SILVIO XAVIER DUARTE

**Proposta de Indicador de Qualidade de Tensão a partir do Impacto de
Distorções Harmônicas e Desequilíbrios sobre Motores de Indução**

**Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
título de Doutor em Engenharia**

São Paulo
2006

SILVIO XAVIER DUARTE

Proposta de Indicador de Qualidade de Tensão a partir do Impacto de Distorções Harmônicas e Desequilíbrios sobre Motores de Indução

**Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
título de Doutor em Engenharia**

**Área de Concentração:
Sistemas de Potência**

**Orientador:
Prof. Dr. Nelson Kagan**

**São Paulo
2006**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de outubro de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Duarte, Silvio Xavier

**Proposta de indicador de qualidade de tensão a partir do impacto de distorções harmônicas e desequilíbrios sobre motores de indução / S.X. Duarte. -- São Paulo, 2006.
124 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Indicadores de qualidade 2.Energia elétrica 3.Motores de indução (Distúrbios na tensão) 4.Indicadores de desequilíbrios e distorções harmônicas de tensão I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

À minha família.

*Graças ao apoio e compreensão dados por vocês Gorete,
Natália e Catarina, pude concretizá-lo.*

Agradeço

A Deus, pela força que sempre me dá;

Ao Prof. Dr. Nelson Kagan, pela ajuda e orientação que permitiu o adequado desenvolvimento do trabalho;

Aos Professores Hector Arango e Lourenço Matakas, pelas sugestões apresentadas no exame de qualificação da tese;

Aos colegas Nelson Massakazu Matsuo e Fernando Rocha Itocazo pela valiosa ajuda e o apoio que sempre me deram;

Ao apoio e incentivo que sempre me foram dados pelos demais colegas do Enerq.

ÍNDICE

1. QUALIDADE DE ENERGIA E MONITORAÇÃO	1
1.1.Introdução	1
1.2.Conceitos de Qualidade de Energia	2
1.3.Objetivo do Trabalho	4
1.4.Organização do Trabalho	6
2. ASPECTOS RELEVANTES E JUSTIFICATIVOS	9
2.1.Limites Admissíveis de Tensão e Desequilíbrio	9
2.2.Perda de Vida de Motores Devido a Distúrbios na Tensão	10
3. EFEITOS DE DISTÚRBIOS NA TENSÃO EM MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO	14
3.1.Generalidades	14
3.2.Efeitos de Tensões Harmônicas nos Parâmetros do Circuito Equivalente de Motores de Indução	17
3.2.1. Ramo Paralelo do Circuito Equivalente	17
3.2.2. Ramo Série do Circuito Equivalente	25
4. TESTES DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM MOTOR DE INDUÇÃO	31
4.1.Introdução	31
4.2.Montagens para Realização dos Testes	31
4.3.Caracterização dos Testes	33
4.4.Resultados dos Testes	40
4.5.Análise dos Resultados dos Testes	46
4.5.1. Caso de aplicação de desequilíbrio de frequência fundamental	46
4.5.2. Caso de aplicação de tensão de frequência fundamental equilibrada e harmônicas equilibradas	47
4.5.3. Caso de aplicação de tensão de frequência fundamental equilibrada e harmônicas desequilibradas	48
4.5.4. Caso de aplicação de tensão com desequilíbrio de frequência fundamental e harmônicas equilibradas	49
4.5.5. Caso de aplicação de tensão com desequilíbrio de frequência fundamental e harmônicas desequilibradas	50
4.5.6. Comentários finais sobre os resultados dos testes	52
5. REPRESENTAÇÃO DE GRANDEZAS DE UM SISTEMA DE FORNECIMENTO DE ENERGIA	54
5.1.Sistemas de Representação de Grandezas Temporais	54
5.2.Transformação de Eixos	55
5.3.Decomposição de Sinais Temporais	66
5.4.Indicadores de Distúrbios na Tensão	70
6. PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DE DISTÚRBIOS NA TENSÃO	71
6.1.Introdução	71
6.2.Parâmetro de Qualidade de Tensão	72
6.3.Tratamento e Separação de Distúrbios	72
6.4.Algoritmo para Obter Parâmetros de Qualidade de Tensão a Partir da Representação no Sistema DQ	73
6.5.Algoritmo para Obter Parâmetros de Qualidade de Tensão a Partir da Norma Euclidiana Instantânea (NEI)	78
6.6.Parâmetro Combinado de Qualidade de Tensão	81
7. PARÂMETROS DE QUALIDADE DE TENSÃO OBTIDOS	83

7.1.Introdução	83
7.2.Constantes de Ponderação	83
7.3.Comparações de Resultados de Parâmetros de Qualidade de Tensão	90
7.4.Avaliações dos Sinais no Tempo	93
8. CONCLUSÕES	98
8.1.Contribuições	98
8.2.Recomendações para Trabalhos Ulteriores	100
8.3.Considerações Finais	101
BIBLIOGRAFIA:	103
ANEXO A	109
ANEXO B	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Circuito equivalente para motor de indução trifásico	16
Figura 3-2 – Curvas do aumento de perdas por histerese em função da ordem harmônica para várias amplitudes de tensão harmônica	21
Figura 3-3 – Curvas do aumento de perdas no ferro em função da ordem harmônica para várias amplitudes de tensão harmônica - (a) perdas no ferro totais - (b) perdas por histerese.	23
Figura 3-4 – Variação dos parâmetros do motor em função da ordem harmônica: (a) - escorregamento, (b) - impedância do rotor e (c) - impedância de entrada do motor.	28
Figura 4-1 – Esquema de fixação de termopares no estator do motor submetido aos testes	32
Figura 4-2 – Esquema de ligações para o levantamento das características de elevação de temperatura de um motor frente a distúrbios na tensão de alimentação	33
Figura 4-3 - Curva de elevação de temperatura, dos enrolamentos do estator do motor, para aplicação de tensão trifásica equilibrada e nominal apenas com sinal de frequência fundamental.	34
Figura 4-4 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor obtida do ensaio 1. (Distúrbios de desequilíbrio de fundamental e harmônicas equilibradas separadamente).	41
Figura 4-5 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 2. (Distúrbios de harmônicas equilibradas 7ª, 11ª ordens e 5ª, 7ª e 11ª ordens simultâneas).	41
Figura 4-6 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 3. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas 3ª e 5ª ordens).	42
Figura 4-7 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 4. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas 7ª e 9ª ordens).	42
Figura 4-8 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 5. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas sem e com desequilíbrio de fundamental).	43

Figura 4-9 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 6. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas com desequilíbrio de fundamental).	43
Figura 4-10 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 7. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas com desequilíbrio de fundamental).	44
Figura 4-11 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 8. (Distúrbios de harmônicas equilibradas com desequilíbrio de fundamental).	44
Figura 4-12 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 9. (Distúrbios de harmônicas 5ª, 7ª e 11ª ordens harmônicas equilibradas, simultâneas, com desequilíbrio de fundamental).	45
Figura 4-13 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 10. (Distúrbios de harmônicas equilibradas de 2ª e 4ª ordens)	45
Figura 4-14 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de desequilíbrio de frequência fundamental em função do grau de desequilíbrio (k)	46
Figura 4-15 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental e harmônicas equilibradas	48
Figura 4-16 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental equilibrada e harmônicas desequilibradas	49
Figura 4-17 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental com desequilíbrio de 3% e harmônicas equilibradas com 5% e 15% de amplitude	50
Figura 4-18 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental com desequilíbrio de 3% e harmônicas desequilibradas com 5% e 10% de amplitude	51
Figura 4-19 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental com desequilíbrio de 5% e harmônicas desequilibradas com 5% de amplitude	52
Figura 5-1 – Vetor resultante $\vec{G}_R$ nos sistemas de referência ABC e $\alpha\beta$	59
Figura 5-2 – Vetor resultante $\vec{G}_R$ no sistema de referência DQ	61
Figura 5-3 – Sinais apenas com componentes de frequência fundamental de seqüência positiva – (a) representação das componentes nos sistemas $\alpha\beta$ e DQ, para um instante de tempo genérico, (b) representação das componentes no tempo.	62
Figura 5-4 - Sinais apenas com componentes de frequência fundamental de seqüências positiva e negativa – (a) representação das componentes nos sistemas $\alpha\beta$ e DQ, para um instante de tempo genérico, (b) representação das componentes no tempo.	63
Figura 5-5 - Sinais com componentes de frequência fundamental e componentes de 5ª ordem harmônica equilibrada (seqüência negativa) – (a) representação das componentes nos sistemas $\alpha\beta$ e DQ, para um instante de tempo genérico, (b) representação das componentes no tempo.	64

