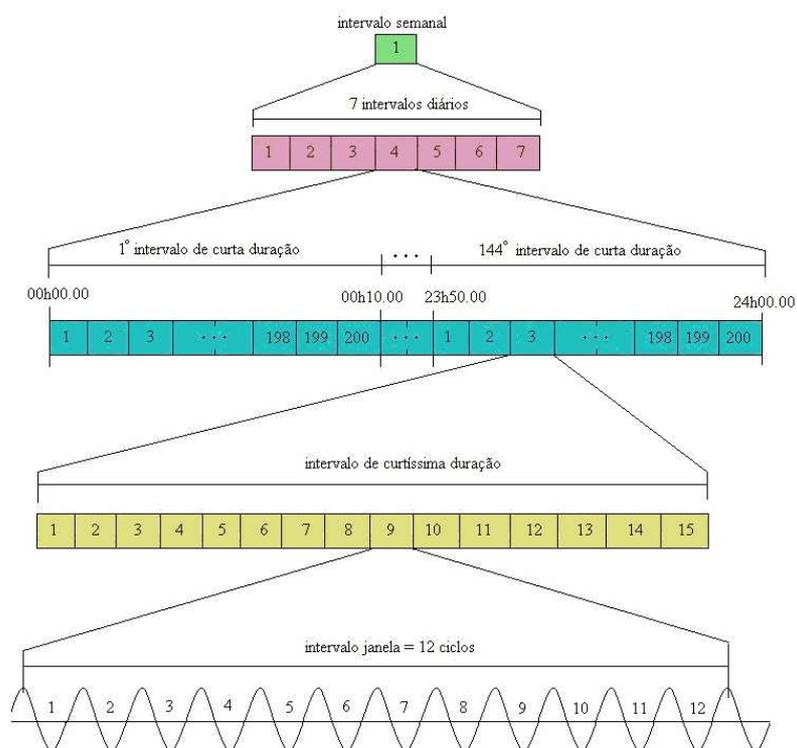


Figura 2.1: Sistematização gráfica do protocolo de medições

- **Motivação para a elaboração dos métodos propostos**

Conforme apresentado na subseção 2.2.3, existem três intervalos intermediários de integração, a saber, o de curtíssima (primeiro), curta (segundo) e longa duração (terceiro), que duram, respectivamente, 3 segundos, 10 minutos e 2 horas. No entanto, não há um consenso entre as normas estudadas de quantos e quais intervalos utilizar no protocolo de medição. Sendo assim, um questionamento imediato é quais são as implicações da presença desses intervalos na quantificação do fator K. Sendo assim, este trabalho permitirá

avaliar o impacto da existência desses intervalos intermediários na magnitude do fator K. A duração da janela de amostragem será fixa em 0,2 segundo e os intervalos diário e semanal também permanecerão definidos conforme feito na subseção 2.2.3. Deste modo, apenas a presença dos intervalos intermediários será avaliada.

Além da escolha de quantos e quais serão os intervalos presentes no protocolo, é necessário escolher também em qual deles que será efetuado o cálculo do fator K. Tendo em vista que neste trabalho o fator K será calculado segundo o método recomendado pelo Cigré, sendo, portanto, obtido a partir dos módulos das 3 tensões de linha, temos duas possibilidades para proceder seu cálculo [10]. Na primeira delas, o fator K é calculado a cada janela de amostragem e os agrupamentos no decorrer dos intervalos intermediários são feitos todos em termos do valor *rms* do fator K. A opção alternativa é fazer os agrupamentos intermediários em termos do valor *rms* das 3 tensões de linha, e calcular o fator K apenas no último intervalo intermediário a partir do valor *rms* final dessas 3 tensões. As implicações dessas duas formas de cálculo também serão estudadas neste trabalho.

2.3.1 Métodos Propostos

Com base na escolha de quais intervalos utilizar e de quando calcular o fator K, surgem nove metodologias possíveis para o protocolo de medição do desequilíbrio de tensão. Estes métodos propostos, que serão chamados de M1 a M9, estão descritos detalhadamente a seguir e serão resumidos na tabela 2.3.

2.3.1.1 Método 1

Este método não apresenta nenhum intervalo de integração intermediário, isto é, a cada janela (0,2 segundo) obtém-se os valores das tensões de linha e calcula-se os valores do fator K correspondentes. Portanto, ao final de 1 dia, obtém-se 432000 valores desse indicador, conforme indicado na tabela 2.2, e calcula-se o K95%. O fator K resultante do protocolo de medição é o máximo dos 7 valores diários obtidos ao longo da semana. Como em todos os métodos propostos o indicador semanal será o máximo dos valores diários, essa informação será omitida na descrição dos próximos métodos.

2.3.1.2 Método 2

O método 2 apresenta apenas um intervalo de integração intermediário, o de curtíssima duração, também chamado de 3 segundos. A cada 15 janelas, completando-se os três segundos, calcula-se o valor *rms* das 15 tensões de linha ($V_{ab,rms}$, $V_{bc,rms}$, $V_{ca,rms}$) e obtém-se o fator K correspondente. Portanto, ao longo de 1 dia, chega-se a 28800 valores do fator K e ao K95%.

2.3.1.3 Método 3

Este método também apresenta apenas um intervalo de integração intermediário, o de curta duração, também chamado de 10 minutos. Sendo assim, a cada 3000 janelas, conforme indicado na tabela 2.2, completam-se os 10 minutos e calcula-se o valor *rms* das 3000 tensões ($V_{ab,rms}$, $V_{bc,rms}$, $V_{ca,rms}$) computando, em seguida, o valor do fator K correspondente. Portanto, ao longo de 1 dia, obtém-se 144 valores

desse indicador para calcular o K95%.

2.3.1.4 Método 4

O método 4 apresenta apenas o intervalo intermediário de longa duração, ou de 2 horas. Como em duas horas estão contidas 36000 janelas de 0,2 segundo, conforme indicado na tabela 2.2, faz-se o valor *rms* das 36000 tensões de linha e, com os valores de $V_{ab,rms}$, $V_{bc,rms}$, $V_{ca,rms}$, calcula-se o fator K. Ao final de 1 dia, obtém-se 12 valores desse indicador e encontra-se o K95%.

2.3.1.5 Método 5

Este método contém os dois primeiros intervalos de integração intermediários, o de 3 segundos e o de 10 minutos, e o fator K é calculado apenas ao final deles. Sendo assim, a cada 15 janelas (3 segundos) calcula-se o valor *rms* das tensões de linha, obtendo a cada 10 minutos 200 desses valores *rms* de 3 segundos, com os quais é feito novamente o valor *rms* e, por fim, o cálculo do fator K. Ao final de 1 dia, tem-se 144 valores de fator K para calcular o K95%.

2.3.1.6 Método 6

O método 6 apresenta todos os intervalos intermediários de integração. Assim, coincide com o método 5 até o intervalo de 10 minutos, no qual também é calculado o valor *rms* referente a 200 segmentos de 3 segundos. Em seguida, a cada 2 horas, obtém-se 12 valores das tensões de linha *rms* de 10 minutos e, mais uma vez, o valor *rms* dessas tensões é computado para que se calcule o fator K. Como os dados foram agregados até 2 horas, o K95% ao final de 1 dia é calculado com base em 12 valores desse indicador.

2.3.1.7 Método 7

Neste método, o fator K é calculado a cada janela, e não mais somente no último intervalo intermediário de agregação. Como o método 7 apresenta somente o intervalo intermediário de curtíssima duração, a cada 3 segundos totalizam-se 15 valores do fator K, com os quais é calculado o valor *rms*. Ao final de 1 dia, obtém-se 28800 valores desse indicador, a partir dos quais chega-se ao K95%.

2.3.1.8 Método 8

Assim como no método anterior, o fator K é calculado a cada janela e a agregação de 3 segundos é feita com seus 15 valores correspondentes. Em seguida, tem-se outro intervalo de integração (10 minutos) o qual utiliza as 200 agregações anteriores para calcular novamente o valor *rms* do fator K. Deste modo, ao longo de 1 dia, obtém-se 144 indicadores de 10 minutos e calcula-se o K95%.

2.3.1.9 Método 9

O último método contém todos os intervalos intermediários de integração e difere do método 6 por calcular o fator K a cada janela, utilizando-o para fazer o valor *rms* em cada intervalo intermediário de integração.

A tabela 2.3 resume o procedimento adotado por cada um dos métodos propostos. A nomenclatura adotada é descrita em seguida.

Tabela 2.3: Métodos propostos para o protocolo de medição do fator K

Intervalos	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
200 ms	V - K	V	V	V	V	V	V - K	V - K	V - K
3 s	–	Vrms-K	–	–	Vrms	Vrms	Krms	Krms	Krms
10 min	–	–	Vrms-K	–	Vrms-K	Vrms	–	Krms	Krms
2 horas	–	–	–	Vrms-K	–	Vrms-K	–	–	Krms
1 dia	K95%	K95%	K95%	K95%	K95%	K95%	K95%	K95%	K95%
7 dias	Kmax	Kmax	Kmax	Kmax	Kmax	Kmax	Kmax	Kmax	Kmax

onde

V : Cálculo da tensão a cada janela por meio da FFT;

V - K : Cálculo dos valores de tensão e do fator K a cada janela;

Vrms : Cálculo do valor *rms* da tensão;

Krms : Cálculo do valor *rms* do fator K;

Vrms-K: Cálculo do valor *rms* da tensão e, a partir desse valor, calcula-se o fator K;

K95% : Valor do fator K que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24 horas;

Kmax: Maior valor diário do fator K.

Com base na descrição dos métodos e na tabela 2.3, nota-se que os mesmos foram divididos em 3 grupos de acordo com o momento do cálculo do fator K. O primeiro grupo é composto apenas pelo método 1, pois este difere-se de todos os outros por não apresentar nenhum intervalo intermediário de integração. Fazem parte do segundo grupo os métodos de 2 a 6, cuja característica diferencial é postergar o cálculo do indicador para o último intervalo intermediário de agregação. No terceiro grupo estão os métodos numerados de 7 a 9, os quais calculam o fator K a cada janela.

Outro fato importante de ressaltar, observado também da tabela 2.3, é a equivalência existente entre os métodos M2 e M7, M5 e M8, M6 e M9, visto que apresentam exatamente os mesmos intervalos, mas calculam o fator K em momentos distintos. Nota-se também que, apesar de viável, não foram feitas correspondências equivalentes no terceiro grupo para os métodos M3 e M4 do segundo grupo. A justificativa deste fato será dada no capítulo 3, no qual estão apresentados os resultados dessa pesquisa.

2.3.2 Sinais de teste

Os nove métodos propostos serão comparados entre si a fim de avaliar o quanto a presença de intervalos intermediários de integração e o momento do cálculo do fator K influenciam na quantificação desse indicador. Para tanto, formas de onda senoidais com amplitudes desequilibradas, com a presença de afundamentos de tensão e com distorções harmônicas serão empregadas como sinais de teste para a comparação entre os métodos. Esses sinais de teste permitirão também uma avaliação sobre a influência das condições do sinal sobre a magnitude do fator K. A seguir, seis casos com sinais distintos serão apresentados.

2.3.2.1 Caso 1

Este é o mais simples dos casos pois os sinais aqui simulados apresentam desequilíbrios constantes ao longo de todo o dia. Seu objetivo é avaliar a diferença entre os 9 métodos ao serem submetidos a sinais cujos desequilíbrios são constantes e verificar a influência dos diferentes sinais na quantificação do fator K. Os quatro subcasos descritos a seguir encaixam-se dentro dessa categoria:

- *Subcaso 1.1*

Sinal trifásico senoidal, com as amplitudes das tensões das fases B e C constantes em 220 volts e a amplitude da tensão da fase A variando de 180 a 260 volts, a cada 5 volts. A mudança da amplitude da fase A implica na origem de um novo sinal, pois cada um dos 17 sinais gerados a cada 5 volts apresentam desequilíbrios constantes. Os ângulos das três fases encontram-se igualmente defasados entre si de 120 graus.

- *Subcaso 1.2*

Sinal semelhante ao subcaso 1.1, no entanto, a amplitude de uma fase fica constante em 220 volts e ocorre a variação simultânea das amplitudes das outras duas fases das tensões, entre 180 e 260 volts, a cada 5 volts, dando origem também a 17 sinais.

- *Subcaso 1.3*

Neste subcaso, as tensões das três fases permanecem constantes em 220 V, enquanto o ângulo de uma das fases apresenta uma variação de -5 a 5 graus, a cada grau, e os outros ângulos permanecem com seus valores nominais. Analogamente aos subcasos anteriores, a mudança do ângulo de uma das fases implica na origem de um novo sinal, sendo gerados 11 sinais com desequilíbrios constantes a cada variação de grau.

- *Subcaso 1.4*

Sinal semelhante ao subcaso 1.3, com as amplitudes das tensões das três fases iguais a 220 V, mas com ângulos de duas fases variando simultaneamente de -5 a 5 graus com base nos seus valores nominais, permanecendo o ângulo da outra fase inalterado.

2.3.2.2 Caso 2

Diferentemente do caso 1, cujos sinais apresentavam desequilíbrios constantes, os sinais aqui simulados possuem desequilíbrios aleatórios. O modelo escolhido para simular essa aleatoriedade foi a função

de probabilidade normal com média de 220 volts e desvios padrão variados. Sendo assim, o objetivo dessa etapa é comparar os métodos propostos anteriormente utilizando sinais que aproximam-se um pouco mais dos sinais reais. Além disso, este caso visa avaliar a influência do desvio padrão e da recorrência em que a mudança do módulo da tensão ocorre na quantificação do fator K.

- *Subcaso 2.1*

Quatro sinais com desequilíbrios aleatórios modelados por uma normal de média 220 volts são gerados, o desvio padrão de cada um deles é de 2,5, 5, 10 e 20 volts. A magnitude da tensão é aleatória, no entanto, a recorrência em que a mudança do módulo ocorre é fixa a cada minuto. Não há alteração dos ângulos das tensões em nenhuma das fases.

- *Subcaso 2.2*

Este subcaso assemelha-se ao anterior, já que quatro sinais são também gerados os mesmos parâmetros mencionados anteriormente. No entanto, a recorrência em que a mudança do módulo ocorre é fixa a cada janela de amostragem, isto é, a cada 200 milissegundos. Não há alteração nos ângulos das tensões de nenhuma das fases.

2.3.2.3 Caso 3

O objetivo do caso 3 é avaliar a influência da escolha do tipo de janela de amostragem na quantificação do fator K. Para tanto, serão utilizados dois sinais simulados no caso 2, os quais serão submetidos a três janelas de amostragem distintas, a saber, retangular, flat top e hamming cujas equações são dadas por 2.14, 2.15 e 2.16, respectivamente.

$$w[n] = 0, 1, \dots, N \quad (2.14)$$

$$w[n] = 0, 216 - 0, 417 \cos \frac{2\pi n}{N} + 0, 277 \cos \frac{4\pi n}{N} - 0, 084 \cos \frac{6\pi n}{N} + 0, 007 \cos \frac{8\pi n}{N} \quad (2.15)$$

$$w[n] = 0, 54 - 0, 46 \cos \frac{2\pi n}{N} \quad (2.16)$$

onde

N representa o comprimento, em amostras, da janela de tempo;

n é um inteiro, $0 \leq n \leq N$.

A figura 2.2 permite a comparação dos três tipos de janela em estudo. Observa-se dessa figura que a janela retangular possui valor igual a um sobre todo seu intervalo de tempo. Já a janela hamming apresenta uma forma similar a de uma onda cossenoidal, sendo preferencialmente utilizada quando deseja-se maior precisão na frequência, já que possui um lóbulo principal mais estreito. Por fim, a janela flat-top é aplicada quando objetiva-se uma exatidão maior na aferição da amplitude do sinal, apresentando um lóbulo principal mais achatado. A escolha da janela depende também das características do sinal analisado.

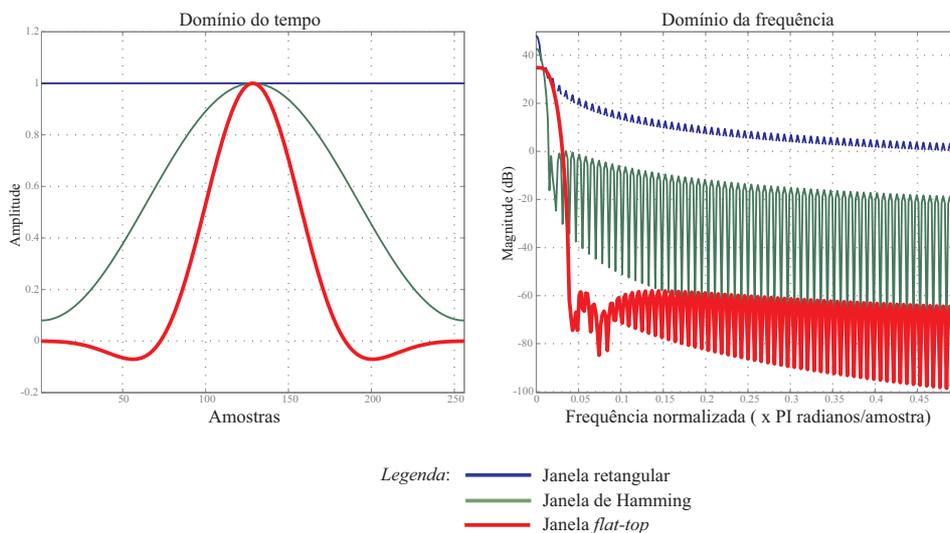


Figura 2.2: Tipos de janelas

A seguir, tem-se a descrição dos subcasos 3.1 e 3.2.