Figura 5-6 - Sinais com componentes de frequência fundamental e componentes de 7ª ordem harmônica equilibrada (seqüência positiva) – (a) representação das componentes nos sistemas $\alpha\beta$ e DQ, para um instante de tempo genérico, (b) representação das componentes no tempo.	65
Figura 5-7 – Representação da Norma Euclidiana Instantânea (a) – tensão com componente de frequência fundamental equilibrada (seqüência positiva), (b) – tensão com componente de frequência fundamental desequilibradas (seqüência positiva e negativa) e (c) – tensão com componente de frequência fundamental adicionada a 5ª harmônica equilibrada.	69
Figura 5-8 – Diferenças instantâneas absolutas entre a componente no eixo (d) em relação à NEI, obtidas para cada caso simulado.	70
Figura 6-1 - Diagrama de blocos para obter parâmetro de qualidade de desequilíbrio de frequência fundamental, de frequências harmônicas e parâmetro combinado, a partir do sistema de representação DQ.	74
Figura 6-2 - Diagrama de blocos para obter parâmetro de qualidade de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental, de frequências harmônicas e parâmetro combinado a partir da NEI.	79
Figura 7-1 – Elevação de temperatura em função do parâmetro de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental.	84
Figura 7-2 – Elevação de temperatura em função do parâmetro de distorção harmônica.	85
Figura 7-3 – Elevação de temperatura em função dos parâmetros FQu, FDu e FHu.	87
Figura 7-4 – Elevação de temperatura em função dos parâmetros FQu para diferentes coeficientes de ponderação.	89
Figura 7-5 – Tratamentos dos sinais de tensões e correntes adquiridas referente ao teste com 3% de desequilíbrio de frequência fundamental e 15% de amplitude de 5ª harmônica desequilibrada.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Seqüência de testes aplicados no ensaio 1 (Análise de desequilíbrio de fundamental e harmônicas equilibradas, separadamente).	35
Tabela 4-2 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 2 (Análise de harmônicas equilibradas 7ª e 11ª ordem).	36
Tabela 4-3 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 3 (Análise de harmônicas desequilibradas, 3ª e 5ª ordem).	36
Tabela 4-4 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 4 (Análise de harmônicas desequilibradas, 7ª e 9ª ordem).	37
Tabela 4-5 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 5 (Análise de harmônicas desequilibradas sem e com desequilíbrio de fundamental).	37
Tabela 4-6 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 6 (Análise de harmônicas desequilibradas com desequilíbrio de fundamental).	38
Tabela 4-7 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 7 (Análise de harmônicas desequilibradas com desequilíbrio de fundamental).	38
Tabela 4-8 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 8 (Análise de harmônicas equilibradas com desequilíbrio de fundamental).	39
Tabela 4-9 – Testes aplicados no ensaio 9 (Análise de harmônicas equilibradas com desequilíbrio de fundamental).	39
Tabela 4-10 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 10 (Análise de harmônicas equilibradas 2ª e 4ª ordem).	39
Tabela 7-1 – Parâmetros de Qualidade de Tensão	91
Tabela 7-2 – Valores eficazes das componentes de fase dos sinais registrados	95
Tabela 7-3 – Valores eficazes das componentes de seqüências dos sinais registrados	95
Tabela 7-4 – Parâmetros de qualidade calculados para os sinais registrados	96
Tabela 7-5 – Impedâncias de seqüência positiva e negativa calculadas	96

Resumo

Esta tese discute a necessidade de monitorar, além das tensões eficazes, os desequilíbrios de frequência fundamental e as distorções harmônicas de tensão. Apresenta uma forma alternativa para obter os parâmetros de desequilíbrios de frequência fundamental e de distorções harmônicas a partir da representação dos valores instantâneos no sistema de eixos (DQ) e norma Euclidiana instantânea (NEI). Como contribuição principal, o trabalho propõe obter um parâmetro de qualidade que combina os parâmetros de desequilíbrio e de distorção harmônica. A representatividade dos parâmetros de qualidade é analisada a partir de resultados de elevações de temperatura dos enrolamentos de um motor de indução obtidas de 60 horas de testes. Discute-se que uma das vantagens de obter um parâmetro de qualidade de tensão que combine os efeitos de desequilíbrios de frequência fundamental e distorções harmônicas é reduzir o número de parâmetros que devem ser monitorados, simplificando o processo de fiscalização que os órgãos reguladores procuram implantar. Além disso, o trabalho mostra análises sobre como os distúrbios na tensão afetam um motor de indução e prejudicam sua vida útil e mostra que há outras formas para se obter parâmetros de qualidade de tensão em relação aos métodos convencionais. Finalmente, apresenta a necessidade de estudos futuros para consolidar a proposta de um parâmetro de qualidade que combine os efeitos de distúrbios na tensão relacionados a outros equipamentos.

Abstract

This thesis outlines the need for monitoring voltage quality, namely fundamental frequency unbalance and harmonic distortions in addition to voltage regulation. It presents an alternative way to obtain voltage fundamental frequency unbalance and harmonic distortion parameters by using the DQ axes system representation applied to instantaneous values and the instantaneous Euclidean norm (IEN). As a main contribution, the work presents a quality parameter that combines the unbalance and harmonic distortion parameters. The representativeness of the quality parameters is analysed based on results of temperature rises in induction motor windings tested during 60 hours. An advantage of obtaining a voltage quality parameter that considers simultaneous effects of both fundamental frequency unbalance and harmonic distortion is the reduction in the number of monitored parameters, thus simplifying the controlling process that regulatory agencies seek to implement. Furthermore, this work shows some analyses on how the voltage disturbances affect an induction motor and reduce its lifetime and shows that there are other forms to compute voltage quality, which are alternatives to conventional methods. Finally, the need for further studies to consolidate the proposal of a quality parameter that combines voltage disturbances effects related to other pieces of equipment is discussed.

Capítulo I

1. QUALIDADE DE ENERGIA E MONITORAÇÃO

1.1.Introdução

Há, no Brasil, um aumento expressivo no interesse dos órgãos reguladores, das concessionárias de energia, dos centros de pesquisa e, principalmente, dos consumidores de energia elétrica pelo conhecimento das condições da qualidade de energia, tanto nos aspectos relativos à qualidade do serviço como nos aspectos da qualidade do produto da energia elétrica fornecida. Após a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e das agências reguladoras estaduais, um esforço muito grande tem sido feito pelos vários agentes envolvidos para definir medidas e estabelecer procedimentos que visam garantir os direitos dos consumidores, melhorando a qualidade do serviço e do produto, além de preservar os sistemas elétricos de fornecimento de energia. Embora a definição desses procedimentos seja uma tarefa bastante difícil, devido aos interesses conflitantes entre os agentes envolvidos, esses procedimentos são de fundamental importância para garantir a regulação dos serviços, através da criação, supervisão e controle de indicadores da qualidade da prestação de serviços e do produto de fornecimento da energia elétrica. Neste sentido, a exigência de índices de qualidade adequados, por parte dos órgãos reguladores, cria condições para preservar e melhorar a qualidade do serviço e a qualidade do produto de fornecimento de energia elétrica e, a par disso, preservar as empresas de serviços públicos sob controle do capital privado, garantindo, em consequência, um atendimento adequado aos clientes.

1.2. Conceitos de Qualidade de Energia

Pode-se definir um sistema trifásico de fornecimento de energia elétrica com qualidade máxima, quando: não ocorre interrupção no suprimento (continuidade do serviço) e quando as formas de onda das tensões fornecidas forem senoidais ao longo do tempo, com valores de amplitudes fixos e iguais aos valores nominais. A partir da definição anterior, qualquer alteração naqueles padrões produz uma degradação na qualidade do fornecimento de energia elétrica que afeta o desempenho do sistema elétrico como um todo. Pode-se distinguir e monitorar a qualidade do suprimento: a) quanto ao padrão de continuidade do serviço, e; b) quanto ao padrão da tensão de fornecimento referente à forma de onda.

No primeiro caso (caso a), monitoram-se ocorrências que provocam interrupções no fornecimento de energia. Obtêm-se, dessa monitoração, indicadores relativos à continuidade do serviço.

No segundo caso (caso b), ao se considerar o padrão de forma de onda da tensão de fornecimento, surge a necessidade de serem definidas outras categorias de fenômenos que são diferenciados em função de suas naturezas e durações e que podem ser separadas em fenômenos transitórios, de curta duração e de longa duração ou permanentes.

Os fenômenos transitórios são os que possuem as menores durações, em geral na faixa de alguns micro-segundos a alguns milésimos de segundos. De acordo com a sua natureza ou sua forma de onda, esses fenômenos podem ser divididos em

impulsivos (geralmente de origem atmosférica) e oscilatórios (geralmente resultados de chaveamentos ou outras situações em que há uma mudança súbita no regime permanente) [17].

Entende-se como variação de tensão de curta duração (VTCD) a variação no valor eficaz do sinal de tensão com duração compreendida entre 8,33 ms (0,5 ciclo de um sinal com frequência fundamental de 60 Hz) e 1 minuto [3]. Geralmente, essa variação no valor eficaz é resultado da variação na amplitude da forma de onda. Essas variações são capazes de sensibilizar dispositivos de proteção, desligando processos, ou afetar o funcionamento de equipamentos, podendo provocar grandes prejuízos a clientes conectados ao sistema de fornecimento de energia, devido à parada na produção ou comprometimento da qualidade da produção.