- *Subcaso 3.1*

Sinal do subcaso 2.1 que apresenta desequilíbrio aleatório modelado por uma normal de média e desvio padrão de 220 e 10 volts, respectivamente, mudando de módulo a cada minuto, será utilizado para comparar as janelas retangular, flat-top e hamming em cada um dos 9 métodos propostos.

- *Subcaso 3.2*

Sinal do subcaso 2.2 que apresenta desequilíbrio aleatório modelado por uma normal de média e desvio padrão de 220 e 5 volts, respectivamente, mudando de módulo a cada janela de amostragem, será também utilizado para comparar as janelas retangular, flat-top e hamming em cada um dos 9 métodos propostos.

2.3.2.4 Caso 4

Os sinais simulados no caso 4 apresentam diferentes tipos de afundamentos aleatórios, os quais serão modelados por uma distribuição normal. O afundamento de tensão ocorre devido a um aumento de curta duração na corrente do sistema. As causas mais comuns desse aumento são atribuídas a curtos circuitos, faltas à terra, entrada de motores de indução e energização de transformadores [1].

Neste trabalho, os afundamentos serão descritos essencialmente por cinco características principais, a saber, tipo, média, desvio padrão, duração e recorrência. O intuito desta etapa é avaliar o quanto essas características do afundamento influenciam os nove métodos propostos e a magnitude do fator K. Sendo assim, em cada um dos subcasos apresentados a seguir, um desses cinco fatores será avaliado.

- *Subcaso 4.1*

Dentre os diversos tipos de afundamentos de tensão, nesse subcaso serão estudados 3 dos mais comuns, a saber, os tipos A, B e C [1], conforme ilustra a figura 2.3.

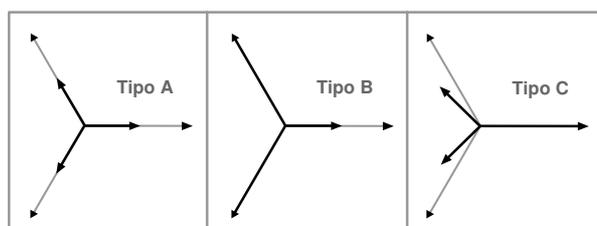


Figura 2.3: Tipos de afundamentos

O afundamento do tipo A ocorre nas 3 fases devido a uma falta trifásica ou a uma falta das três fases com o terra, reduzindo igualmente as amplitudes das ondas. Já o afundamento do tipo B ocorre devido a uma falta fase-terra, reduzindo a magnitude da tensão de apenas uma fase. Por fim, o tipo C altera tanto a magnitude da tensão de duas fases quanto os dois ângulos destas e ocorre devido à faltas entre duas fases ou também entre fase e terra [1].

Esses três tipos de afundamentos serão submetidos aos nove métodos propostos. Nesta etapa, os sinais apresentarão afundamentos de médias igual a 0,3 pu e desvio padrão de 0,1 pu, com duração de 1 segundo, repetindo-se em intervalos de 1 minuto. Em todos os subcasos a seguir, será adotado o afundamento do tipo B.

- *Subcaso 4.2*

Neste subcaso a influência da média dos afundamentos será avaliada. Para tanto, foram escolhidos sinais com afundamentos de médias iguais a 0,3 e a 0,5 pu para serem simulados. Os dois sinais possuem afundamentos com desvio padrão de 0,1 pu, duração de 1 segundo e repetem-se a cada 1 minuto. Esse afundamento ocorre em apenas uma das fases, já que daqui em diante ele é do tipo B.

- *Subcaso 4.3*

Até o momento, apenas sinais com desvio padrão de 0,1 foram tratados. No entanto, este subcaso traz a comparação entre sinais com afundamentos de média 0,3 pu e desvios-padrão ora de 0,1 pu, ora de 0,05 pu. A duração e a recorrência continuam fixas em 1 segundo e 1 minuto, respectivamente.

- *Subcaso 4.4*

Sinais com quatro durações distintas de afundamentos serão simulados, a fim de verificar a influência deste nos métodos propostos neste trabalho. Além da duração de 1 segundo já especificada nos subcasos anteriores, foram acrescentados os tempos de 12 ciclos, 3 segundos e 10 segundos a fim de abranger os afundamentos de tensão instantâneos, momentâneos e temporários, respectivamente, conforme classificação exposta na tabela 2.4, oriunda da norma IEEE 1159 (1995) [11].

Tabela 2.4: Classificação dos afundamentos segundo sua duração

Afundamentos	Duração
Instantâneo	0,5 a 30 ciclos
Momentâneo	30 ciclos a 3 segundos
Temporário	3 segundos a 1 minuto

A média e o desvio padrão dos afundamentos são constantes e iguais a 0,3 e 0,1 pu, respectivamente, e a recorrência é de 1 minuto.

- *Subcaso 4.5*

O último parâmetro a ser avaliado é a recorrência em que ocorrem os afundamentos. Além da recorrência a cada 1 minuto especificada nos subcasos anteriores, serão acrescentadas nesta etapa as de 5 minutos, 2 horas e um dia. Estes quatro sinais apresentarão afundamentos com média de 0,3 pu, desvio padrão de 0,1 pu e duração de 1 segundo.

2.3.2.5 **Caso 5**

Os dois sinais que serão simulados no caso 5 são uma composição dos sinais apresentados nos casos 3 e 4, pois possuem tanto desequilíbrios quanto afundamentos aleatórios. O objetivo dessa simulação é avaliar a influência dos afundamentos e desequilíbrios na quantificação do fator K e comparar os diferentes métodos propostos. Os afundamentos dos sinais do caso 5 são do tipo B e apresentam média de 0,3 pu, desvio padrão de 0,1 pu, duração de 1 segundo e recorrência de 1 minuto. Os sinais distinguem-se pelos desequilíbrios que apresentam e estão divididos nos dois subcasos a seguir:

- *Subcaso 5.1*

Sinal com afundamento conforme descrição anterior e desequilíbrios aleatórios de média 220 volts, desvio padrão de 5 volts e recorrência de 1 minuto acontecendo nas 3 fases do sistema.

- *Subcaso 5.2*

Sinal com afundamento conforme descrição anterior e desequilíbrios aleatórios em todas as fases com média igual a 220 volts e desvio padrão igual a 5 volts, mas variando a amplitude a cada janela de amostragem.

2.3.2.6 **Caso 6**

Além de sinais com desequilíbrios e afundamentos, serão testados também sinais com harmônicas. O objetivo é avaliar o quanto esse fenômeno influencia na magnitude do fator K e na escolha do método de quantificação do desequilíbrio.

Os nove métodos propostos anteriormente utilizam a FFT na determinação do valor da amplitude da onda de tensão, tomando apenas a frequência de 60 Hz. Essa recomendação é estabelecida tanto pelas normas nacionais quanto pelas internacionais. No entanto, alguns equipamentos de medição utilizam, ao invés da FFT, o valor *rms*. Sendo assim, faz-se necessário avaliar o impacto dessa substituição na quantificação do indicador.

O caso 6 acrescenta nove métodos equivalentes aos anteriores, nos quais o procedimento da FFT é substituído pelo cálculo do valor *rms*. Os dois subcasos a seguir descrevem os sinais de teste que serão aplicados na comparação entre as metodologias propostas.

- *Subcaso 6.1*

Sinal trifásico senoidal com harmônicas ímpares de ordem menor do que 10. As magnitudes das

harmônicas são dadas pelos seus valores limites presentes no submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede [8]. Portanto, o sinal é composto por 5% de terceira, quinta e sétima harmônicas e 3% de nona, as quais estão presentes em apenas 2 das fases. Este sinal de teste será empregado nos 9 métodos que utilizam a FFT e nos outros 9 que fazem uso do valor *rms*.

- *Subcaso 6.2*

Sinal trifásico senoidal com harmônicas ímpares de ordem menor do que 10 cujas magnitudes são dadas pelo dobro, em uma fase, e quádruplo, em outra fase, dos valores limites individuais das mesmas presentes no submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede [8]. Isto é, este sinal apresenta 10% de terceira, quinta e sétima harmônicas e 6% de nona, em uma das fases, e 20% de terceira, quinta e sétima harmônicas e 12% de nona, em outra fase. Este sinal de teste também será empregado nos métodos que fazem uso da FFT e nos outros que calculam o valor *rms* do sinal a cada janela.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou, de forma sucinta, os principais conceitos, métodos de quantificação e normas referentes a desequilíbrio de tensão. Observou-se que o método proposto pelo CIGRÉ é equivalente ao método das componentes simétricas, tendo a vantagem de facilitar o cálculo visto que utiliza apenas os módulos das tensões de linha. A fim de esclarecer a metodologia adotada pelas normas, foram realizadas as caracterizações dos sinais de tensão e dos intervalos de medição.

Com isso, as principais normas internacionais referente a desequilíbrio de tensão foram apresentadas, a saber, a IEC61000-4-30 e a EN61000-4-30, elaboradas pela IEC e pelo CENELEC, respectivamente. No entanto, devido a um acordo entre ambos os órgãos, essas normas estão padronizadas. Em seguida, um breve histórico da legislação nacional foi feito e as normas do ONS (Procedimentos de Rede) e da ANEEL (Procedimentos de Distribuição) foram descritas. Vale ressaltar que a ANEEL relata que seu protocolo de medição ainda está em fase de elaboração. Concluiu-se, por meio da comparação entre as sugestões de cada uma das entidades mencionadas, que os protocolos não são uniformizados.

Dada a atualidade do tema e a diversidade de possibilidades de procedimentos presentes nas normas, nove métodos de quantificação do fator K foram propostos. Essas propostas foram baseadas na quantidade de intervalos intermediários de agregação e no momento de cálculo do indicador. Por fim, foram apresentados seis casos de sinais de teste, os quais contemplam formas de onda com amplitudes desequilibradas, com afundamentos e harmônicas. Estes sinais serão aplicados aos nove métodos por meio simulações computacionais. Os resultados decorrentes dessas simulações estão apresentados e discutidos no Capítulo 3.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta os resultados das simulações computacionais realizadas. Neste trabalho, o *software* Matlab foi escolhido para implementar todas as simulações computacionais. Com isso, objetiva-se:

- Avaliar a influência sobre o fator K da escolha de quantos e quais intervalos de medição utilizar no protocolo;
- Verificar as implicações do cálculo do indicador em diferentes intervalos de agregação;
- Analisar a influência de sinais com desequilíbrios, afundamentos e harmônicas na quantificação do fator K;
- Verificar as consequências da escolha do tipo da janela de amostragem na quantificação do indicador;
- Averiguar as implicações da utilização da FFT e do valor *rms* na magnitude do fator K para sinais com harmônicas;

3.2 RESULTADOS E ANÁLISES

Os nove métodos propostos foram aplicados aos casos numerados de 1 a 6 e os resultados serão apresentados ordenadamente a seguir.

3.2.1 Caso 1

Os sinais contidos neste tópico apresentam desequilíbrios constantes ao longo de todo o período de observação, equivalente a sete dias de medição.

- *Subcasos 1.1 e 1.2*

O comportamento do fator K para os nove métodos propostos, considerando os subcasos 1.1 e 1.2, os quais referem-se a variações na magnitude da tensão de 1 e 2 fases, respectivamente, está ilustrado na figura 3.1.

Cada ponto da figura 3.1 representa um sinal cuja magnitude da tensão desequilibrada está indicada no eixo das abscissas e, na legenda, encontra-se o número de fases desequilibradas. Devido à invariância do módulo do fator K destes sinais perante os diferentes métodos propostos, as nove curvas referentes a cada método ficaram perfeitamente sobrepostas para os sinais com uma ou duas fases variando. Portanto, cada ponto traz a informação do índice de desequilíbrio dos nove métodos para determinado sinal.

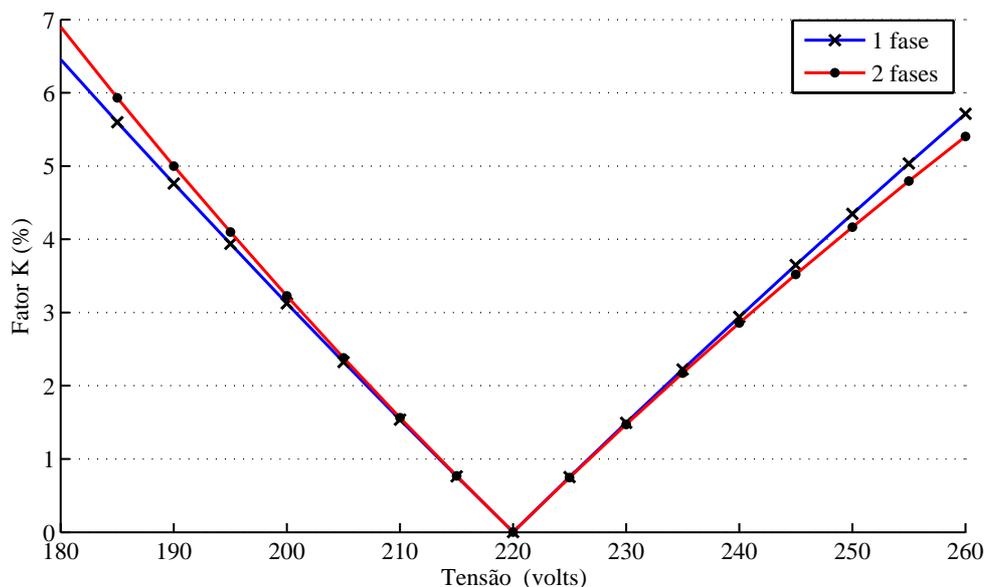


Figura 3.1: Visão bidimensional do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrio constante no módulo da tensão

Sendo assim, conclui-se da figura 3.1 que a escolha dentre as metodologias propostas não influencia a quantificação do indicador para sinais que apresentam desequilíbrios constantes em uma ou duas fases.

Além disso, nota-se que o comportamento do fator K para sinais com desequilíbrios em uma e duas fases não é simétrico em relação à referência de 220 volts. Valores maiores para o indicador são observados para tensões inferiores à equilibrada, considerando a mesma variação para tensões acima da nominal. Este fato sugere que o indicador é mais sensível a subtensões que a sobretensões. A tabela 3.1 confirma as afirmações anteriores indicando a inclinação da reta de regressão linear de cada uma das 4 curvas apresentadas na figura 3.1, referentes a desequilíbrios em uma ou duas fases e variações negativas (subtensão) ou positivas (sobretensão) em relação à tensão nominal. A unidade de medida é porcentagem do fator K por volt.

Tabela 3.1: Inclinação da reta de regressão linear do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrios constantes no módulo da tensão

Desequilíbrio	Subtensão	Sobretensão
2 fases	-0,1722 %/V	0,1350 %/V
1 fase	-0,1612 %/V	0,1428 %/V

Conclui-se da tabela 3.1 que, de fato, o módulo da inclinação da reta de regressão para o sinal com variações iguais em duas fases é 21,6% maior para subtensões do que para sobretensões e, para o sinal com apenas uma fase variando, essa superioridade é da ordem de 11,4%. Portanto, nota-se que o indicador é mais sensível a variações negativas do que a variações positivas das tensões. Uma análise aprofundada da sensibilidade do indicador de desequilíbrio de tensão pode ser encontrada em [12].

Por fim, observa-se também da figura 3.1 que, para tensões abaixo de 220 volts, o indicador é ligeira-

mente maior para desequilíbrios em 2 fases que para apenas 1 fase desequilibrada. Já para tensões acima do valor de referência ocorre o inverso. Esse fato também pode ser observado comparando-se as inclinações indicadas na tabela 3.1 para a subtensão e sobretensão, separadamente.

A figura 3.2 [13] generaliza o resultado da simulação da figura 3.1.