Os fenômenos de longa duração, ou comumente denominados de regime permanente, incluem as variações lentas nas amplitudes das tensões e variações nas formas de onda das tensões. Desses tipos de variações originam-se os fenômenos como variação dos níveis de tensão, distorção harmônica de tensão e desequilíbrio de tensão. Os fenômenos de longa duração também são caracterizados por valores eficazes. A forma de tratar os valores eficazes ao longo do tempo tenta representar efeitos de aquecimento térmico em equipamentos elétricos submetidos a condições não adequadas de fornecimento. As medições e apurações de indicadores relacionados a esses fenômenos considerando intervalos de tempo apropriados possibilitam avaliar os efeitos térmicos dos fenômenos sobre equipamentos elétricos com constantes de tempo térmicas bem diferentes, como equipamentos eletrônicos com constantes de tempo de 600 ms, pequenos

transformadores ou motores com constantes de tempo da ordem de 2 minutos e transformadores ou motores de maior porte com constantes de tempo térmica da ordem de 20 minutos a horas.

Uma outra categoria de indicadores é definida para flutuações rápidas na amplitude da tensão (modulação na amplitude da tensão com frequências entre 0 e 30 Hz). Essas flutuações dão origem a um fenômeno conhecido como cintilação (Flicker), que é o resultado da variação na luminância de lâmpadas elétricas, principalmente as incandescentes. Esse fenômeno relaciona-se à percepção visual do olho humano quando de oscilações da intensidade luminosa emitida por uma lâmpada incandescente, quando a amplitude de sua tensão de alimentação está sujeita a flutuações rápidas. Além do efeito de cintilação, as flutuações rápidas na amplitude da tensão causam também efeitos danosos sobre motores elétricos.

1.3. Objetivo do Trabalho

Há um grande número de trabalhos desenvolvidos na área de qualidade de energia elétrica dedicados exclusivamente para criar indicadores e definir limites adequados para os mesmos [6], [17], [28], [30] e [35]. Adequadamente, a ANEEL, em conjunto com as agências estaduais, definiu primeiro a criação de indicadores e limites relativos à continuidade do serviço e, em seguida, estabeleceu indicadores e limites para os níveis da tensão eficaz de fornecimento, contemplando efeitos térmicos de longa duração sobre equipamentos. Ainda faltam estabelecer indicadores e, eventualmente limites, para outros fenômenos como as variações de tensão de curta

duração e os desequilíbrios e distorção harmônica de tensão, contemplando também efeitos térmicos de longa duração. Excetuando-se o desequilíbrio de tensão, o qual resulta um único indicador para o sistema trifásico, os outros indicadores são estabelecidos para cada fase do sistema. É necessário, portanto, medir e apurar indicadores por fase. Disso resulta a necessidade de processar e armazenar grande quantidade de informações. Após apurar os indicadores das fases, é comum estabelecer como representativo o indicador da fase considerado mais severo, porque, em geral, é o que possui maior potencial de dano sobre equipamentos. Essa filosofia tende a ser conservativa em relação às cargas conectadas ao sistema, penalizando de certa forma as empresas distribuidoras. Nesse trabalho, serão discutidas a necessidade de monitoração de indicadores de desequilíbrios de tensão de frequência fundamental e também a possibilidade de obter um indicador que seja composto por desequilíbrio de tensão de frequência fundamental e por distorções harmônicas. O foco principal é mostrar a possibilidade de se obter um indicador que reflita os efeitos térmicos sofridos por motores trifásicos de indução quando submetidos a distúrbios de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental e distorções harmônicas na tensão, agindo simultaneamente.

Nesse trabalho pretende-se:

- a. mostrar a necessidade de medir e apurar indicadores de desequilíbrios de tensão de frequência fundamental reforçando as recomendações de outros trabalhos anteriores,

- b. contribuir mostrando a possibilidade de se obter um indicador que reflita efeitos de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental e distorções harmônicas de tensão;
- c. mostrar e usar possibilidades alternativas de obter os indicadores propostos por meio da transformada de Park e da norma Euclidiana instantânea;
- d. contribuir mostrando resultados de ensaios que demonstrem que o indicador proposto é representativo dos efeitos térmicos causados por desequilíbrios e distorções harmônicas combinados.

Embora o foco seja obter um indicador que reflita os efeitos térmicos sofridos pelos motores trifásicos de indução, sabe-se que esses distúrbios também afetam outros tipos de equipamentos como: inversores, transformadores e as próprias linhas de redes de distribuição.

1.4. Organização do Trabalho

O desenvolvimento desse trabalho se justifica porque mostra que é possível obter indicadores de qualidade de tensão capazes de refletir os efeitos degradantes que distúrbios na tensão causam sobre os motores trifásicos de indução conectados à rede de fornecimento de energia elétrica. Além disso, é feita proposta de um indicador de qualidade de tensão que combina os efeitos de distúrbios de desequilíbrios de frequência fundamental e distorções harmônicas agindo simultaneamente. Mostra também, por meio de ensaios práticos, que o indicador proposto reflete os efeitos térmicos causados pelos distúrbios na tensão e agrega resultados práticos a pesquisas já desenvolvidas. Neste trabalho propõe-se obter os

indicadores de qualidade de tensão a partir das representações nos sistemas de eixos ortogonais girantes e da norma Euclidiana instantânea, mostrando que também há outros métodos de cálculos de indicadores possíveis. Finalmente, mostra que o indicador proposto pode simplificar o processo de monitoração e fiscalização.

A seguir mostra-se como este trabalho foi organizado.

No capítulo I há uma descrição dos fenômenos relacionados à qualidade de energia elétrica apresentando conceitos básicos, além de apresentar os objetivos deste trabalho. O capítulo II mostra algumas razões que justificam o desenvolvimento deste trabalho a partir da análise de referências bibliográficas que tratam dos efeitos que distúrbios na tensão impõem sobre a elevação de temperatura de enrolamentos de motores de indução causando redução de vida desses equipamentos. No capítulo III são apresentadas avaliações sobre efeitos que distúrbios causam sobre os motores, porém considerando o aspecto de funcionamento físico da máquina de indução, também, a partir de análises de algumas referências bibliográficas importantes. O capítulo IV apresenta um procedimento para a realização de ensaios de elevação de temperatura dos enrolamentos de um motor de indução em função de distúrbios aplicados à sua tensão de alimentação. Além disso, também mostra análises dos resultados obtidos para as seqüências de testes aplicados, confrontando-os com resultados apresentados nas referências consultadas e indicadas no capítulo II. No capítulo V é feita a apresentação de duas formas para tratamento de sinais de tensão que permitem obter parâmetros de qualidade que representam os distúrbios que causam os efeitos térmicos nos enrolamentos dos motores de indução. No capítulo VI propõem-se duas formas para se obter os

parâmetros de qualidade de tensão. O capítulo VII mostra resultados de parâmetros de qualidade de tensão obtidos segundo os métodos propostos no capítulo V. Mostra-se também, como foram obtidas as constantes de ponderação utilizadas no cálculo do parâmetro de qualidade de tensão que combina efeitos dos distúrbios presentes na tensão de fornecimento. Também, no capítulo VII, são mostradas comparações dos valores dos parâmetros de qualidade de tensão, obtidos pelos métodos alternativos sugeridos e métodos convencionais, e também, algumas formas de ondas dos sinais em cada um dos sistemas de representação propostos. Finalmente, no capítulo VIII, são apresentadas as contribuições, as conclusões finais e recomendações para realização de estudos ulteriores.

Capítulo II

2. ASPECTOS RELEVANTES E JUSTIFICATIVOS

2.1. Limites Admissíveis de Tensão e Desequilíbrio

Conforme foi apresentado no capítulo I, a ANEEL já regulamentou alguns procedimentos para apuração de indicadores de continuidade de serviço e também quanto à amplitude da tensão eficaz de fornecimento. Para as variações de tensão de longa duração a Agência reguladora estabeleceu, através da resolução 505/2001 [35], os procedimentos e limites admissíveis para valores eficazes dos níveis de tensão. Foram definidos limites que estabelecem faixas de valores nas quais as tensões das fases são consideradas como: adequadas, precárias e críticas, em valores inferiores e superiores. No nível de baixa tensão, os valores eficazes das tensões nas fases são considerados adequados se estiverem dentro da faixa limite entre +5% e -8,5% da tensão nominal de referência. Essa é uma faixa bastante ampla, de 13,5%, de valores admissíveis das tensões nas fases. Essa faixa tão ampla pode levar a situações inaceitáveis considerando a diferença de amplitude de tensão que pode ocorrer entre as tensões das fases de um sistema trifásico, ou seja, provocando desequilíbrios de tensão. Essas possíveis diferenças de amplitudes que podem ocorrer causam outro problema que é considerado sério, os desequilíbrios de correntes em cargas como motores trifásicos (entre outras cargas trifásicas sensíveis) que podem levá-los a danos irreversíveis. Desvios entre os valores das tensões das fases superiores a 5% são considerados elevados e intoleráveis por

períodos de tempo longos, isso porque, causariam desequilíbrios de seqüência negativa superiores aos limites recomendados pelas normas [17] e [32].

Considerando os aspectos ressaltados anteriormente, justifica-se a necessidade de monitorar, além dos níveis de tensão das fases, os valores dos desequilíbrios de tensão ou desvios entre os valores das tensões das fases.

Para a avaliação do desempenho de um sistema de fornecimento trifásico, quanto aos padrões de conformidade da tensão de fornecimento, no qual estejam presentes cargas monofásicas e trifásicas, é necessário medir e apurar além dos indicadores do nível de tensão eficaz das fases, também os indicadores de desequilíbrio de tensão. Isso confirma a necessidade de monitoração deste indicador.

2.2. Perda de Vida de Motores Devido a Distúrbios na Tensão

Vários livros textos de máquinas elétricas [14], [22] e [23] ressaltam que uma das mais importantes restrições para a aplicação de motores, transformadores, entre outros equipamentos, é saber qual a máxima potência que pode ser entregue pelo equipamento. Isso depende de vários fatores, mas, a principal questão é que a vida útil desses equipamentos não deve ser comprometida por sobreaquecimentos indevidos. A elevação de temperatura de uma máquina depende das perdas desenvolvidas e da capacidade de dissipação dessas perdas. Então, qualquer distúrbio que aumente as perdas causa uma redução da potência de saída admissível da máquina considerada, a fim de que seja preservada a sua vida útil.

A seguir, estão relatados alguns estudos feitos para averiguar os impactos na vida útil de motores de indução, devido aos distúrbios relativos a distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão de frequência fundamental.

J. P. G. de Abreu [1] mostrou, em um estudo publicado em 2000, a partir de simulações utilizando um modelo térmico de transferência de calor, o efeito nocivo que os desequilíbrios e as distorções harmônicas de tensão causam sobre a isolamento dos motores de indução. No desenvolvimento desse estudo, está relatado que há dois outros estudos adicionais preliminares que foram feitos e consultados. No primeiro estudo por P. G. Cumming [10], publicado em 1985, apresenta-se uma expressão aproximada que indica o aumento adicional de perdas, nos enrolamentos do estator de um motor de indução, causadas pela presença de distorções harmônicas na tensão. O segundo estudo, apresentado em 1986 por E. F. Fuchs, D. J. Roesler e K.P. Kovacs [13], mostra outra expressão para o aumento das perdas causadas pela presença de harmônicas na tensão, porém, essa expressão foi normalizada em função dos parâmetros de um motor de indução. Ainda, segundo [1], os resultados obtidos por meio de ambas as expressões são bastante próximos um do outro, o que ratifica os resultados obtidos. Além disso, em [1] foi observado, também, que nos dois estudos citados [13] e [10] não foram incluídos desequilíbrios de tensão e que em [10] foram incluídas harmônicas apenas de ordens superiores à 5ª, apesar de ser freqüente, nos espectros das tensões de fornecimento em baixa tensão (distribuição), a presença de harmônicas de ordens inferiores e com seqüências positiva e negativa. Finalmente, em [13], há uma explanação completa do mecanismo de perda de vida da isolamento do motor devido à elevação de temperatura causada por harmônicas na tensão.

Ainda de acordo com [1], havia a necessidade de se incluir, nas avaliações de perda de vida do motor, a influência de desequilíbrios de tensão além de harmônicas de ordens inferiores à 5ª, inclusive sub-harmônicas. Esse estudo de perda de vida foi feito para motores de 2, 10, 30, 100 e 200 HP. Todos os motores foram considerados com carga constante de 75% da sua capacidade nominal e temperatura ambiente de 30 °C. A obtenção da expectativa de vida do motor foi baseada nas curvas experimentais de envelhecimento detalhadas por E. Brancato [4] e [5] e incluídas no IEEE Std. 117 [19]. As conclusões obtidas em [1] revelam uma preocupante perda de vida dos motores em condições reais de operação. Os resultados mostram forte influência de sub-harmônicas sobre os motores. Segundo esse estudo, a presença de 0,25% de amplitude de uma sub-harmônica de ordem 0,1 (6 Hz) pode levar um motor de 100 HP a perder 18% de sua vida. Apesar, de ter verificado que as sub-harmônicas são muito prejudiciais aos motores de indução, esse fenômeno não foi abordado nesta tese devido à dificuldade de realização de ensaios práticos desse fenômeno. As outras ordens harmônicas consideradas também podem causar perdas de vida elevadas dos motores de indução. Ainda de acordo com [1], com relação à presença apenas de desequilíbrios de tensão na frequência fundamental, um grau de desequilíbrio¹ de 2% pode levar o motor de 100 HP a perder 22,2% de sua vida útil.

Além desse trabalho, o EPRI (PEAC) fez o levantamento da curva de temperatura de operação de motores quando alimentados por um sistema trifásico desequilibrado [17]. Os resultados obtidos de testes experimentais foram utilizados para o levantamento de curvas que relacionaram a elevação de temperatura do motor e o

¹ Em todo o texto desta tese o grau ou fator de desequilíbrio de tensão (k) deve ser entendido como a razão entre o módulo da componente de sequência negativa pelo módulo da componente de sequência positiva obtidos das tensões das fases ou linhas, dado em percentagem.

fator de desequilíbrio de tensão na frequência fundamental. A curva de elevação de temperatura obtida para motores classe A aproxima-se de uma reta com coeficiente angular de $1,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ para cada aumento de 1% no grau de desequilíbrio de tensão. Já para motores classe F esse coeficiente foi de $1,54\text{ }^{\circ}\text{C}$ para cada aumento de 1% no valor do grau de desequilíbrio. Para o levantamento dessas curvas, o motor foi mantido em plena carga.

A análise das conclusões e a observação dos resultados obtidos pelos estudos [1], [5], [13] e [17] e citados anteriormente, se confirmadas, justificam a realização de um trabalho que proponha um parâmetro de qualidade de tensão que reflita os efeitos térmicos sobre motores de indução devido à presença de distúrbios como desequilíbrios e distorções harmônicas na tensão agindo simultaneamente. Isso porque, na realidade, os motores estão sujeitos a condições de desequilíbrios e harmônicas, simultaneamente. A partir dessas considerações, pode-se concluir que há a necessidade de investigar melhor as condições de padrão de fornecimento de energia, ou seja, de se estabelecer e monitorar os padrões de qualidade de energia com relação aos desequilíbrios de tensão em condições distorcidas.

Capítulo III

3. EFEITOS DE DISTÚRBIOS NA TENSÃO EM MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO

3.1. Generalidades

Em (Wakileh, G, J., 2001) [37] estão resumidos os efeitos de harmônicas sobre diversos equipamentos conectados a um sistema de potência. A partir dessa referência, são colocados a seguir os principais efeitos ocorridos em máquinas rotativas, principalmente sobre os motores de indução.

- aumento nas perdas no cobre e no ferro que resultam no aumento da temperatura de operação das máquinas. Essas perdas são similares às que ocorrem em transformadores e possuem mesmo procedimento de cálculo.
- pulsações de torque são produzidas devido à interação entre campos magnéticos gerados por componentes harmônicas e fundamentais, havendo nesses casos aumento no nível de ruído audível.

Harmônicas equilibradas de seqüência positiva criam campos magnéticos que giram à frequência $h.f_0$ em relação ao estator ou $(h-1).f_0$ em relação ao campo do rotor. Por outro lado, harmônicas equilibradas de seqüência negativa criam campos magnéticos que giram à frequência $h.f_0$ em relação ao estator ou $(h+1).f_0$ em relação ao campo do rotor. Tanto as harmônicas de seqüência positiva como as de

seqüência negativa produzem pulsações de campo magnético cujos efeitos são equivalentes.

O motor de indução trifásico possui funcionamento similar ao transformador, razão pelas quais seus circuitos equivalentes são similares. As diferenças fundamentais entre esses equipamentos residem no fato de existir nos motores um entreferro entre os enrolamentos do primário (estator) e secundário (rotor) e do rotor girar em relação ao estator. Essas diferenças alteram o processo fundamental de conversão de energia, que, no motor, é da forma elétrica para mecânica além de alterações significativas nos parâmetros que compõem o circuito equivalente desses motores. Os parâmetros do circuito equivalente do motor que são significativamente alterados na presença de harmônicas são a reatância de dispersão do estator e a reatância de dispersão do rotor, sendo esse último também dependente do escorregamento. Esses parâmetros correspondem aos ramos que dependem da carga e estão em série no circuito equivalente. Considerando os parâmetros que representam o núcleo ferromagnético, aquele que é significativamente alterado devido à presença do entreferro é o que representa a magnetização do núcleo. Isto se deve ao fato de que a reatância de magnetização de um motor é bastante reduzida, quando comparada à do transformador, o que exige uma corrente de magnetização maior, da ordem de 60% da corrente nominal da máquina.