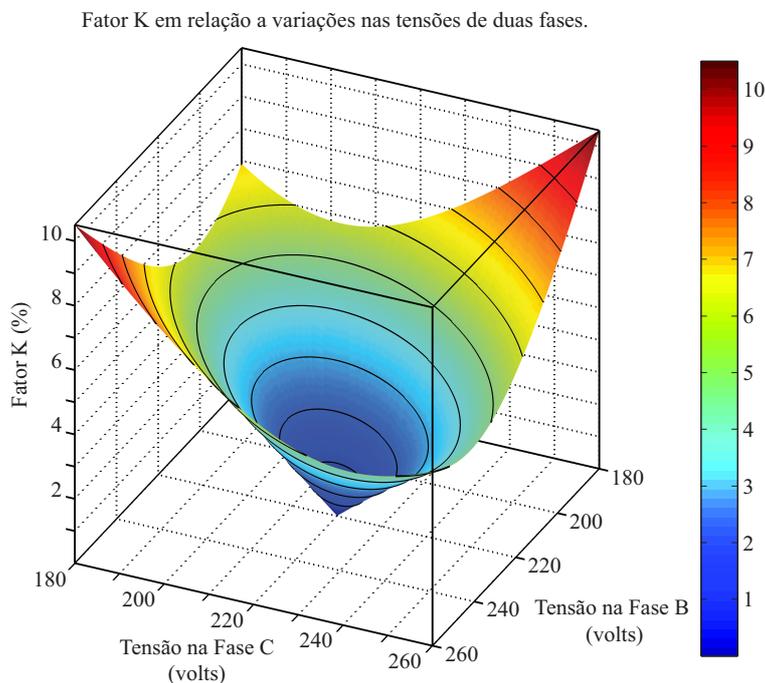


Figura 3.2: Visão tridimensional do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrio constante no módulo da tensão [13]

A visão tridimensional ilustrada na figura 3.2 apresenta o comportamento do fator K perante as variações das tensões nas fases B e C entre 180 e 260 volts. Portanto, a figura 3.1 é um caso específico deste. Sua curva referente a duas fases variando é obtida por meio de um corte no plano $V_c = V_b$ da figura 3.2. Enquanto que a curva para uma fase variando pode ser observada fazendo-se um corte no plano $V_c = 220$.

A figura 3.3 [13] apresenta as curvas de nível da figura 3.2.

Observando as curvas de nível apresentadas na figura 3.3, conclui-se que, para tensões $V_{sub} = (220 - c)$ volts, o fator K é maior do que para tensões $V_{sobre} = (220 + c)$ volts, onde c é uma constante. Esse fato confirma que o indicador é mais sensível a subtensões do que a sobretensões.

Além disso, as figuras 3.2 e 3.3 mostram que o indicador de desequilíbrio de tensão cresce mais rapidamente quando as tensões das fases B e C estão variando em sentidos opostos, isto é, quando uma está aumentando e a outra diminuindo. Observa-se que, para esta situação, o fator K atinge o patamar de 10%, enquanto que, para duas fases variando no mesmo sentido, o indicador não ultrapassa 7%. Este resultado está de acordo com o esperado, já que, intuitivamente, uma variação, no mesmo sentido, em duas fases pode ser considerada um desequilíbrio menor.

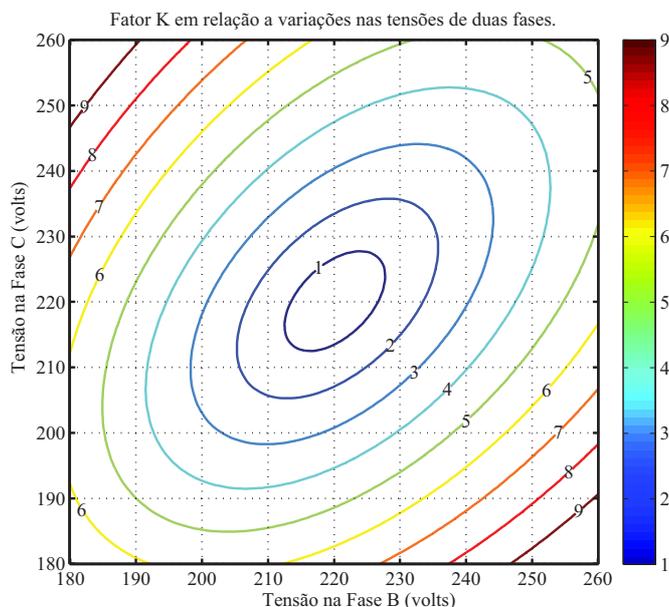


Figura 3.3: Curvas de nível do fator K para sinais com desequilíbrio constante no módulo da tensão [13]

- Subcasos 1.3 e 1.4

Este item apresenta sinais com desequilíbrios constantes nos ângulos das tensões de uma e duas fases. A influência dos nove métodos sobre o fator K e o comportamento do mesmo perante variações angulares serão os objetos de estudo. A figura 3.4 ilustra os resultados obtidos.

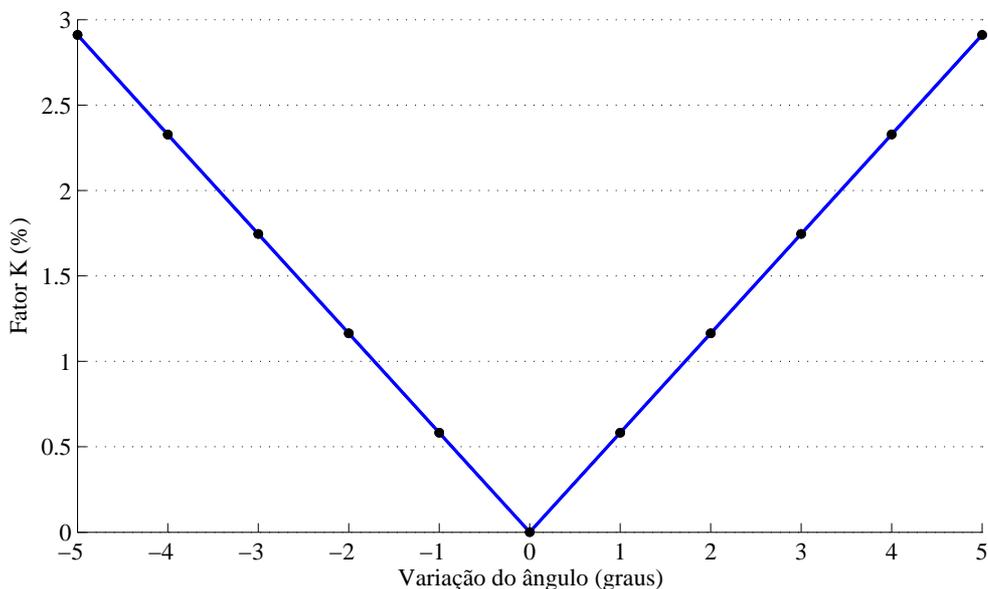


Figura 3.4: Visão bidimensional do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrio constante no ângulo da tensão

Observa-se da figura 3.4 que, novamente, os nove métodos propostos resultam no mesmo indicador de desequilíbrio de tensão. Portanto, caso os sinais reais apresentem desequilíbrios constantes em módulo ou

ângulo, não há diferença em aplicar uma metodologia ou outra para a quantificação do indicador.

Diferentemente do ocorrido para os subcasos 1.1 e 1.2, nota-se que as curvas para os sinais com variações no ângulo em 1 e 2 fases ficaram sobrepostas na figura 3.4 e, por isso, optou-se por omitir a legenda. Conclui-se, então, que o indicador é igualmente sensível a variação de ângulos em 1 ou 2 fases, quando esta ocorre na mesma proporção e no mesmo sentido. De fato, este resultado obtido é coerente. Um sinal cujos ângulos de duas fases estão variando na mesma proporção e sentido mantém as duas fases equilibradas entre si, enquanto que a terceira fase (aquela que, de fato, está com seu valor nominal de ângulo) torna-se desequilibrada em relação às outras. Portanto, para o indicador de desequilíbrio de tensão, esses dois sinais simulados apresentam apenas uma fase desequilibrada.

Adicionalmente, nota-se da figura 3.4 que há uma simetria entre variações positivas e negativas dos ângulo das tensões. A inclinação de ambas as retas, em módulo, é de 0,582 %/grau, indicando que a cada acréscimo de 1 grau na variação do ângulo há um aumento de 0,582% no módulo do fator K.

É possível comparar a sensibilidade do indicador a variações na magnitude e no ângulo da tensão. Da tabela 3.1 tem-se que o maior valor obtido, em módulo, foi de 0,1722 %/volt, enquanto que a sensibilidade para variações angulares foi de 0,582%/grau. Logo, conclui-se que o fator K apresenta-se aproximadamente 238% mais sensível, nos intervalos analisados, a mudanças nos ângulos do que nos módulos das tensões.

A generalização do resultado da simulação da figura 3.4 está ilustrado na figura 3.5 [13]. Já as curvas de nível estão apresentadas na figura 3.6 [13].

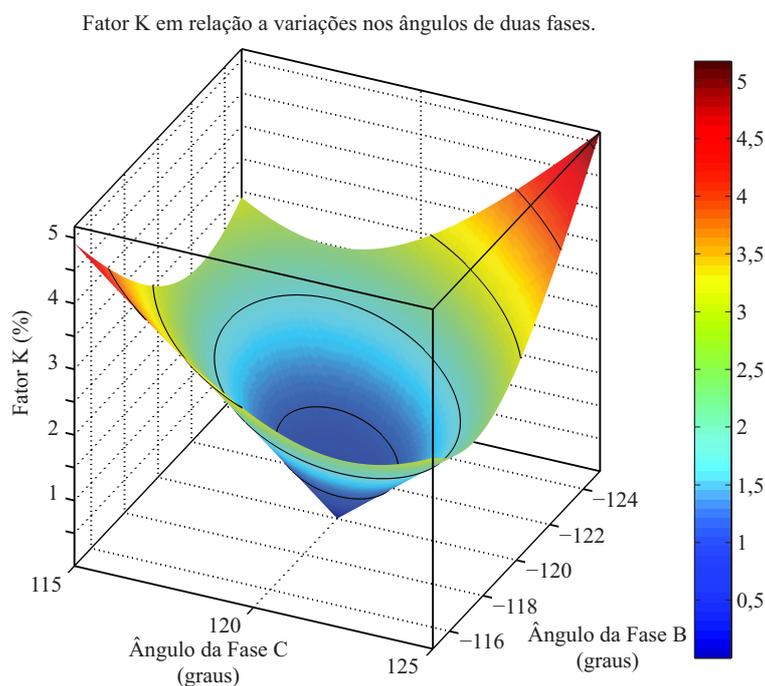


Figura 3.5: Visão tridimensional do comportamento do fator K para sinais com desequilíbrio constante no ângulo da tensão [13]

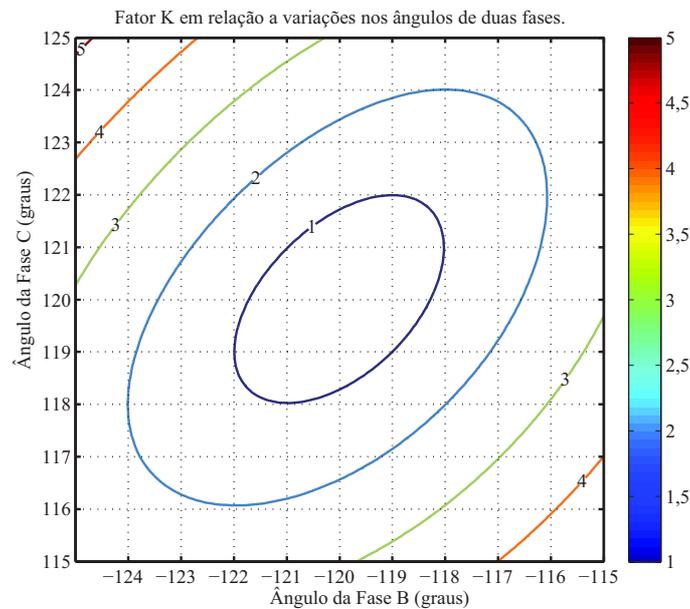


Figura 3.6: Curvas de nível do fator K para sinais com desequilíbrio constante no ângulo da tensão [13]

A visão tridimensional ilustrada na figura 3.5 apresenta o comportamento do fator K perante as variações dos ângulos das tensões das fases B e C entre -5 e +5 graus. Portanto, a figura 3.4 é um caso muito específico deste. Sua curva referente a dois ângulos variando na mesma proporção e sentido é obtida por meio de um corte no plano $\alpha_b = \alpha_c$ da figura 3.5. Enquanto que a curva para somente um ângulo variando pode ser observada fazendo-se um corte no plano $\alpha_c = 120$ ou $\alpha_b = 120$. No entanto, sabe-se que, para este caso peculiar, essas curvas são idênticas, conforme pode ser melhor observado pelo corte bidimensional da figura 3.4. Além disso, nota-se pelas elipses da figura 3.6 que, para qualquer outra combinação de variações angulares em duas fases, a equivalência de resultados não se mantém.

Observando as curvas de nível apresentadas na figura 3.6, conclui-se que o indicador de desequilíbrio de tensão é igualmente sensível a variações positivas e negativas dos ângulos das tensões.

Além disso, nota-se, das figuras 3.5 e 3.6, que o fator K aumenta mais rapidamente quando os ângulos das fases B e C estão variando na direção oposta, isto é, um aumentando e o outro diminuindo, e vice-versa. Comportamento semelhante foi observado na análise das variações nas tensões de duas fases (figuras 3.2 e 3.3).

É importante ressaltar que as figuras de 3.2 a 3.6 são válidas para todos os nove métodos de quantificação do desequilíbrio de tensão propostos, visto que os sinais em questão apresentam desequilíbrios constantes.

3.2.2 Caso 2

Os sinais simulados nessa etapa apresentam desequilíbrios aleatórios, assemelhando-se um pouco mais ao comportamento das formas de onda da tensão na rede elétrica.

Conforme apresentado na seção 2.2.4, uma campanha de medição tem duração de 7 dias. No entanto, nas simulações computacionais, observou-se que, considerando cada método separadamente, havia

pouca alteração nos indicadores de um dia para outro. Esse fato ocorreu, possivelmente, devido ao modelo aleatório escolhido para modelagem dos sinais e ao grande número de amostras presentes em 1 dia. Considerando também que o tempo dispendido durante a simulação de uma campanha completa era excessivo, decidiu-se simular apenas 1 dos 7 dias. Portanto, as comparações entre os métodos foram feitas em termos do indicador diário (K95%) ao invés do semanal (Kmax). Os resultados para os subcasos 2.1 e 2.2 estão descritos a seguir.

- *Subcaso 2.1*

A figura 3.7 ilustra o módulo do fator K para as metodologias propostas na seção 2.3.1, considerando quatro sinais com desequilíbrios aleatórios cuja amplitude é alterada a cada minuto. Esses sinais foram modelados por uma distribuição normal com média de 220 volts e desvios padrão de 2,5, 5, 10 e 20 volts.

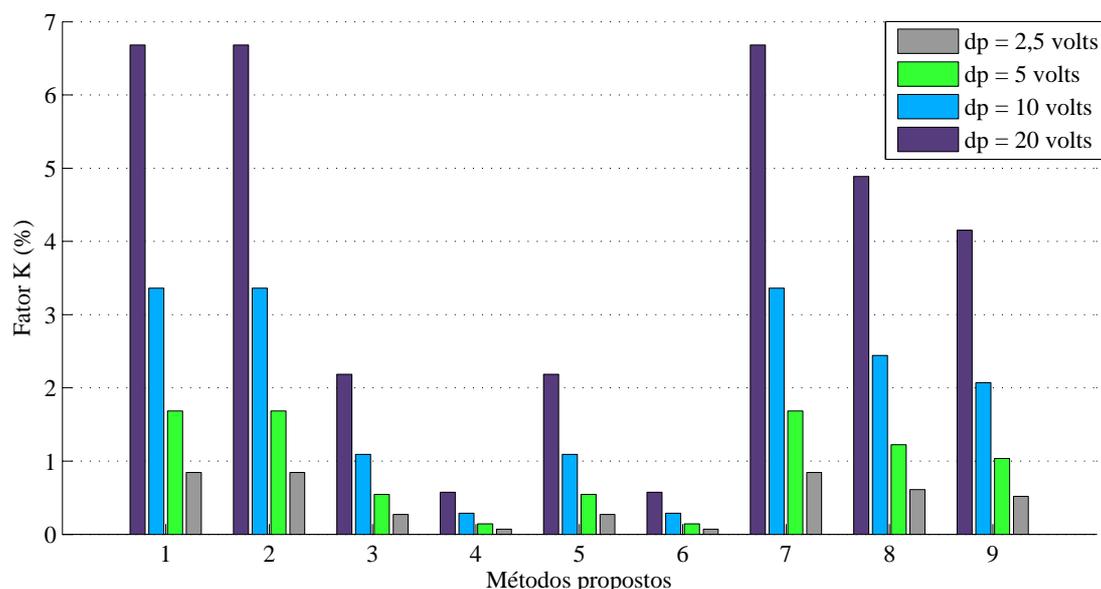


Figura 3.7: Fator K para sinais com desequilíbrio aleatório a cada minuto

Observa-se da figura 3.7 que, considerando cada sinal separadamente, os métodos 1, 2 e 7 fornecem o mesmo módulo para o indicador, sendo sempre o maior valor dentre os observados. Os métodos 3 e 5, assim como o 4 e o 6, geram também magnitudes iguais para o fator K, sendo menores do que a metade das fornecidas pelas outras metodologias.

Portanto, conclui-se que a escolha do protocolo de medição é determinante na quantificação do indicador para sinais com desequilíbrios aleatórios. Nota-se que os métodos que calculam o K95% a partir de diversos valores *rms* tomados em intervalos pequenos, isto é, por meio das 432000 janelas (M1) ou dos 28800 agrupamentos de 3 segundos (M2 e M7), geram valores maiores para o índice do que os outros, que o calculam a partir de 144 ou 12 valores *rms* de cada 10 minutos (M3, M5 e M8) ou 2 horas (M4, M6 e M9), respectivamente. Isso ocorre pois o cálculo da média em intervalos longos condensa mais a informação, fazendo com que números discrepantes sejam amenizados.

Comparando, na figura 3.7, os quatro sinais entre si, nota-se também que há uma relação entre o desvio padrão e o fator K. Isso pois, para cada método, ao reduzir o desvio padrão pela metade, o indicador também parece ser reduzido na mesma proporção. Na figura 3.8 são apresentadas as retas de regressão

linear do fator K em função do desvio padrão do sinal para cada um dos métodos propostos, o que reafirma a hipótese da proporcionalidade entre o fator K e o desvio padrão. Os pontos ressaltados correspondem aos obtidos na simulação computacional e foram a base para a elaboração do modelo.

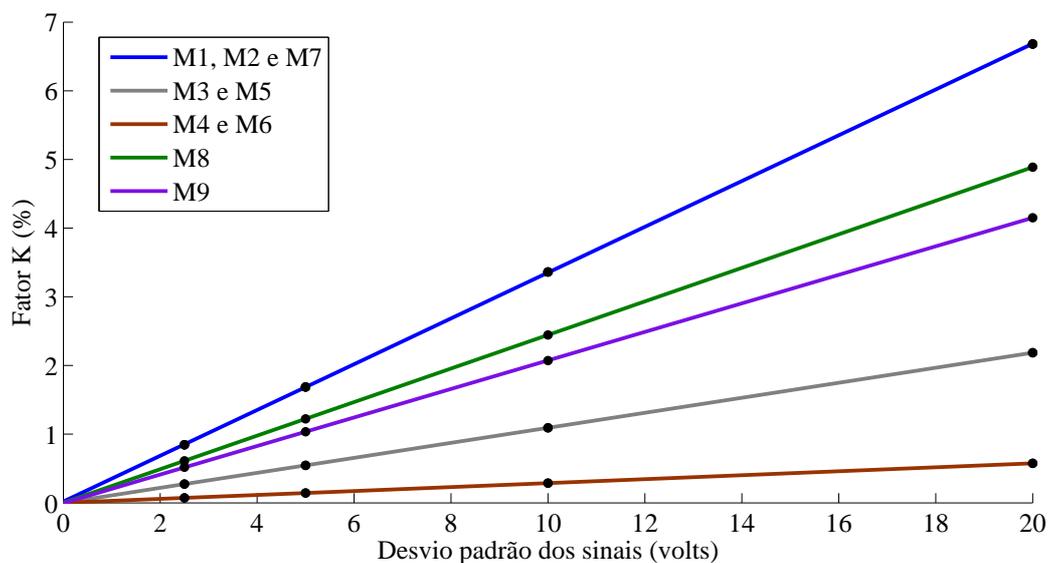


Figura 3.8: Retas de regressão linear para sinais com desequilíbrios aleatórios a cada minuto

Observa-se da figura 3.8 que as retas de regressão linear passam pelos pontos dos 4 sinais de teste simulados. Além disso, nota-se que suas inclinações são função do método escolhido para quantificação do indicador. A tabela 3.2 sintetiza as informações sobre o modelo linear ($y = \alpha \cdot x + \beta$) construído para cada um dos métodos.

Tabela 3.2: Coeficientes da regressão linear para o sinal desequilibrado a cada minuto

Métodos Propostos	Coeficiente Angular (α)	Coeficiente Linear (β)	Coef. de Correlação Linear de Pearson (ρ)
M1	0,33335849	0,0185876522	0,9999959
M2	0,33335849	0,0185876522	0,9999959
M3	0,10928698	-0,0007019130	1,0000000
M4	0,02873837	0,0003678261	0,9999996
M5	0,10928698	-0,0007019130	1,0000000
M6	0,02873837	0,0003678261	0,9999996
M7	0,33335849	0,0185876522	0,9999959
M8	0,24439619	0,0001497391	1,0000000
M9	0,20767810	-0,0034834783	0,9999994

O coeficiente de correlação linear de Pearson utilizado é uma medida da dependência linear de duas variáveis aleatórias quantitativas. Seu cálculo é feito segundo a equação 3.1.

$$\rho_{x,y} = \frac{\sum_i x_i \cdot y_i - n \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sum_i x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2} \quad (3.1)$$

onde

\bar{x} e \bar{y} são as esperanças matemáticas das variáveis x e y observadas que, neste caso, equivalem ao desvio padrão e ao fator K , respectivamente.

A tabela 3.2 indica que o coeficiente de correlação linear de Pearson é aproximadamente 1 para todos os métodos propostos. Portanto, esse estudo com dados simulados sugere que o fator K é determinado pelo desvio padrão através de uma relação linear, cujos parâmetros do modelo, para cada método, são dados pelos coeficientes linear e angular da reta de regressão indicados na tabela 3.2. Estatisticamente, espera-se que, para um tamanho de amostra tendendo a infinito, o coeficiente de correlação linear se iguale a 1, já que elimina-se a interferência das particularidades amostrais.

Nota-se da tabela 3.2, e também da figura 3.8, que os coeficientes lineares das retas são aproximadamente zero. Esse fato está de acordo com o esperado, pois um sinal com média de 220 volts e cujo desvio padrão é nulo, de fato, não apresenta desequilíbrio.

Os coeficientes angulares apresentados na tabela 3.2 podem ser interpretados como uma medida da sensibilidade do indicador ao desvio padrão do sinal para cada um dos métodos. Portanto, comparando-se esses valores, é possível concluir que os métodos 1, 2 e 7 são os mais sensíveis a esse desvio, enquanto que o 4 e o 6 são os menos afetados por este parâmetro.

Utilizando os dados da tabela 3.2 temos que, para um sinal desequilibrado aleatoriamente a cada minuto e modelado por uma normal com média de 220 volts e desvio padrão de, por exemplo, 14,5 volts, os métodos 1, 2 e 7 fornecem $K = 0,33335849 \times 14,5 + 0,0185876522 \approx 4,85\%$. Portanto, de posse do modelo, não é mais necessário simular o sinal para conhecer o valor do seu indicador.

- Subcaso 2.2

O sinal desequilibrado aleatoriamente cuja amplitude varia a cada janela de amostragem foi submetido ao tratamento proposto anteriormente, com o intuito de verificar se as conclusões obtidas permanecem válidas. A figura 3.9 mostra o comportamento do indicador para os sinais de desvios padrão 20, 10, 5 e 2,5 volts.

Diferentemente do ocorrido para o subcaso 2.1, a figura 3.9 indica que os métodos 1, 2 e 7 não resultaram no mesmo fator K para o subcaso 2.2. Isso ocorreu devido a alteração da natureza do sinal. Anteriormente, o sinal mudava de amplitude a cada minuto apenas, fazendo com que não houvesse diferença na aplicação dos métodos 1, 2 e 7, já que estes calculavam o $K_{95\%}$ a partir das janelas de amostragem (M1) ou dos agrupamentos de 3 segundos (M2 e M7) e, durante esses intervalos, não havia alteração na amplitude do sinal. Já para o sinal do subcaso 2.2, a mudança na amplitude da tensão ocorre a cada janela. Portanto, há diferença na aplicação dos métodos.

Além disso, nota-se que a etapa na qual é calculado o fator K foi essencial para sua quantificação. Os métodos que o calculam apenas no último intervalo intermediário de agregação (M2 a M6) produziram indicadores menores do que a metade dos fornecidos por aqueles que o fazem a cada janela (M7 a M9).

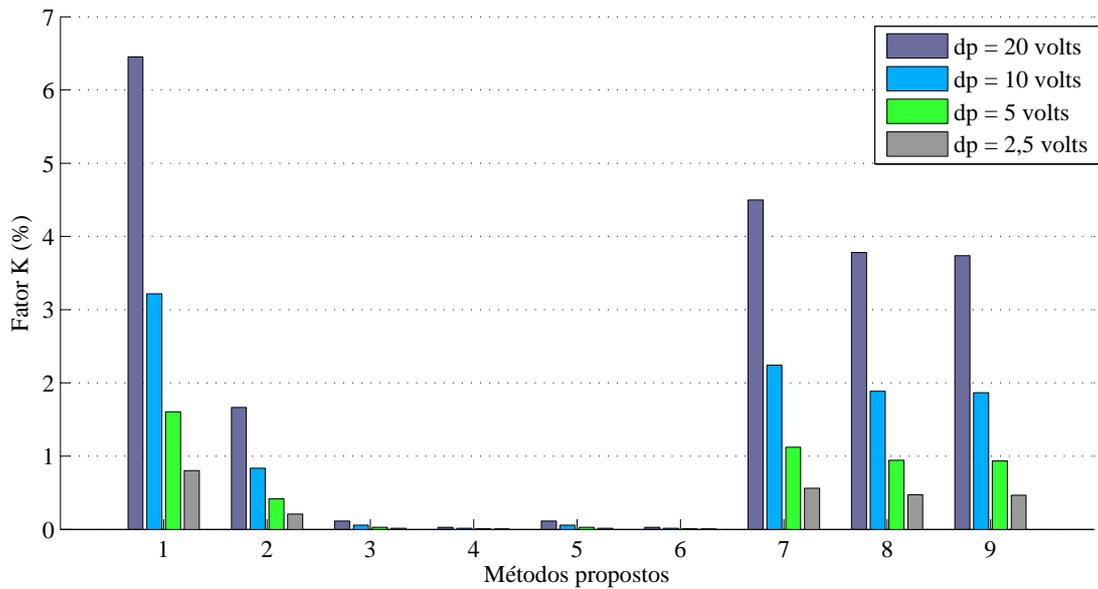


Figura 3.9: Fator K para sinais com desequilíbrio aleatório a cada janela

Verifica-se também da figura 3.9 que a hipótese da proporcionalidade do indicador em relação ao desvio padrão do modelo normal adotado para as amplitudes da senóide parece permanecer válida. Para testar essa afirmação, a figura 3.10 ilustra as retas de regressão linear para os sinais com desequilíbrios aleatórios a cada janela.

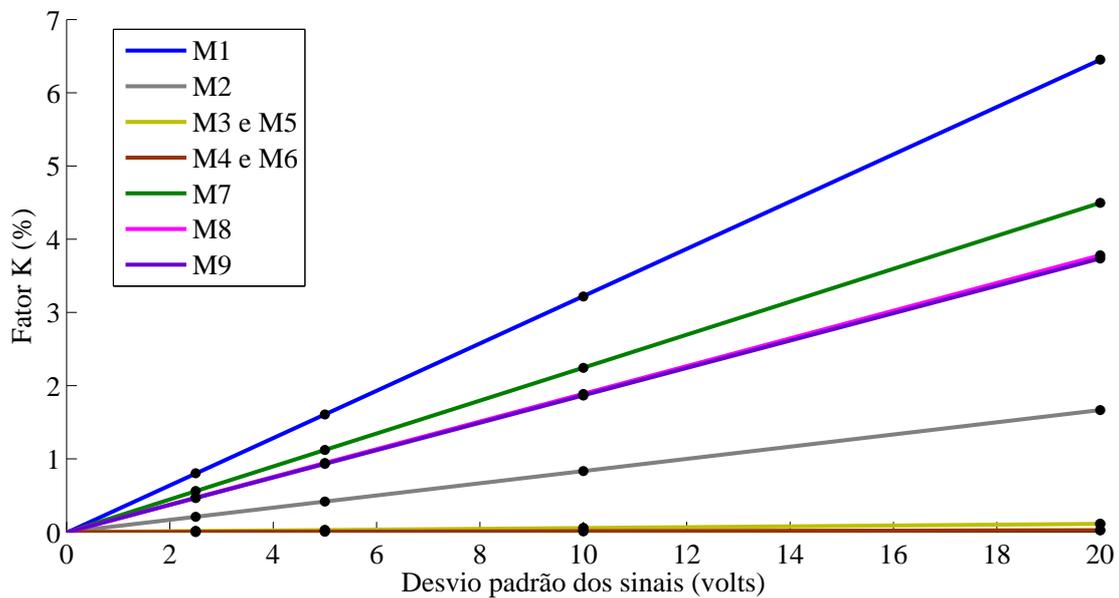


Figura 3.10: Retas de regressão linear para sinais com desequilíbrios aleatórios a cada janela

Nota-se da figura 3.10 que as retas de regressão linear também passam pelos pontos dos quatro sinais de teste simulados e suas inclinações são função do método escolhido para quantificação do indicador. Observa-se também que, para os métodos 3, 4, 5 e 6, as retas são quase horizontais, visto que o indicador é praticamente nulo para todos os sinais, independente do desvio padrão apresentado. A tabela 3.3 sintetiza

as informações do modelo linear construído para cada um dos métodos.

Tabela 3.3: Coeficientes da regressão linear para o sinal desequilibrado a cada janela

Métodos Propostos	Coeficiente Angular (α)	Coeficiente Linear (β)	Coef. de Correlação Linear de Pearson (ρ)
M1	0,322879652	-0,006751739	0,9999991
M2	0,083260835	0,000662174	0,9999996
M3	0,005674470	-0,0000256522	1,0000000
M4	0,001328661	0,0002113043	0,9999606
M5	0,005674470	-0,0000256522	1,0000000
M6	0,001328661	0,0002113043	0,9999606
M7	0,224911096	-0,002926522	0,9999993
M8	0,189150748	-0,002618261	0,9999995
M9	0,186884661	-0,001948696	0,9999997

Segundo a tabela 3.3, o coeficiente de correlação linear de Pearson continua praticamente igual a 1 em todos os métodos propostos. Além disso, essa tabela indica que os coeficientes lineares das retas são aproximadamente zero. E, por fim, comparando-se os coeficientes angulares, pode-se verificar que os métodos 1, 2 e 7 são, de fato, distintos, sendo o M1 o mais sensível ao desvio padrão e os métodos M3 a M6 os menos sensíveis a este parâmetro.

A partir dessas informações, conclui-se que, para um sinal modelado por uma distribuição normal, dado seu desvio padrão e a recorrência da aleatoriedade, é possível concluir o valor do fator K a partir de formulações analíticas.

Da tabela 3.3 é possível notar também que os métodos M3 e M5 permanecem idênticos, assim como o M4 e M6. De fato, demonstra-se que esses dois pares são equivalentes. É indiferente para a mensuração do indicador a quantidade de intervalos intermediários utilizados antes de calcular o K95%. Apenas a última agregação realizada é relevante, visto que fazer um agrupamento de tamanho m e depois outro de tamanho n é equivalente a agrupar uma única vez $m \times n$. Essa demonstração encontra-se no Anexo B.

Portanto, a partir dos resultados apresentados no Anexo B, conclui-se que a presença do intervalo de 3 segundos no método 5 não interfere no valor final do fator K. Sendo assim, os métodos 3 e 5 são iguais, independente do sinal de entrada. O mesmo vale para o M6, cujos intervalos de 3 segundos e de 10 minutos são indiferentes para a quantificação do indicador, fazendo com que seja idêntico ao M4.

Esta é a justificativa para a não correspondência de M3 e de M4 do segundo grupo (M2 a M6) no terceiro grupo (M7 a M9), conforme a classificação estabelecida na subseção 2.3.1. A ausência mencionada foi observada no último parágrafo daquela subseção e está fundamentada na redundância desses procedimentos.

É importante ressaltar que a indiferença dos intervalos mencionados na quantificação do valor final do indicador não é motivo para excluí-los do protocolo de medição de desequilíbrio de tensão. Conforme mencionado na subseção 2.2.3, os mesmos são importantes para reduzir o banco de dados e otimizar a ocupação de memória. Portanto, nos resultados descritos a seguir, as metodologias M3 e M4 serão omitidas,

permanecendo os métodos M5 e M6, visto que são mais eficientes do ponto de vista de armazenamento de dados.

3.2.3 Caso 3

A janela de amostragem utilizada para simular os sinais nos casos anteriores foi a retangular. No caso em questão, as janelas flat-top e hamming também serão objetos de estudo, a fim de avaliar a influência desta escolha na quantificação do indicador. Os subcasos 3.1 e 3.2 apresentam dois sinais de teste correspondente aos subcasos 2.1 e 2.2, respectivamente.