Nos itens subseqüentes, são feitos comentários e deduções relativos aos efeitos de harmônicas e desequilíbrios de tensão sobre os parâmetros do circuito equivalente de motores de indução.

Um dos aspectos do trabalho desta tese é avaliar como distúrbios na tensão de alimentação de motores trifásicos causam aumento de perdas elétricas, com conseqüente aumento na temperatura de funcionamento desses motores, que podem reduzir a vida útil desses equipamentos.

O circuito equivalente de motores de indução utilizado para a análise do funcionamento em regime permanente de operação para a frequência fundamental é mostrado na Figura 3-1 [37].

Figura 3-1 - Circuito equivalente para motor de indução trifásico

Os parâmetros mostrados nesse circuito são:

- R_p - resistência equivalente de perdas no ferro,
- X_m - reatância equivalente de magnetização do núcleo,
- R_e e R'_r - resistências ôhmicas do estator e do rotor referida ao estator,
- X_e e X'_r - reatâncias de dispersão do estator e do rotor referida ao estator,
- $\left(\frac{1-s}{s}\right)R'_r$ - resistência que representa a potência mecânica desenvolvida no eixo da máquina e que é função do escorregamento,
- s - escorregamento.

A partir do circuito equivalente apresentado, são feitas análises para verificar as possíveis alterações nos parâmetros desse circuito decorrentes de distúrbios na tensão de alimentação.

3.2. Efeitos de Tensões Harmônicas nos Parâmetros do Circuito Equivalente de Motores de Indução

A seguir são feitas considerações sobre os efeitos de tensões harmônicas presentes na tensão de alimentação de motores de indução. São feitas inicialmente considerações sobre o ramo paralelo do circuito equivalente que representa o núcleo ferromagnético e, em seguida, sobre os parâmetros que ficam em série nesse mesmo circuito equivalente.

3.2.1. Ramo Paralelo do Circuito Equivalente

Perdas no Ferro

As perdas nos núcleos ferromagnéticos são divididas em duas categorias: as perdas por histerese e as perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault). Essas perdas reduzem a eficiência das máquinas devido à elevação de temperatura dos núcleos ferromagnéticos e limitam a potência de saída (Wakileh, G, J., 2001) [37] e (Jordão, G. R., 2001) [22].

Perdas por Histerese

As perdas por histerese são devidas à magnetização do núcleo ferromagnético em regime alternado e dependem do volume e qualidade do material do núcleo, do valor máximo da indução e também do valor da frequência [22]. Essas perdas podem ser expressas pela fórmula empírica de Steinmetz. Para a frequência fundamental a fórmula é:

$$Ph_1 = \eta \, v \, f_0 \, Bm_1^{\nu} \quad (3.1)$$

onde:

- η - coeficiente de perdas por histerese, relacionado a área do ciclo de histerese que depende do material utilizado no núcleo considerado,
- v - volume útil de material laminado,
- f_0 - frequência fundamental da tensão,
- Bm_1 - valor máximo da indução magnética,
- ν - expoente dependente do material usado no núcleo, usualmente de valor 1,6.

A expressão (3.1) pode ser modificada colocando a indução em função da tensão. Neste caso, as perdas por histerese para a frequência fundamental ficam expressas pela fórmula:

$$Ph_1 = \eta \, v \, f_0 \left(\frac{U_1 \, A}{4,44 \, f_0 \, N} \right)^{\nu} \quad (3.2)$$

onde:

- U_1 - valor eficaz da tensão de frequência fundamental,

- N - número de espiras do enrolamento considerado,
 A - área do núcleo,

Admitindo linearidade, ou seja, desprezando o efeito de saturação magnética para os níveis de tensões harmônicas esperados na rede, pode-se então estender a expressão das perdas por histerese (3.2) para tensões harmônicas para a seguinte:

$$Ph_h = \eta \nu h f_0 \left(\frac{U_h A}{4,44 h f_0 N} \right)^v \quad (3.3)$$

onde:

h – é a ordem da frequência harmônica considerada

A razão entre as expressões (3.3) e (3.2) mostra como as tensões harmônicas podem influir nas perdas por histerese. Essa relação é:

$$ph_{h_{pu}} = \frac{Ph_h}{Ph_1} = h \left(\frac{U_h}{h U_1} \right)^v = h \left(\frac{u_h}{h} \right)^v \quad (3.4)$$

onde: $u_h = \frac{U_h}{U_1}$ é o valor da tensão harmônica em por unidade da tensão de frequência fundamental.

A expressão (3.4) é o valor por unidade da perda por histerese na frequência harmônica em relação à perda por histerese obtida à tensão nominal de frequência fundamental.

A potência total perdida por histerese magnética pode ser expressa (ainda em pu) como:

$$ph_{pu} = \sum_{h=1}^{\infty} h \left(\frac{u_h}{h} \right)^v = 1 + \sum_{h=2}^{\infty} h \left(\frac{u_h}{h} \right)^v = 1 + \Delta ph \quad (3.5)$$

A parcela Δph corresponde ao aumento de perdas por histerese devido à presença de harmônicas na tensão, que pode ser expresso como:

$$\Delta ph = \sum_{h=2}^{\infty} h \left(\frac{u_h}{h} \right)^v \quad (3.6)$$

Para ilustrar como ocorre o aumento das perdas por histerese em função da amplitude e ordens harmônicas na tensão, foram realizadas simulações e obtidas curvas do aumento de perdas em função da ordem harmônica para várias amplitudes harmônicas. Foram obtidas curvas para amplitudes harmônicas de tensão variando de 0,05 pu a 0,25 pu da tensão nominal da fundamental em passos de 0,05 pu. O aumento nas perdas por histerese foi calculado para cada amplitude harmônica, para ordens harmônicas variando da 3ª a 25ª. O gráfico da Figura 3-2 mostra o aumento das perdas obtido em cada caso. Nota-se, nessas curvas, que a perda por histerese aumenta com o aumento da amplitude da tensão harmônica e reduz com o aumento da ordem harmônica.

É importante salientar que nessas avaliações não foi considerada a saturação do núcleo ferromagnético, ou seja, considerou-se que a relação entre a indução e o campo seja linear para os níveis de tensão simulados.

Figura 3-2 – Curvas do aumento de perdas por histerese em função da ordem harmônica para várias amplitudes de tensão harmônica

Perdas por correntes parasitas

O valor das perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault) para a frequência fundamental [22] pode ser obtido pela expressão:

$$Pf_1 = K_f \nu f_0^2 Bm_1^2 \quad (3.7)$$

onde:

K_f - coeficiente de perdas por correntes parasitas característico do material ferromagnético.

Analogamente ao que se fez para as perdas por histerese, a expressão (3.7) pode ser modificada para evidenciar a tensão. Neste caso a perda por correntes parasitas para a frequência fundamental resulta:

$$Pf_1 = K_f \cdot \nu \cdot f_0^2 \cdot \left(\frac{U_1 \cdot A}{4,44 \cdot f_0 \cdot N} \right)^2 \quad (3.8)$$

Para tensões harmônicas as perdas por correntes parasitas podem então ser expressas pela fórmula:

$$Pf_h = K_f \cdot \nu \cdot h^2 \cdot f_0^2 \cdot \left(\frac{U_h}{4,44 \cdot h \cdot f_0 \cdot N} \right)^2 \quad (3.9)$$

Seguindo os mesmos passos feitos para as perdas por histerese, obtém-se a expressão que revela o aumento das perdas por correntes parasitas em função de tensões harmônicas.

$$\Delta pf = \sum_{h=2}^{\infty} u_h^2 \quad (3.10)$$

A partir da expressão (3.10), nota-se que o aumento das perdas por correntes parasitas depende do quadrado das amplitudes das harmônicas presentes na tensão.

Perdas no ferro totais

O incremento das perdas totais no ferro, considerando as perdas por histerese e as perdas por correntes parasitas, em função da ordem harmônica, podem ser expressas pela fórmula:

$$\Delta pFe_h = \sum_{h=2}^{\infty} \left[h \left(\frac{u_h}{h} \right)^v + u_h^2 \right] \quad (3.11)$$

Para ilustrar o efeito combinado das perdas por histerese e por correntes parasitas agindo simultaneamente, repetiu-se a simulação mostrada na Figura 3-2 e obteve-se o efeito combinado das perdas. A Figura 3-3.a mostra as curvas de aumento das perdas por histerese mais Foucault no ferro e a Figura 3-3.b mostra as curvas considerando apenas as perdas por histerese. Nota-se que o aumento nas perdas no ferro na presença de tensões harmônicas é relativamente pequeno, desde que as amplitudes das tensões harmônicas também sejam de valores baixos, o que em geral é, de fato, verdadeiro.