- Subcaso 3.1

A figura 3.11 compara o módulo do fator K para o sinal desequilibrado a cada minuto com desvio padrão de 5 volts aplicado à três tipos diferentes de janelas (retangular, flat-top e hamming).

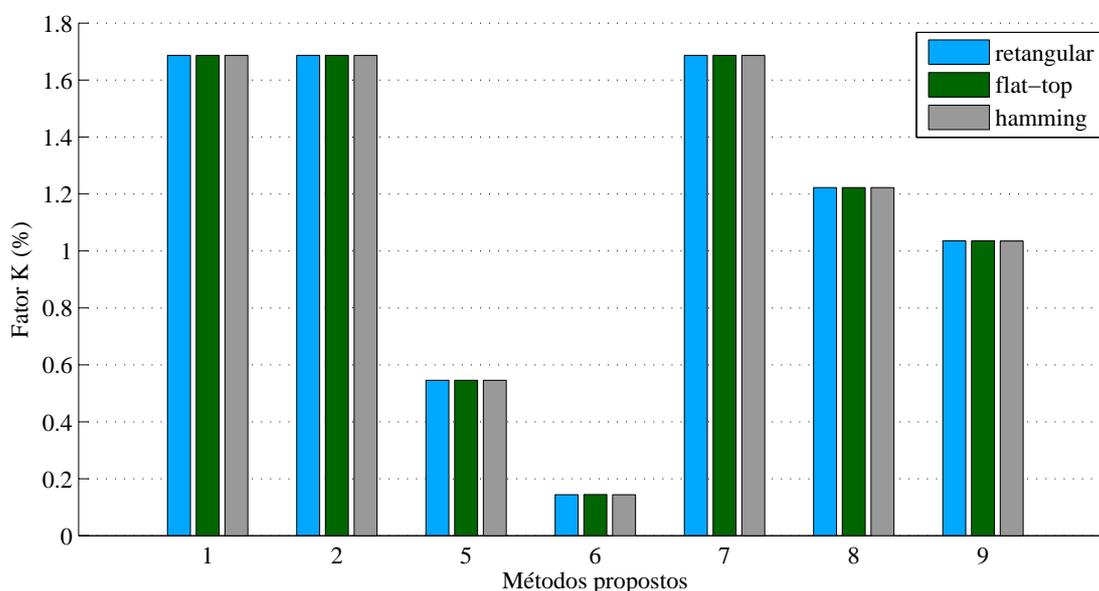


Figura 3.11: Fator K para o sinal com desequilíbrio aleatório a cada minuto e $\text{dp} = 5$ volts submetido a diferentes tipos de janelas de amostragem

Da figura 3.11 pode-se concluir que a escolha entre as opções retangular, flat-top ou hamming não acarreta consequências aparentes para a mensuração do indicador, visto que, considerando cada método individualmente, os valores obtidos com janelas distintas são idênticos.

- Subcaso 3.2

A fim de reafirmar o resultado obtido no subcaso 3.1, outro sinal de teste com desequilíbrio aleatório foi escolhido, desta vez com mudança de amplitude a cada janela e desvio padrão de 10 volts. A figura 3.12 ilustra os resultados obtidos.

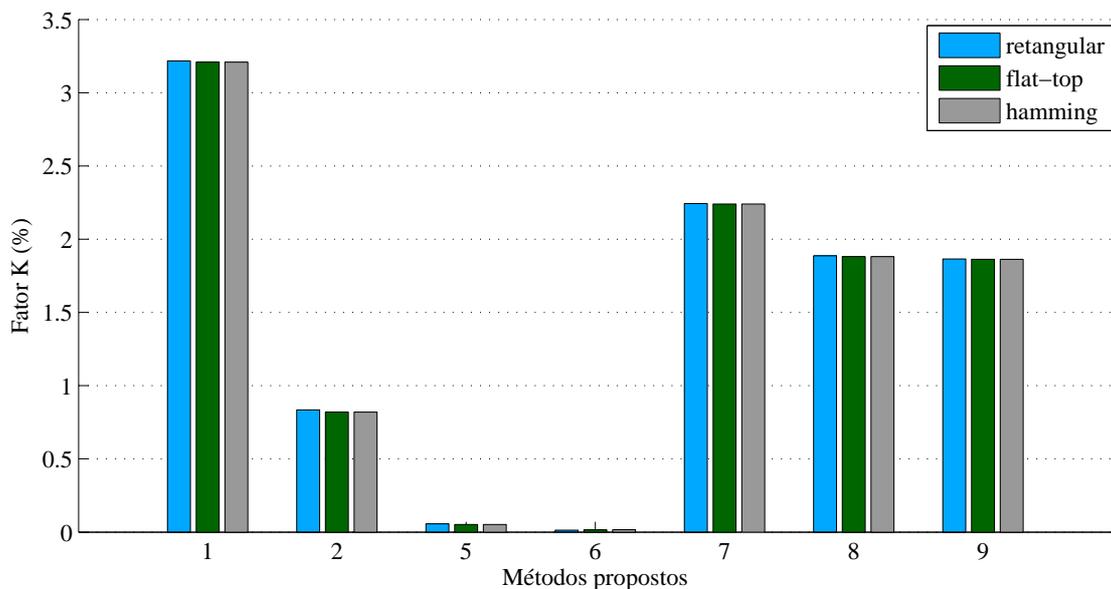


Figura 3.12: Fator K para o sinal com desequilíbrio aleatório a cada janela e $dp=10$ volts submetido a diferentes tipos de janelas de amostragem

Observa-se da figura 3.12 que, novamente, a escolha da janela de amostragem não interferiu, de forma significativa, na quantificação do fator K. Portanto, conclui-se que, para sinais desequilibrados modelados por uma distribuição normal com média de 220 volts, a aplicação das janelas retangular, flat-top ou hamming parece não interferir no módulo do indicador de desequilíbrio de tensão.

3.2.4 Caso 4

Os sinais simulados nesta etapa apresentam diversos afundamentos aleatórios, caracterizados por cinco parâmetros de interesse, a saber, tipo, média, desvio padrão, duração e recorrência. Os resultados da influência de cada um desses parâmetros na quantificação do fator K e na escolha dos diferentes métodos propostos estão descritos nos subcasos numerados de 4.1 a 4.5 apresentados a seguir.

- Subcaso 4.1

A figura 3.13 resume graficamente o comportamento do fator K para sinais com três tipos de afundamento (A, B e C), de acordo com os métodos propostos.

Observa-se na figura 3.13 que o afundamento do tipo A, o qual ocorre devido a uma falta trifásica e reduz igualmente a amplitude das três fases, não afeta o indicador de desequilíbrio de tensão. Essa confirmação era esperada, já que este indicador afere o quão desequilibradas entre si as fases estão. No entanto, como a tensão das três fases são reduzidas na mesma proporção, para o fator K não há desequilíbrio.

A figura 3.13 ilustra também que o afundamento que causa maior influência na quantificação do fator K é o do tipo B, no qual ocorre a redução da amplitude de apenas uma das fases devido a uma falta fase-terra.

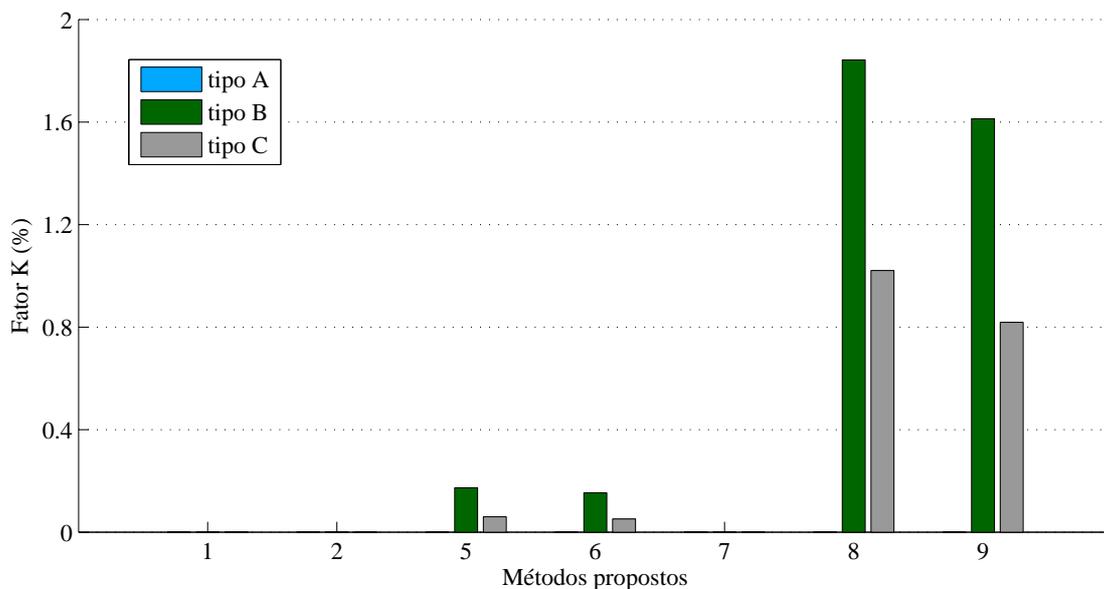


Figura 3.13: Fator K para sinais com diferentes tipos de afundamentos

Analisando a influência da escolha dos diferentes métodos, nota-se também da figura 3.13 que, para os métodos 1, 2 e 7, o indicador é zero independente do tipo do afundamento, enquanto que para os métodos 8 e 9 ele atinge valores entre 0,8 e 2 %. Portanto, novamente, a escolha do último intervalo de agregação e da etapa de cálculo do fator K são fatores determinantes para sua mensuração.

Outro fato importante de ressaltar é a influência das características dos sinais em cada um dos métodos propostos. No Caso 2 (figuras 3.7 e 3.9), cujos sinais apresentavam desequilíbrios aleatórios, os métodos que resultaram em maiores valores para o indicador foram exatamente aqueles que forneceram o menor valor para o mesmo quando da aplicação do sinal com afundamentos de tensão (figura 3.13), a saber, as metodologias 1, 2 e 7.

A explicação desse acontecimento está fundamentada nas propriedades dos dois fenômenos. Enquanto o afundamento ocorre esporadicamente e possui curta duração, o desequilíbrio acontece aleatoriamente o tempo todo. Sendo assim, o afundamento aplicado, com duração de 1 segundo a cada minuto, deixa o sinal desequilibrado apenas em 1,67% do tempo total. Conseqüentemente, os métodos 1, 2 e 7, que condensam pouco a informação em valores *rms* antes de calcular o K95%, não são afetados por esse desequilíbrio. Já para o sinal com desequilíbrio aleatório, a lógica é inversa. Havendo desequilíbrio praticamente o tempo todo, o condensamento da informação em valores *rms* mitiga possíveis valores discrepantes, fazendo com que os métodos 1, 2 e 7, que pouco resumem a informação, resultem em indicadores de maior magnitude.

Portanto, o comportamento do indicador em relação aos métodos depende das características do sinal de tensão, não havendo um padrão pré-determinado, o que enfatiza a importância da escolha adequada do protocolo de medição.

Nos subcasos a seguir, os afundamentos simulados serão do tipo B, isto é, causados por uma falta fase-terra.

- Subcaso 4.2

A figura 3.14 traz uma comparação da segunda variável de interesse, a média. Os dois sinais simulados apresentam afundamentos com médias de 0,5 e 0,3 pu, desvio padrão de 0,1 pu, duração de 1 segundo e recorrência de 1 minuto.

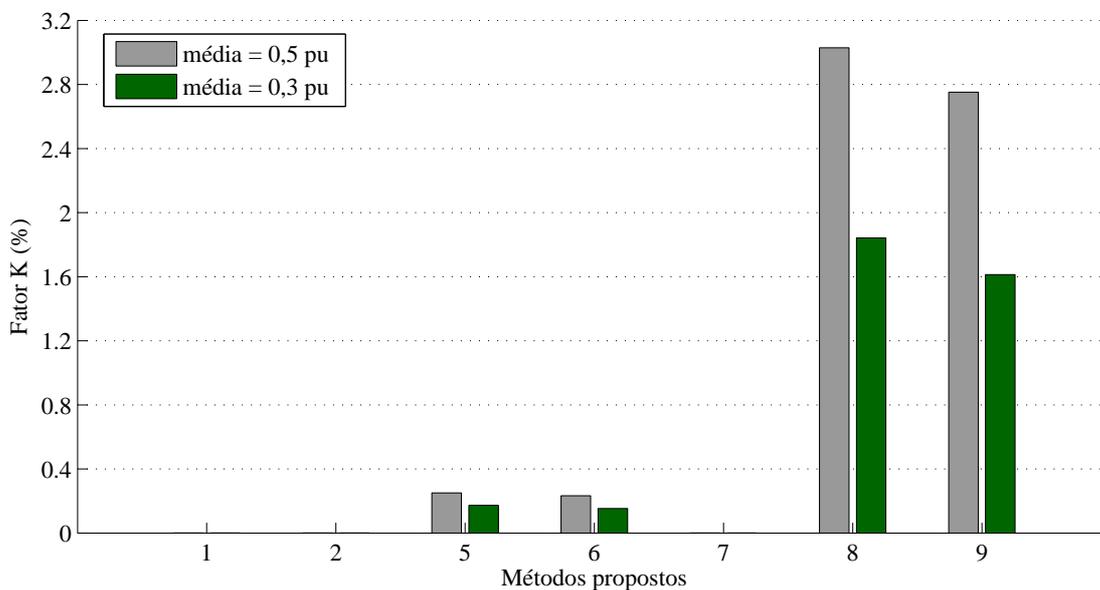


Figura 3.14: Fator K para sinais com afundamentos de médias distintas

A partir da figura 3.14 nota-se que, assim como ocorreu no subcaso 4.1, os métodos 1, 2 e 7 resultam um fator K nulo, enquanto que os métodos 8 e 9, caracterizados por resumir mais a informação e calcular o fator K a cada janela, implicam no maior valor desse indicador.

Vale ressaltar que o sinal de média 0,3 da figura 3.14 é o mesmo sinal que foi chamado de tipo B na figura 3.13. Porém, no subcaso 4.1 o interesse era na comparação de tipos diferentes de afundamentos, enquanto que nesse subcaso a comparação é feita com base nas médias. Esse mesmo sinal também estará presentes nos próximos subcasos, nos quais o desvio padrão, a duração e a frequência serão as variáveis de interesse.

Observa-se da figura 3.14 que, quanto maior a média do afundamento, maior é o indicador de desequilíbrio de tensão. No entanto, essa relação não é diretamente proporcional e nem exatamente a mesma para todos os métodos. A tabela 3.4 indica a proporção de aumento no fator K para um acréscimo na média de 0,3 para 0,5 pu (equivalente a 66,7%).

Tabela 3.4: Aumento do fator K para um acréscimo de 66,7% na média dos afundamentos

Método	1	2	5	6	7	8	9
Aumento (%)	0	0	45,2	52,8	0	64,5	70,7

Conclui-se da tabela 3.4 que um aumento de 66,7% na média dos afundamentos ocasionou um acréscimo no indicador de 45,2% a 70,7% dependendo do método escolhido, desconsiderando os valores nulos.

- Subcaso 4.3

Este subcaso analisa a influência do desvio padrão do afundamento de tensão na quantificação do fator K e na escolha dos métodos propostos. Os sinais apresentam afundamentos do tipo B, com média de 0,3 pu, duração de 1 segundo e recorrência de 1 minuto, com desvios padrão de 0,1 e 0,05 pu. A figura 3.15 ilustra os resultados obtidos.

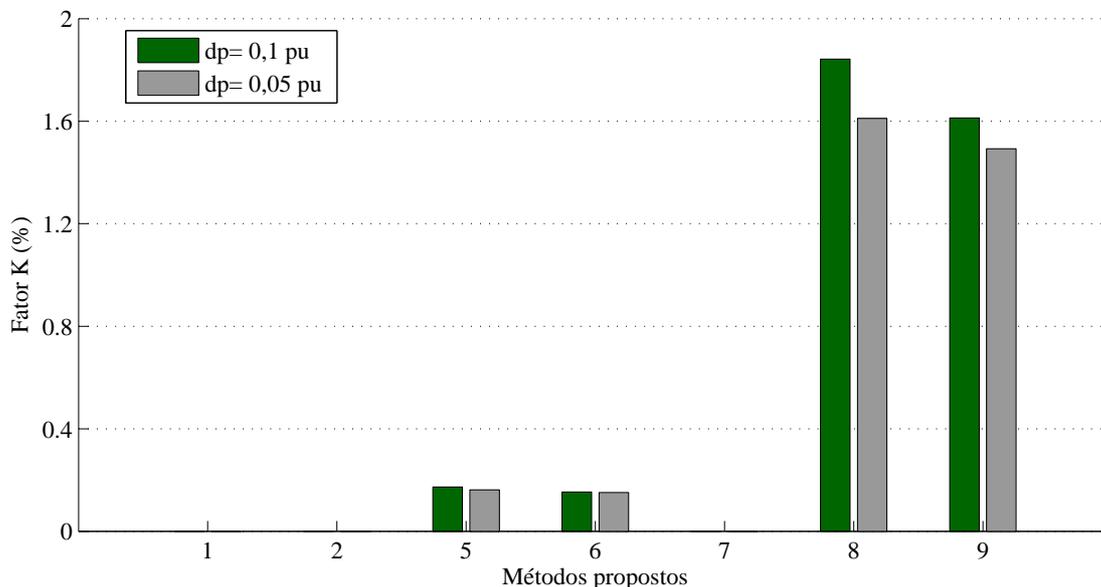


Figura 3.15: Fator K para sinais com afundamentos de desvios padrão distintos

Observa-se da figura 3.15 que o comportamento do indicador perante os métodos é semelhante ao já apresentado nos subcasos 4.1 e 4.2, isto é, valores nulos para os indicadores dos métodos 1, 2 e 7, e maiores para os das metodologias 8 e 9, independente do desvio padrão escolhido.

Além disso, a partir da figura 3.15 nota-se também que, quanto menor o desvio padrão do afundamento de tensão, menor é o valor do indicador de desequilíbrio. Esse acontecimento era esperado pois uma variação menor em torno da média faz com que valores discrepantes de afundamentos sejam menos frequentes. Porém, observa-se que essa relação de proporcionalidade também não é direta e nem a mesma para todos os métodos. A tabela 3.5 indica o quanto o fator K diminuiu em cada um dos métodos para essa redução do desvio padrão de 0,1 para 0,05 pu, que é equivalente a 50%.

Tabela 3.5: Redução do fator K para um decréscimo de 50% no desvio padrão dos afundamentos

Método	1	2	5	6	7	8	9
Redução (%)	0	0	6,2	1,5	0	12,5	7,5

Conclui-se da tabela 3.5 que uma redução de 50% no desvio padrão dos afundamentos ocasionou um decréscimo no indicador de 1,5% a 12,5%, dependendo do método escolhido e desconsiderando também os valores nulos. Logo, a relação linear observada no Caso 2 entre o indicador e o desvio padrão de sinais desequilibrados aleatoriamente não é mantida para os desvios padrão de sinais com afundamentos de tensão. Além disso, percebe-se que o fator K foi mais sensível à variações na média dos afundamentos

que à variações em seu desvio padrão, já que a proporcionalidade manteve-se mais semelhante no subcaso 4.2.

- Subcaso 4.4

O próximo parâmetro de interesse é a duração dos afundamentos. As simulações realizadas até aqui consideram uma duração de 1 segundo. Este subcaso acrescenta as de 12 ciclos, 3 e 10 segundos a fim de analisar suas influências sobre o comportamento do fator K mediante os métodos propostos. Na figura 3.16 os resultados obtidos estão ilustrados.

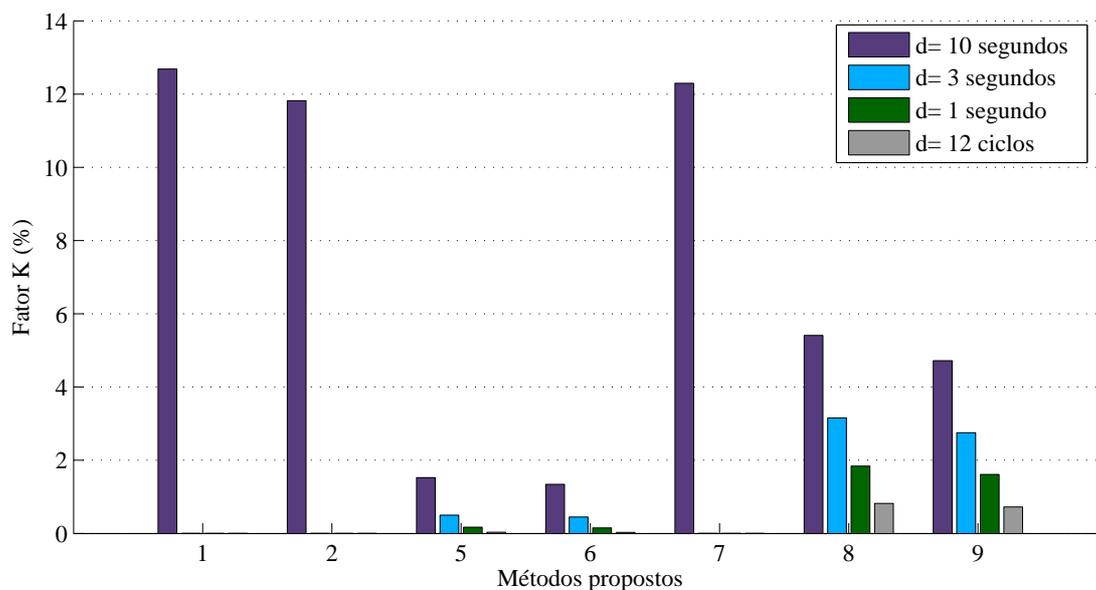


Figura 3.16: Fator K para sinais com afundamentos de durações distintas

A figura 3.16 apresenta um comportamento diferente dos observados nos subcasos anteriores para o fator K. Os métodos 1, 2 e 7 que antes apresentavam um indicador nulo, indicam um valor da ordem de 12% para o fator K do sinal cujos afundamentos duram 10 segundos, sendo classificado como temporário, segundo a tabela 2.4. Para os sinais com afundamentos instantâneos e momentâneos, esses métodos continuam retornando zero. A explicação para esse acontecimento é semelhante a outrora apresentada: o sinal que possui afundamentos de 10 segundos a cada minuto, está desequilibrado em 16,7% do tempo, logo, os métodos que menos mitigam a informação (M1, M2 e M7) antes de calcular o K95% não só notam o desequilíbrio, pois ele supera 5% do tempo total, como retornam o maior valor, já que não condensam os dados.

No entanto, é importante ressaltar que os afundamentos podem durar até 10 segundos, mas usualmente afundamentos desta duração não acontecem muito recorrentemente (da ordem de minutos). Por este motivo, não geram impactos tão significativos na quantificação do fator K. Sendo assim, o subcaso 4.5 avaliará a influência de afundamentos com recorrências mais esporádicas no indicador e nos métodos propostos.

Além disso, nota-se, também da figura 3.16, que há uma proporcionalidade entre a duração do afundamento e a magnitude do indicador. A fim de avaliá-la, a tabela 3.6 apresenta o número de vezes em que aumentou-se a duração do afundamento, considerando a duração de 12 ciclos (0,2 segundo) como

referência, e o número de vezes em que o fator K foi multiplicado, para cada um dos sinais e dos métodos propostos. Os métodos M1, M2 e M7 não estão indicados visto que fornecem quase sempre um fator K nulo.

Tabela 3.6: Proporcionalidade entre duração do afundamento e o fator K

Aumento (nº de vezes)	Duração do sinal	Fator K M5	Fator K M6	Fator K M8	Fator K M9
0,2 segundo	referência	referência	referência	referência	referência
1 segundo	5	4,97	4,91	2,25	2,22
3 segundos	15	14,45	14,34	3,85	3,79
10 segundos	50	43,9	42,84	6,60	6,50

Observa-se da tabela 3.6 que há uma relação quase direta entre a duração do afundamento e o fator K para os métodos 5 e 6. Já para o M8 e o M9, essa proporcionalidade não é mais direta, pois há um aumento mais sutil no indicador, se comparado ao aumento na duração do sinal.

- Subcaso 4.5

A figura 3.17 traz uma comparação do último parâmetro de interesse, a recorrência (r). Os sinais simulados apresentam afundamentos com média e desvio padrão de 0,3 e 0,1 pu, respectivamente, e duração de 1 segundo, ocorrendo a cada 1 minuto, 5 minutos, 2 horas e 1 dia.

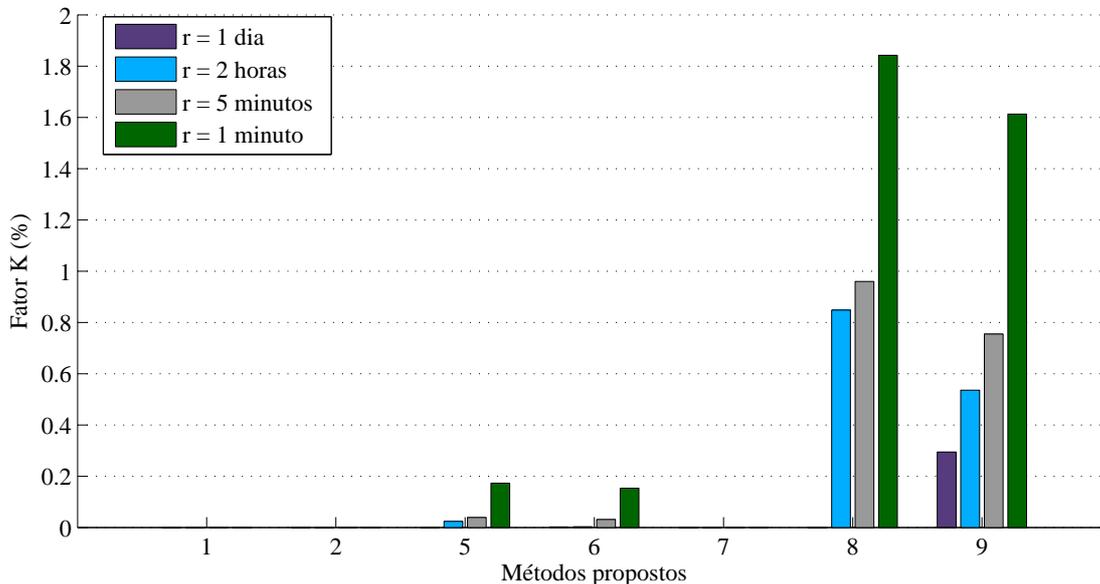


Figura 3.17: Fator K para sinais com afundamentos de recorrências distintas

Observa-se da figura 3.17 que o indicador é nulo para os métodos 1, 2 e 7. De fato, como a duração dos afundamentos dos 4 sinais é de apenas 1 segundo e, conforme explicado no subcaso 4.1, o desequilíbrio ocorre em menos de 5% do tempo total, o K95% desses métodos não é afetado.

Além disso, a figura 3.17 indica que, para o sinal cujos afundamentos se dão com recorrência de 1 dia, apenas o método 9 acusa desequilíbrio diferente de zero, sendo da ordem de 0,3%. O método 9 é sensível a esse desequilíbrio singular pois resume os dados até o intervalo intermediário de 2 horas, e calcula o indicador a cada janela de amostragem. Aumentando-se a frequência do afundamento para 2 horas e, em seguida, para 5 minutos, um indicador superior a 0,1% é fornecido somente pelos métodos 8 e 9.

Portanto, conclui-se que os afundamentos mais comuns na rede elétrica, os quais ocorrem apenas 1 vez ao dia durando até 1 segundo, não influenciam de forma significativa os métodos estudados, já que não são capazes de afetar o indicador de desequilíbrio de tensão.

3.2.5 Caso 5

Os objetos de estudo dessa etapa do trabalho são dois sinais que apresentam tanto desequilíbrios quanto afundamentos aleatórios. Ambos os afundamentos são do tipo B, apresentam média e desvio padrão de 0,3 e 0,1 pu, respectivamente, duração de 1 segundo e recorrência de 1 minuto. A distinção entre os sinais está no desequilíbrio apresentado, pois o mesmo ocorrerá a cada minuto para o do subcaso 5.1 e a cada janela para o do 5.2, com desvio padrão de 5 volts em ambos.

- Subcaso 5.1

A figura 3.18 ilustra a comparação do sinal descrito para este subcaso com os sinais que apresentam somente um ou outro problema. O sinal nomeado na legenda por "ambos" possui tanto desequilíbrio quanto afundamentos aleatórios.

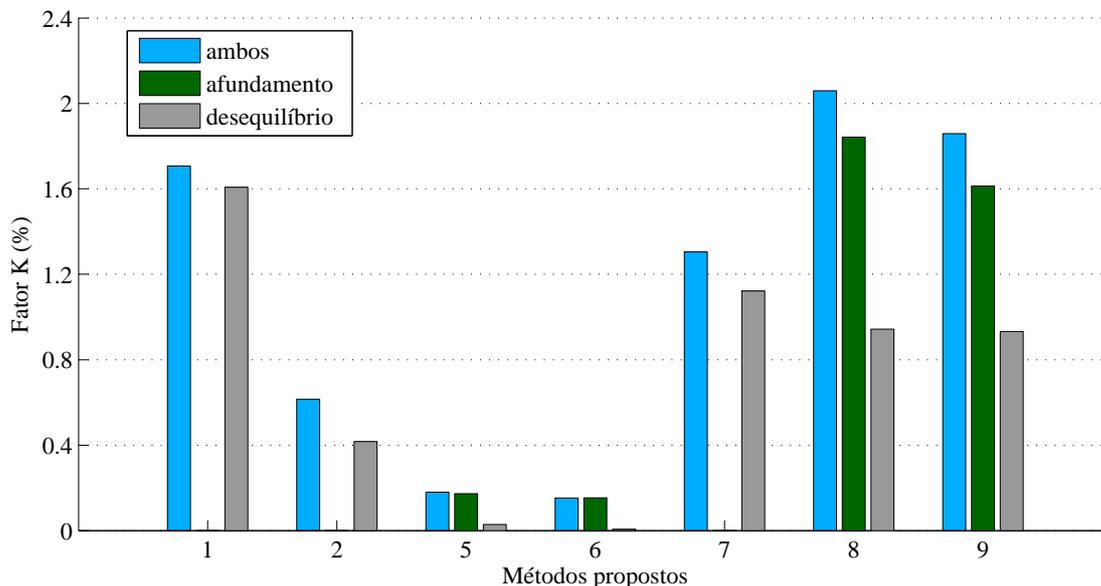


Figura 3.18: Fator K para sinais com afundamentos e/ou desequilíbrios aleatórios a cada minuto

Da figura 3.18, é possível concluir que o fator K do sinal com ambos os problemas de qualidade de energia não é uma combinação linear dos indicadores dos sinais que apresentam, separadamente, os defeitos citados. Para os métodos 1, 2 e 7, o fator K do sinal com ambos os problemas é maior do que a

soma dos outros dois e, para os métodos 5, 6, 8 e 9, ele é menor.

Nota-se também da figura 3.18, considerando cada sinal separadamente, a diversidade de resultados possíveis para o indicador. Essa observação enfatiza a importância da elaboração de um protocolo de medição de desequilíbrio de tensão padronizado e minucioso, que não possibilite interpretações ambíguas, pois essas divergências protocolares podem provocar resultados consideravelmente discrepantes.

- Subcaso 5.2

O subcaso 5.2 tem o intuito de verificar se as conclusões obtidas para o subcaso 5.1 permanecem válidas ao modificar alguma característica do sinal. Escolheu-se, então, a alteração na aleatoriedade do desequilíbrio, a qual passa a ser a cada janela de amostragem. A figura 3.19 ilustra os resultados obtidos.

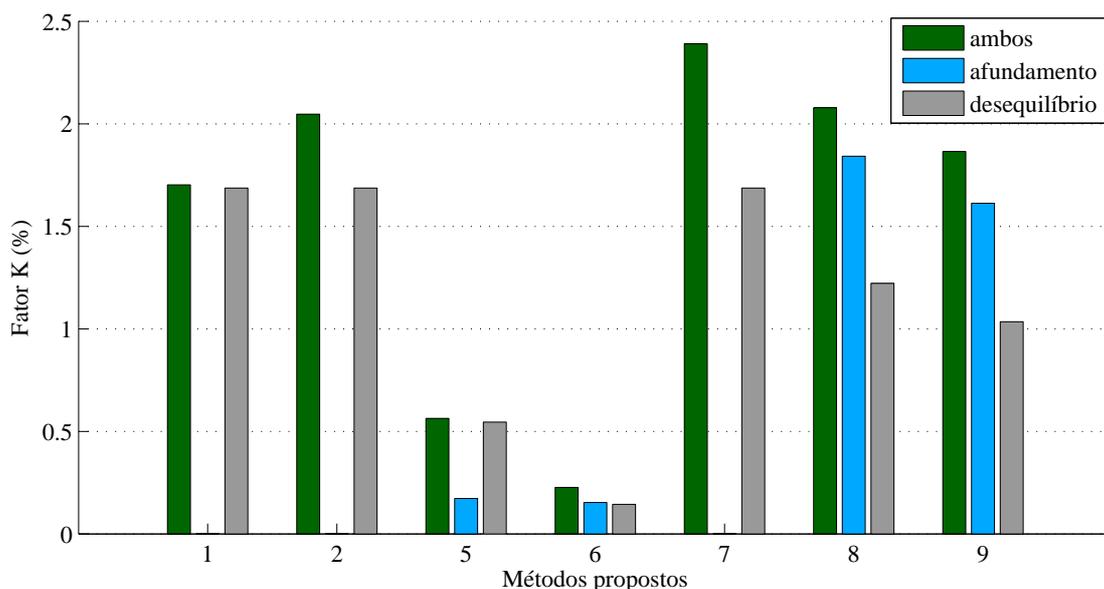


Figura 3.19: Fator K para sinais com afundamentos e/ou desequilíbrios aleatórios a cada janela

De fato, conforme indicado pela figura 3.19, o fator K de um sinal que possui mais de um problema de qualidade de energia não é uma combinação linear do efeito de cada um deles separadamente. Na verdade, ele é função tanto de quais problemas ocorrem simultaneamente quanto de qual metodologia é utilizada para aferição do indicador.