Figura 3-3 – Curvas do aumento de perdas no ferro em função da ordem harmônica para várias amplitudes de tensão harmônica - (a) perdas no ferro totais - (b) perdas por histerese.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 3-3.a e considerando que as amplitudes das harmônicas presentes nas tensões nos sistemas de distribuição são, em geral, de valores baixos, pode-se concluir que o aumento das perdas no ferro devido a esse distúrbio é pequeno e não deve ser responsável por elevação de temperatura apreciável de máquinas que possuam circuitos ferromagnéticos como

motores e transformadores, entre outros, embora contribua para a elevação de temperatura total de operação.

Dessa análise é possível concluir que o parâmetro do circuito equivalente representativo das perdas no ferro é pouco influenciado pela presença de harmônicas nas tensões de alimentação dos motores.

Possivelmente por essa razão, em algumas referências como em (Wakileh, G, J., 2001) [37] é negligenciada a influência de harmônicas nesse parâmetro, que representa a perda no ferro de núcleos ferromagnéticos.

Magnetização

A magnetização do núcleo é obtida por meio de uma força magneto-motriz que impõe ao núcleo um campo magnético que estabelece o fluxo mútuo necessário à criação da força contra-eletromotriz que equilibra a corrente do primário (estator). Devido à presença do entreferro, a relutância do circuito magnético é bastante elevada, o que exige elevada corrente de magnetização. No circuito equivalente, o parâmetro representativo da corrente de magnetização necessária à criação do campo é uma reatância indutiva (X_m) colocada em paralelo no circuito equivalente conforme Figura 3-1. A reatância de magnetização é diretamente proporcional à frequência. Nesse caso, quanto maiores as frequências harmônicas presentes nas tensões, maior será a reatância de magnetização.

3.2.2. Ramo Série do Circuito Equivalente

No circuito equivalente os ramos colocados em série são influenciados pelas frequências harmônicas assim como pela presença de desequilíbrios de seqüência negativa nas tensões. Tanto as resistências como as indutâncias e reatâncias se alteram com o aumento da frequência.

Impedância do Circuito Equivalente

Para analisar o efeito que o desequilíbrio de frequência fundamental e as distorções harmônicas provocam, no motor, é empregada a expressão da impedância equivalente do motor vista dos seus terminais de entrada que incorpora os distúrbios presentes na tensão.

A partir do circuito equivalente do motor de indução da Figura 3-1 e considerando o desenvolvimento apresentado em (Wakileh, G. J., 2001) [37] as impedâncias do estator e do rotor associadas à carga e a do circuito de magnetização são:

$$Z_e = R_e + jX_e \quad (3.12)$$

$$Z_r'(s) = \frac{R_r'}{s} + jX_r' \quad (3.13)$$

$$Z_m = \frac{R_p jX_m}{R_p + jX_m} \quad (3.14)$$

O motor de indução pode ser conectado em estrela isolada ou em triângulo. Em qualquer desses casos a impedância de seqüência zero é infinita, pois não há, nessas ligações, caminho para circulação das correntes de seqüência zero.

$$Z_0 = \infty \quad (3.15)$$

As impedâncias de seqüência positiva e negativa são obtidas por:

$$Z_1 = Z_e + \frac{Z_m Z_r'(s_1)}{Z_m + Z_r'(s_1)} \quad (3.16)$$

$$Z_2 = Z_e + \frac{Z_m Z_r'(s_2)}{Z_m + Z_r'(s_2)} \quad (3.17)$$

Os escorregamentos de seqüência positiva e negativa são dados por:

$$s_1 = 1 - \frac{n}{n_s} \quad (3.18)$$

$$s_2 = 1 + \frac{n}{n_s} = 2 - s_1 \quad (3.19)$$

onde:

n – é a velocidade do rotor [rpm],

n_s – é a velocidade síncrona do campo girante do estator [rpm].

Negligenciado o efeito da resistência de perdas no ferro R_p , e os efeitos das freqüências harmônicas sobre as resistências R_e e R_r' , na presença de harmônicas, os valores das impedâncias de seqüência zero, positiva e negativa de um motor de

indução obtidas a partir de (Wakileh, G. j., 2001) [37] e do circuito equivalente da Figura 3-1 resultam:

$$\left\{ \begin{array}{ll} Z_0 = \infty & h = 3i \\ Z_1 = (R_e + j h X_e) + \frac{j h X_m \left(\frac{R_r}{s_1} + j h X'_r \right)}{\frac{R_r}{s_1} + j h (X_m + X'_r)} & s_1 = 1 - \frac{n}{h n_s} \\ & h = 3i + 1 \\ Z_2 = (R_e + j h X_e) + \frac{j h X_m \left(\frac{R_r}{s_2} + j h X'_r \right)}{\frac{R_r}{s_2} + j h (X_m + X'_r)} & s_2 = 1 + \frac{n}{h n_s} \\ & h = 3i - 1 \end{array} \right. \quad (3.20)$$

onde:

- Z_0 - é a impedância de seqüência zero,
- Z_1 - é a impedância de seqüência positiva,
- Z_2 - é a impedância de seqüência negativa,
- $h = 3i$ - representam harmônicas de seqüência zero,
- $h = 3i+1$ - representam harmônicas de seqüência positiva,
- $h = 3i-1$ - representam harmônicas de seqüência negativa,
- $i = 1, 2, 3, \dots$

A equação (3.20) considera apenas harmônicas equilibradas. No caso de harmônicas desequilibradas, as impedâncias de seqüência positiva e negativa são

as mesmas indicadas nesta equação, porém, sem a restrição quanto às ordens harmônicas.

Utilizando valores típicos dos parâmetros de um motor de indução, em valores por unidade, foram calculados, a partir da equação (3.20), os valores do escorregamento, impedância do rotor e impedância de entrada do motor em função da ordem harmônica, para as seqüências positiva e negativa. Foi considerado, nos cálculos, o motor operando com escorregamento de seqüência positiva de fundamental de 1%. A Figura 3-4.a mostra os escorregamentos, a Figura 3-4.b as impedâncias do rotor e a Figura 3-4.c as impedâncias total obtidas para cada ordem harmônica.

Figura 3-4 – Variação dos parâmetros do motor em função da ordem harmônica: (a) - escorregamento, (b) - impedância do rotor e (c) - impedância de entrada do motor.

Analisando as impedâncias para cada ordem harmônica nota-se que apenas para a frequência fundamental a impedância de seqüência negativa é bastante inferior à

impedância de seqüência positiva (para este caso redução da ordem de 3,4 vezes entre os valores das impedâncias de seqüência positiva e negativa). Entretanto, para ordens harmônicas a partir da 2ª ordem harmônica, praticamente já não existe diferença entre os valores das impedâncias de seqüências positiva e negativa. Isto ocorre porque a resistência do rotor que inclui a potência mecânica transferida à carga, que é fortemente afetada pelo escorregamento, tem pequeno peso no cômputo da impedância do rotor prevalecendo o peso da reatância. Além disso, quanto maior a ordem harmônica mais os escorregamentos de seqüência positiva e negativa se aproximam um do outro, e, maior é a impedância equivalente resultante.

O fato de a impedância de seqüência negativa para a freqüência fundamental ser muito inferior à impedância de seqüência positiva explica porque os motores de indução trifásicos são tão suscetíveis a tensões de seqüência negativa, ou seja, ao grau de desequilíbrio de freqüência fundamental da tensão de entrada. Neste caso, um pequeno valor de amplitude de tensão de seqüência negativa pode resultar num valor elevado de corrente de seqüência negativa, causando, em consequência, forte desequilíbrio de corrente e prejudicando o funcionamento do motor e do sistema de fornecimento. O forte desequilíbrio de corrente que pode resultar de um pequeno desequilíbrio de tensão de freqüência fundamental causa, entre outros efeitos, uma elevação de temperatura dos enrolamentos do estator que pode vir a reduzir, em consequência, a vida útil da máquina.

Em relação aos efeitos de distorções harmônicas de tensão sobre os motores de indução pode-se citar também a norma NEMA [31], que sugere a aplicação de um fator de redução da capacidade de potência de um motor em função da distorção de

tensão ao qual está submetido. Segundo essa norma, um motor de indução trifásico submetido a uma distorção de tensão de 5% deve ter sua capacidade reduzida a aproximadamente 95% a fim de preservar sua vida útil.

Para efeitos de desequilíbrio de tensão de seqüência negativa de frequência fundamental, a norma NEMA [32] recomenda que, para um motor de indução trifásico submetido a um desequilíbrio de tensão de seqüência negativa de 5%, o motor deve ter sua capacidade reduzida a aproximadamente 75% a fim de preservar sua vida útil.