Portanto, conclui-se que a combinação dos diversos problemas associados à qualidade de energia elétrica deve ser estudada caso a caso a fim de entender a influência desses efeitos simultâneos.

3.2.6 Caso 6

Verificar as implicações da utilização da FFT e do valor *rms* na magnitude do fator K é o último objetivo desse trabalho. No entanto, esse estudo faz sentido apenas para sinais que apresentam harmônicas; pois, caso contrário, os procedimentos tornam-se equivalentes. Os subcasos 6.1 e 6.2 trazem os resultados da aplicação desses dois métodos para sinais com diferentes quantidades de harmônicas.

- Subcaso 6.1

A figura 3.20 ilustra o comportamento do fator K para o sinal com harmônicas ímpares de ordem menor do que 10 em 2 fases, e cujas magnitudes são dadas pelos limites individuais das mesmas fornecidos no submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede [8], a saber, 5% de terceira, quinta e sétima e 3% de nona harmônicas. Segundo o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição [2], o cálculo da DHT é dado pela equação 3.2. Sendo assim, este sinal apresenta $DHT = 9,16\%$ nessas fases.

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_f} \cdot 100 \quad (3.2)$$

onde

h é a ordem da harmônica;

V_h é a tensão harmônica de ordem h ;

V_f é a tensão fundamental medida.

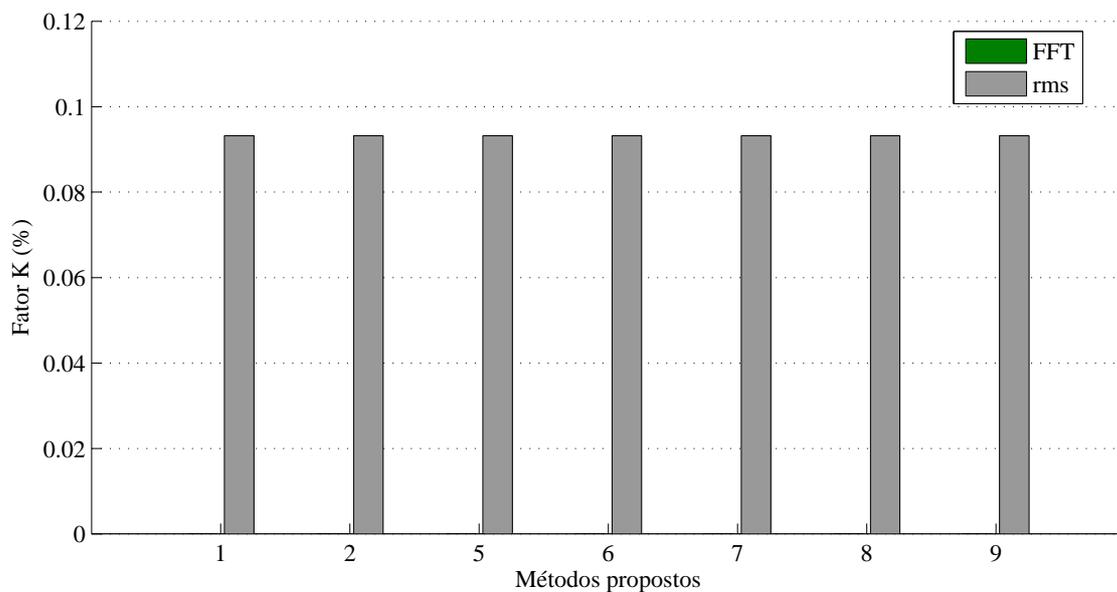


Figura 3.20: Fator K para o sinal com $DHT = 9,16\%$ em duas fases

Da análise da figura 3.20 nota-se que o fator K para o sinal que foi submetido à FFT foi nulo para todos os métodos propostos. Portanto, conclui-se que, conforme esperado, as harmônicas não influenciam no resultado do indicador quando faz-se o uso da FFT, já que neste caso pode-se considerar para o cálculo do fator K apenas a frequência de 60 Hz.

Além disso, observa-se também da figura 3.20 que, para sinais com até 5% de terceira, quinta e sétima harmônicas e 3% de nona harmônica, o erro cometido ao substituir o procedimento da FFT pelo valor *rms* é pequeno, já que o fator K observado para esse caso foi de apenas 0,09 %, aproximadamente. O resultado para todos os métodos propostos foi idêntico pois este sinal também poderia se enquadrar dentro do caso

1, caracterizado por desequilíbrios constantes ao longo de todo o período de observação.

- Subcaso 6.2

Com o intuito de verificar se a aplicação da FFT e do valor *rms* continua semelhante para um sinal com maiores proporções de DHT, um novo sinal foi elaborado. Este contém 18,33% de distorção harmônica total em uma fase e 36,66% em outra, isto é, o dobro e o triplo da apresentada pelo sinal do subcaso 6.1. A figura 3.21 ilustra os resultados obtidos para o subcaso 6.2.

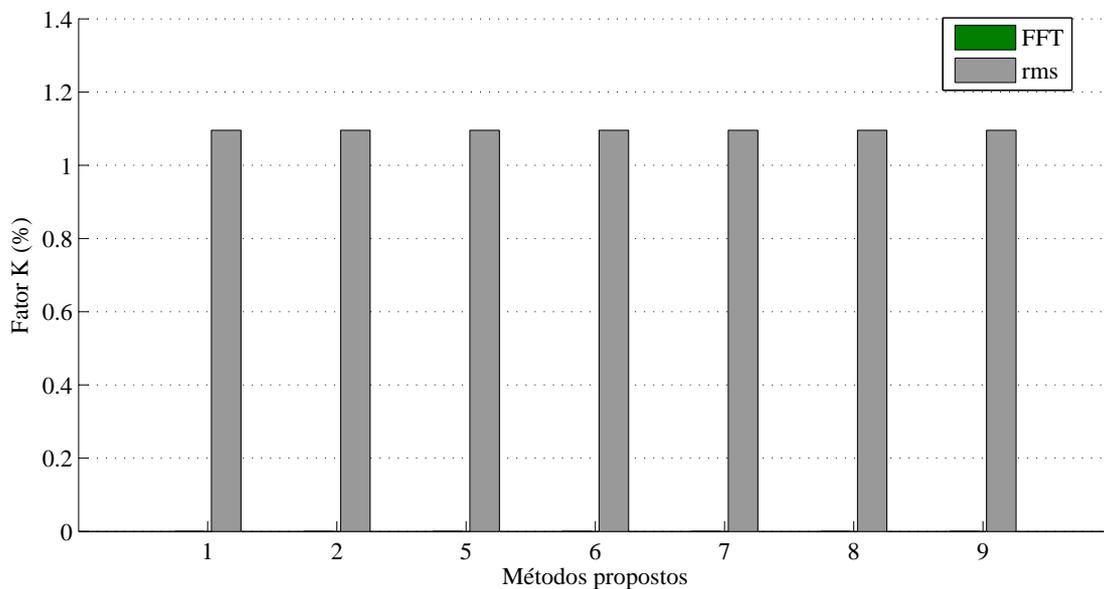


Figura 3.21: Fator K para o sinal com DHT= 18,33% em uma fase e 36,66% na outra

Analogamente ao subcaso 6.1, a figura 3.21 indica que o procedimento da FFT elimina a influência das harmônicas na quantificação do desequilíbrio de tensão, independente das suas magnitudes, fornecendo um fator K nulo para um sinal que apresente apenas esse problema de qualidade de energia.

Já para o procedimento que faz uso do valor *rms*, as figuras 3.21 e 3.20 indicam que, à medida que a distorção harmônica aumenta, o fator K passa a ter influência das mesmas. Para este sinal cuja DHT chega a 18,33% em uma fase e 36,66% em outra, o erro cometido por não utilizar o procedimento da FFT, estabelecido por todas as normas apresentadas nesse trabalho, é significativo, já que o indicador da figura 3.21 atinge o patamar de aproximadamente 1,1 %.

Portanto, conclui-se que é indiferente a aplicação da FFT ou do valor *rms* na quantificação do indicador de desequilíbrio de tensão para sinais que respeitam o limite de distorção harmônica previsto nos Procedimentos de Rede. Porém, caso esse nível aumente para valores muito acima do permitido, apenas a FFT pode ser aplicada para que o valor do fator K não seja influenciado pelas componentes harmônicas do sinal.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados das simulações computacionais, com vistas à avaliação do comportamento do fator K mediante diferentes protocolos de medição de desequilíbrio de tensão e de diversos sinais de teste.

Inicialmente, sinais com desequilíbrios constantes no módulo e no ângulo da tensão foram aplicados. Verificou-se que não há diferença na escolha dos métodos para esse tipo de sinal. Além disso, mostrou-se que o indicador é mais sensível a variação de 1 grau no ângulo da tensão do que de 1 volt na sua magnitude. Outro resultado interessante obtido foi a maior sensibilidade do fator K a subtensões do que a sobretensões.

Em seguida, simulou-se sinais com desequilíbrios aleatórios modelados por uma distribuição normal. Os diferentes resultados obtidos para cada método indicaram a importância da padronização do protocolo de medição. Verificou-se que os métodos que menos resumem a informação em valores *rms* (M1, M2 e M7) são os mais sensíveis a esse fenômeno. Além disso, indicou que os métodos 3 e 5, assim como o 4 e o 6, geram resultados idênticos, independente do sinal de entrada. Mais ainda, que não importa a quantidade de intervalos intermediários utilizados no protocolo de medição, basta definir o último empregado antes de efetuar-se o K95% (demonstração encontra-se no Anexo B).

Considerando ainda os sinais desequilibrados aleatoriamente, construiu-se um modelo estatístico linear do indicador em função do desvio padrão do sinal para cada um dos métodos, considerando as frequências de 1 minuto e 1 janela. Portanto, sendo o sinal modelado por uma distribuição normal e tendo a recorrência da aleatoriedade, tem-se um modelo matemático linear que descreve o indicador em função do desvio padrão, para cada um dos métodos, dispensando extensas simulações computacionais.

Concluiu-se também que a escolha entre as janelas de amostragem retangular, flat-top e hamming não parece interferir na quantificação do indicador.

Em uma análise seguinte, foram utilizados sinais com afundamentos de tensão de diferentes tipos, médias, desvios padrão, durações e recorrências. Verificou-se que, para todos os parâmetros de interesse citados, a escolha adequada do método de cálculo do desequilíbrio de tensão é essencial para a mensuração do indicador. Os métodos que mais mitigam a informação e calculam o indicador a cada janela (M8 e M9) são os mais sensíveis a esse fenômeno. Já para o M1, M2 e M7, que causam pouca mitigação, os afundamentos de tensão instantâneos e momentâneos não são notados pelo indicador calculado.

Além disso, constatou-se que o afundamento do tipo A não interfere na magnitude do fator K, sendo o estimador mais sensível a afundamentos do tipo B. Em relação à média, ao desvio padrão e à duração do afundamento, percebeu-se uma proporcionalidade do indicador a esses fatores, mas essa relação não é linear e também depende do protocolo utilizado. Por fim, verificou-se, a partir dos resultados para o parâmetro recorrência, que os afundamentos mais comuns (que duram até 1 segundo e ocorrem até 1 vez ao dia) não têm influência significativa sobre o indicador de desequilíbrio de tensão.

Em seguida, sinais que possuem tanto desequilíbrios quanto afundamentos de tensão foram comparados aos que apresentam esses mesmos problemas, mas não superpostos. Verificou-se que a ocorrência conjunta desses fenômenos não é explicada por uma simples combinação linear dos mesmos ocorrendo separadamente. Portanto, faz-se necessário o estudo de sinais mais elaborados para melhor compreensão do comportamento do fator K aferido de sinais que apresentem superposição desses fatores.

Por fim, foi verificado o erro cometido por substituir o procedimento da FFT pelo valor *rms* na aplicação das normas referentes a desequilíbrio de tensão. Constatou-se que, para sinais com 9,16% de distorção harmônica total, essa discrepância é pequena. No entanto, para outros sinais com índices maiores de distorção, essa influência aumenta, impossibilitando a substituição.

A tabela 3.7 resume, de maneira simplificada, a sensibilidade do fator K de cada método para diferentes sinais de entrada. Foi adotada uma escala de 0 a 3, na qual zero significa que o sinal não influencia no indicador, e três indica um grau de influência elevado deste sinal nesta metodologia. Nos casos em que todos os métodos são igualmente sensíveis, convencionou-se utilizar o número 2.

Tabela 3.7: Grau de sensibilidade do fator K dos métodos propostos aos diferentes sinais de entrada

Sinal	M1	M2	M5	M6	M7	M8	M9
Desequilíbrio Constante	2	2	2	2	2	2	2
Desequilíbrio Aleatório ($r = 1 \text{ minuto}$)	3	3	1	1	3	2	2
Desequilíbrio Aleatório ($r = 1 \text{ janela}$)	3	1	0	0	2	2	2
Afundamento ($d \leq 3 \text{ seg}$)	0	0	1	1	0	3	3
Afundamento ($d > 3 \text{ seg}$)	3	3	1	1	3	2	2
Desequilíbrio e Afundamento	3	3	1	1	3	3	3
Harmônicas (FFT)	0	0	0	0	0	0	0
Harmônicas (<i>rms</i>)	2	2	2	2	2	2	2

A tabela 3.7 permite uma visão geral dos métodos e dos sinais utilizados. Nota-se, por exemplo, que as metodologias 5 e 6 apresentam um grau de sensibilidade sempre menor ou igual ao fornecido pelas outras, independente do sinal de entrada. Portanto, calcular o fator K apenas no último intervalo intermediário não parece ser uma escolha apropriada para a metodologia de quantificação do desequilíbrio de tensão. Já para os outros métodos, M1, M2, M7, M8 e M9, observa-se uma maior variação da sensibilidade do indicador de acordo com o sinal de entrada.

Além disso, a tabela 3.7 indica que, para sinais apenas com desequilíbrios constantes ou harmônicas, não há diferença na escolha dentre as metodologias propostas. E, utilizando-se a FFT, o sinal com harmônicas não tem influência alguma sobre o fator K.

Por fim, nota-se da tabela 3.7 que há uma mudança no grau de sensibilidade dos métodos para sinais com afundamentos de durações inferiores e superiores a 3 segundos, com recorrência de 1 minuto. De fato, como a partir de 3 segundos o desequilíbrio ultrapassa 5% do tempo total, o grau de sensibilidade dos métodos 1, 2 e 7 passa de zero para três.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo comparativo entre nove métodos de quantificação do desequilíbrio de tensão submetidos a sinais com desequilíbrios, afundamentos e harmônicas. A elaboração das metodologias foi baseada nas possibilidades vislumbradas no contexto das normas nacionais e internacionais referentes ao fator K.

No capítulo 1, buscou-se contextualizar a pesquisa realizada por meio da descrição do problema e de aspectos gerais relacionados com o tema. Enfatizou-se a importância da qualidade da energia elétrica e a necessidade da busca de indicadores padronizados que reflitam corretamente o fenômeno de interesse. Além disso, os objetivos e a estrutura do projeto foram detalhados.

O capítulo 2 foi destinado à apresentação dos principais conceitos relacionados com desequilíbrio de tensão. Quatro metodologias de cálculo deste fenômeno foram abordadas. Mencionou-se que duas delas são equivalentes, a saber, o método das componentes simétricas e do Cigré (demonstração encontra-se no Anexo A). Sendo que o método do Cigré apresenta a vantagem de não necessitar dos ângulos dos fasores de tensão. E, por essa razão, foi escolhido para os métodos propostos neste projeto.

Adicionalmente, no capítulo 2, as principais normas e recomendações nacionais e internacionais que tratam da quantificação do fator K foram descritas. A ausência de uma legislação padronizada motivou a comparação dos resultados de diferentes protocolos de medição. Sendo assim, nove métodos de quantificação foram propostos com base nas informações das normas abordadas. Para tornar possível a comparação entre esses métodos, elaborou-se seis casos de sinais de teste envolvendo desequilíbrios, afundamentos e harmônicas, os quais foram detalhadamente especificados neste capítulo.