No capítulo V são apresentadas formas de representação das grandezas de um sistema trifásico de fornecimento que possibilitam obter parâmetros de qualidade de tensão que refletem os efeitos térmicos degradantes que os distúrbios nas tensões causam nos motores de indução.

Capítulo IV

4. TESTES DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM MOTOR DE INDUÇÃO

4.1. Introdução

Considerando que o objetivo deste trabalho é analisar a possibilidade de se obter um indicador de qualidade que reflita a elevação de temperatura que pode ocorrer nos enrolamentos de um motor de indução devido a distúrbios simultâneos de desequilíbrios de frequência fundamental e harmônicas presentes num sistema de tensão trifásico, foram feitos vários ensaios a fim de relacionar a elevação de temperatura a tais distúrbios. Estes ensaios permitirão, no capítulo VII, avaliar, e validar o(s) indicador(es) de qualidade de tensão proposto(s).

4.2. Montagens para Realização dos Testes

Para melhor caracterizar a necessidade de apuração de indicadores de desequilíbrio e também de distorção harmônica de tensão fez-se uma seqüência de testes em um pequeno motor de indução trifásico. O motor submetido aos testes supria a carga de uma ventoinha comumente usada em sistemas de refrigeração. O motor usado possui as seguintes características: tensão de linha 220 V, potência mecânica 1 cv, frequência 60 Hz, fator de serviço 1,15, fator de potência 0,85, e rendimento 85%. Foram instalados nesse motor três sensores de temperatura (termopares do tipo k) alojados dentro dos canais do estator, em contato direto com os condutores das

espiras do enrolamento do estator. Os três sensores foram colocados separados de forma simétrica, a fim de se obter uma distribuição da temperatura dos enrolamentos em posições diferentes no estator da máquina. A Figura 4-1 mostra um esquema da montagem feito para obter a temperatura dos enrolamentos do estator.

Figura 4-1 – Esquema de fixação de termopares no estator do motor submetido aos testes

Após a inclusão dos termopares no motor, procedeu-se à montagem de um sistema para adquirir os valores de temperatura (três internas ao motor, conforme indicado na Figura 4-1 e também a temperatura ambiente), além das tensões de linha aplicadas ao motor e das correntes de fase absorvidas pelo motor. O sistema de monitoração utilizado para o registro das medições durante os testes foi um sistema desenvolvido por (Duarte, 2000) [12].

A Figura 4-2 mostra o esquema de ligações montado para o levantamento das características de elevação de temperatura do motor em função de distúrbios

impostos à tensão de alimentação do motor (desequilíbrio na frequência fundamental, distorções harmônicas e desequilíbrio em tensões harmônicas). Os sinais de temperaturas, tensões e correntes durante os testes foram monitorados e registrados por meio de um programa de computador desenvolvido especificamente para esse fim, em linguagem “LabView” [26]. A fonte geradora de sinais controlados tem capacidade de potência de 9 kVA e tensão de até 270 V, valor eficaz. Nessa fonte é possível controlar as amplitudes, frequências e ângulos dos sinais de tensão por fase, além do ângulo inicial para cada ordem harmônica. O limite de frequência harmônica superior é de 5 kHz. Cada fase é controlada de forma independente das outras duas.

Figura 4-2 – Esquema de ligações para o levantamento das características de elevação de temperatura de um motor frente a distúrbios na tensão de alimentação

4.3. Caracterização dos Testes

O objetivo dos testes foi levantar as características de elevação de temperatura dos enrolamentos de um motor de indução quando submetido a distúrbios na sua tensão

de alimentação. Os testes foram aplicados em intervalos de tempo equivalentes a cinco constantes de tempo térmica do motor, após o motor ter atingido regime térmico. Antes da aplicação da seqüência de testes considerando distúrbios na tensão, foi feito o levantamento da constante de tempo térmica do motor. O valor obtido para essa constante de tempo térmica foi de 12 minutos. A Figura 4-3 mostra a curva de elevação de temperatura obtida e utilizada para se determinar a constante de tempo térmica do motor submetido aos testes.

Figura 4-3 - Curva de elevação de temperatura, dos enrolamentos do estator do motor, para aplicação de tensão trifásica equilibrada e nominal apenas com sinal de freqüência fundamental.

Após a obtenção da constante de tempo, foram feitas dez seqüências de testes, dez ensaios, alterando os distúrbios impostos à tensão entre desequilíbrio de fundamental, distorções harmônicas e a combinação de desequilíbrios e harmônicas. A primeira seqüência de teste é descrita a seguir.

O primeiro ensaio, 1º seqüência, constituiu-se de seis testes consecutivos com durações de 1 h aproximadamente. A seqüência do ensaio 1 foi:

- a) aplicação de tensão trifásica equilibrada por um período de 65 min, tempo suficiente para estabilização térmica;
- b) sem desligar o motor foi provocado um desequilíbrio de tensão com fator de desequilíbrio da ordem de 3% por um período de 75 min;
- c) na seqüência, o fator de desequilíbrio foi elevado para aproximadamente 5% e mantido nesse valor por um período de 60 min;
- d) sem desligar o motor foi aplicada uma tensão com frequência fundamental equilibrada adicionada de 5% de 5ª ordem harmônica também equilibrada, por um período de 60 min;
- e) em seguida a amplitude de 5ª ordem harmônica foi elevada para 10 % e mantida assim por mais 60 min;
- f) finalmente, a amplitude de 5ª ordem harmônica foi novamente aumentada para 20 % por mais 60 min;

A Tabela 4-1 a seguir mostra a seqüência de testes aplicados no ensaio 1.

Tabela 4-1 - Seqüência de testes aplicados no ensaio 1 (Análise de desequilíbrio de fundamental e harmônicas equilibradas, separadamente).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	65	Sem distúrbio
B	3	-	-	-	75	Desequilíbrio de fundamental
C	5	-	-	-	60	Desequilíbrio de fundamental
D	0	AB,BC,CA	5	5	60	Harmônicas equilibradas
E	0	AB,BC,CA	5	10	60	Harmônicas equilibradas
F	0	AB,BC,CA	5	20	60	Harmônicas equilibradas

As Tabelas de 4-2 a 4-10 resumem as seqüências de testes aplicados nos outros nove ensaios.

Tabela 4-2 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 2 (Análise de harmônicas equilibradas 7ª e 11ª ordem).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	60	Sem distúrbio
B	0	AB,BC,CA	7	5	60	Harmônicas equilibradas
C	0	AB,BC,CA	7	10	60	Harmônicas equilibradas
D	0	AB,BC,CA	7	20	60	Harmônicas equilibradas
E	0	AB,BC,CA	11	5	60	Harmônicas equilibradas
F	0	AB,BC,CA	11	10	60	Harmônicas equilibradas
G	0	AB,BC,CA	11	20	60	Harmônicas equilibradas
H	0	AB,BC,CA	5,7,11	10	60	Harmônicas equilibradas

Tabela 4-3 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 3 (Análise de harmônicas desequilibradas, 3ª e 5ª ordem).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	60	Sem distúrbio
B	0	AB,CA	3	5	60	Harmônicas desequilibradas
C	0	AB,CA	3	10	80	Harmônicas desequilibradas
D	0	AB,CA	3	15	60	Harmônicas desequilibradas
E	0	AB,CA	5	5	60	Harmônicas desequilibradas
F	0	AB,CA	5	10	60	Harmônicas desequilibradas
G	0	AB,CA	5	20	60	Harmônicas desequilibradas

Tabela 4-4 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 4 (Análise de harmônicas desequilibradas, 7ª e 9ª ordem).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	60	Sem distúrbio
B	0	AB,CA	7	5	60	Harmônicas desequilibradas
C	0	AB,CA	7	10	60	Harmônicas desequilibradas
D	0	AB,CA	7	20	60	Harmônicas desequilibradas
E	0	AB,CA	9	5	60	Harmônicas desequilibradas
F	0	AB,CA	9	10	60	Harmônicas desequilibradas
G	0	AB,CA	9	20	60	Harmônicas desequilibradas

Tabela 4-5 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 5 (Análise de harmônicas desequilibradas sem e com desequilíbrio de fundamental).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração Aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	60	Sem distúrbio
B	0	AB,CA	11	5	60	Harmônicas desequilibradas
C	0	AB,CA	11	10	60	Harmônicas desequilibradas
D	0	AB,CA	11	20	80	Harmônicas desequilibradas
E	3	AB,CA	3	5	60	Desequilíbrio de Fundamental e de Harmônicas
F	5	AB,CA	3	10	60	Desequilíbrio de Fundamental e de Harmônicas
G	3	AB,CA	3	15	60	Desequilíbrios de Fundamental e de Harmônicas