Os resultados das simulações computacionais realizadas foram exibidos no capítulo 3. Inicialmente, sinais com desequilíbrios constantes no módulo e no ângulo da tensão foram aplicados. Observou-se que, para este caso, não há diferença na escolha dentre as nove metodologias. Verificou-se também que o indicador é mais sensível a subtensões do que a sobretensões. Além disso, notou-se que variações nos ângulos das tensões impactam mais no fator K do que variações nos seus módulos.

No caso 2, sinais com desequilíbrios aleatórios modelados por uma normal com média de 220 volts e desvios padrões diversos foram submetidos aos nove métodos. Verificou-se, então, que os resultados produzidos por eles eram consideravelmente distintos. Métodos que menos mitigam a informação em valores *rms* (M1, M2 e M7) resultaram em um indicador mais elevado. Além disso, observou-se que métodos que calculam o K95% a partir do mesmo intervalo intermediário de agregação (M3 e M5 ou M4 e M6) fornecem o mesmo valor para o indicador (demonstração encontra-se no Anexo B). Constatou-se também que o fator K apresenta uma dependência linear com o desvio padrão do sinal. Foram encontrados os parâmetros desse modelo para cada um dos métodos, considerando as recorrências da aleatoriedade a cada minuto e a cada janela.

Com vistas à comparação dos efeitos de diferentes tipos de janelas de amostragem na quantificação do indicador, as janelas retangular, flat-top e hamming foram aplicadas. No entanto, não houve diferença na quantificação do fator K para os métodos e sinais considerados.

Em seguida, foi feita a análise do comportamento do fator K dos nove métodos perante sinais com afundamentos de tensão. Observou-se que os métodos M1, M2 e M7, por mitigar pouco a informação, não notam afundamentos com recorrência de 1 minuto e cujas durações são inferiores a 3 segundos. Já os métodos que mais resumem a informação e calculam o indicador a cada janela, M8 e M9, fornecem um indicador mais elevado. No entanto, verificou-se que, para os afundamentos mais comuns, cuja recorrência é da ordem de 1 dia, este fenômeno não é capaz de sensibilizar o fator de desequilíbrio de tensão.

Sinais com desequilíbrios e afundamentos aleatórios foram simulados a fim de analisar o comportamento do indicador na presença de fenômenos sobrepostos. Verificou-se que, de fato, a escolha do método de quantificação é determinante na mensuração do indicador. Além disso, notou-se que o fator K de sinais com ambos os problemas de qualidade de energia não é uma combinação linear dos indicadores dos sinais que apresentam, separadamente, os defeitos citados. Portanto, pesquisas futuras com uma análise detalhada do comportamento do indicador perante sinais mais elaborados apresentam-se relevantes.

Por fim, foi analisado o erro cometido em substituir o procedimento da FFT pelo valor *rms* da tensão do sinal na aplicação das normas referentes a desequilíbrios de tensão. Concluiu-se que, para sinais com $DHT = 9,16\%$, esse erro é muito pequeno. No entanto, sinais com distorções harmônicas muito superiores a esta causam diferenças acentuadas, tornando-se a aproximação inadmissível.

Considerando os resultados apresentados, conclui-se que é imprescindível a padronização do protocolo de medição de desequilíbrio de tensão. Apesar de ser um consenso entre as normas do índice de conformidade de 2%, esse limite representa desequilíbrios diferentes quando métodos de quantificação não uniformizados são aplicados. Portanto, constata-se a necessidade de estudos voltados a elaboração de um protocolo único, que represente adequadamente o supracitado fenômeno.

Tendo em vista os objetivos propostos para este trabalho e os resultados relevantes obtidos, este estudo contribuiu com a busca de protocolos padronizados para o fator K , e com análises do seu comportamento perante sinais com desequilíbrios, afundamentos e harmônicas, podendo auxiliar pesquisas futuras sobre desequilíbrios de tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y. H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 2006.
- [2] ANEEL. *Procedimentos de Distribuição*. [S.l.], Dezembro 2008.
- [3] ALMEIDA, W. G.; FREITAS, F. D. *Circuitos Polifásicos*. [S.l.]: Finatec, 1995.
- [4] OLIVEIRA, J. C. *Contribuições para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica, Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas, Relatório Parcial 2, Estado da Arte*. [S.l.], 2000.
- [5] ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE, M. P. *Processamento Digital de Sinais*. [S.l.], Julho 2002.
- [6] OLIVEIRA, J. C. *Contribuições para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica, Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas, Relatório Parcial 3, Protocolos de Medição*. [S.l.], Junho 2000.
- [7] SÉRGIO, L. Z.; GUSTAVO, R. V. Iec61000-4-30: A norma definitiva para medição de parâmetros de qualidade. In: *Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica (SBQEE)*. [S.l.: s.n.], 2005.
- [8] ONS. *Procedimentos de Rede*. [S.l.], Julho 2008.
- [9] ANEEL. *Resolução Normativa 505*. [S.l.], Novembro 2001.
- [10] VEGA, V.; FERREIRA, A. L.; NASCIMENTO, F. A. O. *Avaliação da influência da forma de tratamento dos sinais e de afundamentos e harmônicas na quantificação do desequilíbrio*.
- [11] FILHO, A. L. F. et al. Ferramenta computacional para a análise de variações momentâneas de tensão. In: *Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica (SBQEE)*. [S.l.: s.n.], 2007.
- [12] GARCIA, D. C. *Avaliação e Minimização Numérica do Desequilíbrio de Tensão: Estimativa por Análise de Sensibilidade Incremental e Soluções Analíticas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2007.
- [13] COSTA, M. V. C.; FILHO, A. L. F.; NASCIMENTO, F. A. O. Análise do comportamento do fator k complexo e das componentes simétricas com a variação dos fasores de tensão. In: *VII Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2007.

I. ANEXO A

A seguir, tem-se a demonstração matemática da equivalência entre os métodos de quantificação do fator K das componentes simétricas e do Cigré. A comprovação consiste em escrever as tensões de sequência positiva e negativa em termos das tensões de linha complexas, cujos módulos são conhecidos e expressões para os ângulos são facilmente determinadas [1].

De acordo com o método das componentes simétricas, o fator K é dado pela razão das tensões de sequência negativa e positiva (equação I.1):

$$K(\%) = \frac{\overline{U}^-}{\overline{U}^+} \quad (\text{I.1})$$

Por sua vez, as tensões \overline{U}^+ e \overline{U}^- podem ser escritas em termos das tensões de linha complexas, equações I.2, I.3 e I.4:

$$\overline{U}^+ = \overline{C} + a^2\overline{B} + a\overline{A} \quad (\text{I.2})$$

$$\overline{U}^- = \overline{C} + a\overline{B} + a^2\overline{A} \quad (\text{I.3})$$

Onde:

$$A = |\overline{V}_{bc}| \quad B = |\overline{V}_{ca}| \quad C = |\overline{V}_{ab}| \quad (\text{I.4})$$

Com o intuito de encontrar os ângulos das tensões de linha complexas em função dos seus módulos, considere o diagrama fasorial indicado na figura I.1. A nomenclatura adotada para os ângulos foi $\alpha = a$, $\beta = b$, $\gamma = g$.

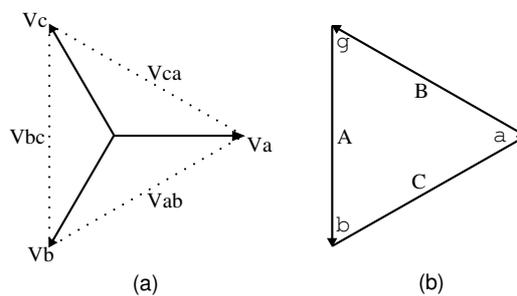


Figura I.1: Diagrama fasorial das tensões de fase e de linha

Aplicando a lei dos cossenos no triângulo da figura I.1(b), obtém-se as equações numeradas de I.5 a I.10:

$$A^2 = B^2 + C^2 - 2BC \cos \alpha \quad (\text{I.5})$$

$$B^2 = A^2 + C^2 - 2AC \cos \beta \quad (\text{I.6})$$

$$C^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \gamma \quad (\text{I.7})$$

Portanto,

$$\cos \alpha = \frac{B^2 + C^2 - A^2}{2BC} \quad (\text{I.8})$$

$$\cos \beta = \frac{A^2 + C^2 - B^2}{2AC} \quad (\text{I.9})$$

$$\cos \gamma = \frac{A^2 + B^2 - C^2}{2AB} \quad (\text{I.10})$$

Sendo assim, de posse dos módulos e dos ângulos, tem-se completamente caracterizadas as tensões de linha complexas. No entanto, algumas manipulações algébricas serão feitas com o intuito de simplificar o resultado final.

Utilizando o fasor \bar{C} da figura I.1(b) como referência, obtém-se as expressões I.11, I.12 e I.13:

$$\bar{C} = C \quad (\text{I.11})$$

$$\bar{B} = -B \cos \alpha + jB \sin \alpha \quad (\text{I.12})$$

$$\bar{A} = -A \cos \beta - jA \sin \beta \quad (\text{I.13})$$

Substituindo \bar{A} , \bar{B} e \bar{C} das equações I.11, I.12, I.13 nas expressões das tensões de sequência positiva e negativa (I.2 e I.3), chega-se a I.14 e I.15:

$$\begin{aligned} \bar{U}^+ = & C + \frac{1}{2}B \cos \alpha + \frac{1}{2}jB\sqrt{3} \cos \alpha - \frac{1}{2}jB \sin \alpha + \frac{1}{2}B\sqrt{3} \sin \alpha + \\ & \frac{1}{2}A \cos \beta - \frac{1}{2}jA\sqrt{3} \cos \beta + \frac{1}{2}jA \sin \beta + \frac{1}{2}A\sqrt{3} \sin \beta \end{aligned} \quad (\text{I.14})$$

$$\begin{aligned} \bar{U}^- = & C + \frac{1}{2}B \cos \alpha - \frac{1}{2}jB\sqrt{3} \cos \alpha - \frac{1}{2}jB \sin \alpha - \frac{1}{2}B\sqrt{3} \sin \alpha + \\ & \frac{1}{2}A \cos \beta + \frac{1}{2}jA\sqrt{3} \cos \beta + \frac{1}{2}jA \sin \beta - \frac{1}{2}A\sqrt{3} \sin \beta \end{aligned} \quad (\text{I.15})$$

A fim de simplificar mais as equações I.14 e I.15, aplica-se a lei dos senos no triângulo da figura I.1(b), obtendo-se a equação I.16 e, conseqüentemente, I.17:

$$\frac{\sin \alpha}{A} = \frac{\sin \beta}{B} \quad (\text{I.16})$$

$$B \sin \alpha = A \sin \beta \quad (\text{I.17})$$

Rearranjando os resultados da aplicação da lei dos cossenos (equações I.8, I.9, I.10), obtém-se I.18 e I.19:

$$B \cos \alpha + A \cos \beta = C \quad (\text{I.18})$$

$$B \cos \alpha - A \cos \beta = \frac{B^2 - A^2}{C} \quad (\text{I.19})$$

Substituindo as relações de I.17, I.18 e I.19 nas equações I.14 e I.15, chega-se às expressões I.20 e I.21:

$$\overline{U^+} = \frac{3}{2}C + B\sqrt{3} \sin \alpha + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \frac{B^2 - A^2}{C} \quad (\text{I.20})$$

$$\overline{U^-} = \frac{3}{2}C - B\sqrt{3} \sin \alpha - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \frac{B^2 - A^2}{C} \quad (\text{I.21})$$

Portanto, para escrever $\overline{U^+}$ e $\overline{U^-}$ em termos apenas dos módulos das tensões de linha, falta encontrar a relação entre $\sin \alpha$ e A, B e C. Essa expressão é obtida por meio de (I.8) e de $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$, estando indicada na equação I.22:

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \frac{(B^2 + C^2 - A^2)^2}{4B^2C^2}} = \frac{\sqrt{(A^2 + B^2 + C^2)^2 - 2(A^4 + B^4 + C^4)}}{2BC} \quad (\text{I.22})$$

Sendo assim, substituindo (I.22) em (I.20) e (I.21), obtém-se as equações I.23 e I.24:

$$\overline{U^+} = \frac{3}{2}C + \frac{1}{2C} \sqrt{3(A^2 + B^2 + C^2)^2 - 6(A^4 + B^4 + C^4)} + j \frac{\sqrt{3}(B^2 - A^2)}{2C} \quad (\text{I.23})$$

$$\overline{U^-} = \frac{3}{2}C - \frac{1}{2C} \sqrt{3(A^2 + B^2 + C^2)^2 - 6(A^4 + B^4 + C^4)} - j \frac{\sqrt{3}(B^2 - A^2)}{2C} \quad (\text{I.24})$$

Considerando apenas os valores absolutos, tem-se (I.25) e (I.26):

$$|\overline{U^+}|^2 = \frac{3}{2}(A^2 + B^2 + C^2) + \frac{3}{2} \sqrt{3(A^2 + B^2 + C^2)^2 - 6(A^4 + B^4 + C^4)} \quad (\text{I.25})$$

$$|\overline{U^-}|^2 = \frac{3}{2}(A^2 + B^2 + C^2) - \frac{3}{2} \sqrt{3(A^2 + B^2 + C^2)^2 - 6(A^4 + B^4 + C^4)} \quad (\text{I.26})$$

Portanto, o índice de desequilíbrio de tensão pode ser obtido pela raiz quadrada da razão das expressões I.26 e I.25. Por fim, substituindo a notação estabelecidas em (I.4), chega-se às equações I.27 e I.28:

$$K = \frac{|\overline{U^-}|}{|\overline{U^+}|} = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6Q}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6Q}}} \quad (\text{I.27})$$

Onde:

$$Q = \frac{|\overline{V}_{ab}|^4 + |\overline{V}_{bc}|^4 + |\overline{V}_{ca}|^4}{(|\overline{V}_{ab}|^2 + |\overline{V}_{bc}|^2 + |\overline{V}_{ca}|^2)^2} \quad (\text{I.28})$$

Identificando as equações I.27 e I.28 como sendo a definição do fator K pelo método do Cigré, demonstra-se a equivalência existente entre este método e o das componentes simétricas.

II. ANEXO B

Considere k observações de uma variável: V_1, V_2, \dots, V_k . Agrupando-as por meio do valor *rms* de m delas, tal que m é múltiplo de k , portanto $k = A \times m$, tem-se que (equações II.1, II.2 e II.3):

$$V1_1 = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_m^2}{m}} \quad (\text{II.1})$$

$$V1_2 = \sqrt{\frac{V_{m+1}^2 + V_{m+2}^2 + \dots + V_{2m}^2}{m}} \quad (\text{II.2})$$

e assim sucessivamente até:

$$V1_A = \sqrt{\frac{V_{k-m+1}^2 + V_{k-m+2}^2 + \dots + V_k^2}{m}} \quad (\text{II.3})$$

onde $V1_i$ indica o i -ésimo valor *rms* do primeiro agrupamento.

Agrupando novamente esses valores a cada n , onde n é múltiplo de A , isto é $A = n \times B$ obtém-se as equações II.4, II.5 e II.6:

$$V2_1 = \sqrt{\frac{V1_1^2 + V1_2^2 + \dots + V1_n^2}{n}} \quad (\text{II.4})$$

$$V2_2 = \sqrt{\frac{V1_{n+1}^2 + V1_{m+2}^2 + \dots + V1_{2n}^2}{n}} \quad (\text{II.5})$$

e assim sucessivamente até:

$$V2_B = \sqrt{\frac{V1_{k-n+1}^2 + V1_{k-n+2}^2 + \dots + V1_A^2}{n}} \quad (\text{II.6})$$

onde $V2_i$ indica o i -ésimo valor *rms* do segundo agrupamento.

Substituindo os valores de $V1_1, V1_2, \dots, V1_n$ em II.4, obtém-se a equação II.7 e, com pequenas manipulações algébricas, chega-se a II.8 e II.9:

$$V2_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_m^2}{m}}^2 + \sqrt{\frac{V_{m+1}^2 + V_{m+2}^2 + \dots + V_{2m}^2}{m}}^2 + \dots + \sqrt{\frac{V_{nm-m+1}^2 + V_{nm-m+2}^2 + \dots + V_{nm}^2}{m}}^2}{n}} \quad (\text{II.7})$$

$$= \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_m^2 + V_{m+1}^2 + V_{m+2}^2 + \dots + V_{2m}^2 + \dots + V_{nm-m+1}^2 + V_{nm-m+2}^2 + \dots + V_{nm}^2}{n \times m}} \quad (\text{II.8})$$

$$= \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_{nm}^2}{n \times m}} \quad (\text{II.9})$$

Sendo assim, de acordo o resultado do Anexo B, agrupar em m e depois em n é o mesmo que agrupar diretamente em $m \times n$. Analogamente, o mesmo procedimento feito para $V2_1$, o primeiro valor *rms* do segundo agrupamento, pode ser repetido para os demais $V2_2, \dots, V2_B$, chegando-se a mesma conclusão.