Tabela 4-6 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 6 (Análise de harmônicas desequilibradas com desequilíbrio de fundamental).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	108	Sem distúrbio
B	3	AB,CA	5	5	60	Desequilíbrios de Fundamental e de Harmônicas
C	5	AB,CA	5	10	60	Desequilíbrios de Fundamental e de Harmônicas
D	3	AB,CA	5	15	60	Desequilíbrios de Fundamental e de Harmônicas
E	3	AB,CA	7	5	60	Desequilíbrio de Fundamental e de Harmônicas
F	5	AB,CA	7	10	70	Desequilíbrio de Fundamental e de Harmônicas
G	3	AB,CA	7	15	60	Desequilíbrios de Fundamental e de Harmônicas

Tabela 4-7 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 7 (Análise de harmônicas desequilibradas com desequilíbrio de fundamental).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	60	Sem distúrbio
B	3	AB,CA	9	5	60	Desequilíbrio de Fundamental e de Harmônicas
C	5	AB,CA	9	10	60	Desequilíbrio de Fundamental e de Harmônicas
D	3	AB,CA	9	15	60	Desequilíbrios de Fundamental e de Harmônicas
E	3	AB,CA	11	5	60	Desequilíbrio de Fundamental e de Harmônicas
F	5	AB,CA	11	10	60	Desequilíbrio de Fundamental e de Harmônicas
G	3	AB,CA	11	15	70	Desequilíbrios de Fundamental e de Harmônicas

Tabela 4-8 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 8 (Análise de harmônicas equilibradas com desequilíbrio de fundamental).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	60	Sem distúrbio
B	3	AB,BC,CA	5	5	60	Desequilíbrio de Fundamental e Harmônicas equilibradas
C	3	AB,BC,CA	5	15	60	Desequilíbrio de Fundamental e Harmônicas
D	3	AB,BC,CA	7	5	60	Desequilíbrios de Fundamental e Harmônicas equilibradas
E	3	AB,BC,CA	7	15	60	Desequilíbrio de Fundamental e Harmônicas equilibradas
F	3	AB,BC,CA	11	5	80	Desequilíbrio de Fundamental e Harmônicas equilibradas
G	3	AB,BC,CA	11	15	96	Desequilíbrios de Fundamental e Harmônicas equilibradas

Tabela 4-9 – Testes aplicados no ensaio 9 (Análise de harmônicas equilibradas com desequilíbrio de fundamental).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	78	Sem distúrbio
B	3	AB,BC,CA	5,7,11	5	84	Desequilíbrio de Fundamental e Harmônicas equilibradas

Tabela 4-10 – Seqüência de testes aplicados no ensaio 10 (Análise de harmônicas equilibradas 2ª e 4ª ordem).

Seqüência	Desequilíbrio de Fundamental	Harmônicas			Duração aproximada	Observação
	K (%)	Fases	Ordem	Amplitude [%]	[min]	
A	0	-	-	-	60	Sem distúrbio
B	0	AB,BC,CA	2	5	60	Harmônicas equilibradas
C	0	AB,BC,CA	4	5	60	Harmônicas equilibradas

4.4. Resultados dos Testes

Para obter as curvas de elevação de temperatura do enrolamento do estator do motor de indução em função do tempo de teste foi adotado o seguinte procedimento:

- a) os sinais monitorados foram gravados em intervalos de 10 s;
- b) a temperatura do enrolamento considerada representativa para o ensaio foi a que resultou maior entre as três temperaturas medidas no interior do motor;
- c) após se obter a temperatura do enrolamento mais quente, mas não do “ponto mais quente”, foi descontada a temperatura ambiente medida.

A seguir estão indicadas as curvas de resposta de elevação de temperatura, dos enrolamentos do estator do motor, em função do tempo, obtidas para cada ensaio realizado.

As Figuras de 4-4 a 4-13 mostram as curvas de elevação de temperatura resultantes dos ensaios de 1 a 10.

Figura 4-4 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor obtida do ensaio 1. (Distúrbios de desequilíbrio de fundamental e harmônicas equilibradas separadamente).

Figura 4-5 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 2. (Distúrbios de harmônicas equilibradas 7ª, 11ª ordens e 5ª, 7ª e 11ª ordens simultâneas).

Figura 4-6 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 3. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas 3ª e 5ª ordens).

Figura 4-7 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 4. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas 7ª e 9ª ordens).

Figura 4-8 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 5. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas sem e com desequilíbrio de fundamental).

Figura 4-9 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 6. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas com desequilíbrio de fundamental).

Figura 4-10 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 7. (Distúrbios de harmônicas desequilibradas com desequilíbrio de fundamental).

Figura 4-11 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 8. (Distúrbios de harmônicas equilibradas com desequilíbrio de fundamental).

Figura 4-12 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 9. (Distúrbios de harmônicas 5^a, 7^a e 11^a ordens harmônicas equilibradas, simultâneas, com desequilíbrio de fundamental).

Figura 4-13 – Curva de elevação de temperatura do enrolamento mais quente do estator do motor, obtida do ensaio 10. (Distúrbios de harmônicas equilibradas de 2^a e 4^a ordens)

4.5. Análise dos Resultados dos Testes

A seguir há uma breve avaliação dos resultados obtidos para as curvas de elevação de temperatura dos enrolamentos do estator do motor em função dos distúrbios aplicados, considerando inclusive as avaliações apresentadas pelas referências citadas.

4.5.1. Caso de aplicação de desequilíbrio de frequência fundamental

Fica evidente que o desequilíbrio de frequência fundamental que introduziu seqüência negativa é bastante influente na elevação de temperatura do motor e, portanto, nocivo à vida útil do motor. Os valores de elevação de temperatura observados nas curvas resultantes dos testes ficam bastante próximos aos obtidos e indicados pelo EPRI (PEAC) na referência [17]. Também, seguindo a linha apresentada na referência [1], a vida útil do motor ficaria bem próxima à indicada nessa referência. A Figura 4-14 mostra as elevações de temperatura resultantes obtidas para os testes de desequilíbrio de frequência fundamental.

Figura 4-14 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de desequilíbrio de frequência fundamental em função do grau de desequilíbrio (k)

4.5.2. Caso de aplicação de tensão de frequência fundamental equilibrada e harmônicas equilibradas

Quando foi aplicada ao motor uma tensão com frequência fundamental e frequências harmônicas superiores à 3ª ordem, equilibradas, houve influência significativa na elevação de temperatura dos enrolamentos do estator do motor de indução. Isso implica em dizer que os resultados obtidos nesses ensaios comparados aos obtidos no estudo apresentado em [1] eram perfeitamente esperados. Então, cabe ressaltar que, para cargas com essas características de torque em função da velocidade, a presença na tensão de harmônicas superiores à 3ª ordem harmônica equilibradas apresenta influência significativa na elevação de temperatura dos enrolamentos do motor. Além disso, observa-se também, que as elevações de temperaturas são menores quanto maiores as ordens harmônicas aplicadas. Neste teste, foi possível verificar, ainda, que harmônicas de seqüência negativa pura (2ª, 5ª e 11ª ordens harmônicas) não causam maior elevação de temperatura que harmônicas de seqüência positiva pura (4ª e 7ª ordens harmônicas). Isto pode ser constatado comparando as elevações de temperatura obtidas quando foram aplicadas 5% de amplitude de 4ª e 5ª ordens harmônicas, ou, 7ª e 11ª ordens harmônicas. Esse resultado era esperado, já que, para frequências harmônicas superiores à fundamental as impedâncias de seqüência positiva e negativa são praticamente iguais, conforme indicado na Figura 3-4 que mostra a variação das impedâncias de entrada de um motor de indução trifásico para as seqüências positiva e negativa em função da ordem harmônica. A Figura 4-15 mostra as elevações de temperatura resultantes para os testes com aplicação de tensão com frequência fundamental equilibrada e harmônicas equilibradas.

Figura 4-15 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental e harmônicas equilibradas

4.5.3. Caso de aplicação de tensão de frequência fundamental equilibrada e harmônicas desequilibradas

Quando foi aplicada ao motor uma tensão com frequência fundamental equilibrada e frequências harmônicas desequilibradas, ou seja, harmônicas que apresentam componentes de seqüências positiva e negativa, com componentes de seqüências de mesmas amplitudes as elevações de temperatura foram menores do que nos casos de aplicação de harmônicas equilibradas. Por exemplo: a elevação de temperatura para 10% de 5ª ordem harmônica equilibrada foi da ordem de 4 °C enquanto, para o teste com essa mesma ordem harmônica mas desequilibrada, a elevação de temperatura foi da ordem de 0,6 °C. A Figura 4-16 mostra as elevações de temperatura resultantes para os testes com aplicação de tensão de frequência fundamental equilibrada e harmônicas desequilibradas.

Figura 4-16 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental equilibrada e harmônicas desequilibradas

4.5.4. Caso de aplicação de tensão com desequilíbrio de frequência fundamental e harmônicas equilibradas

Quando foram aplicadas ao motor, simultaneamente, tensão com desequilíbrio de frequência fundamental de 3% e harmônicas equilibradas com amplitudes de 5% e 15%, as elevações de temperatura foram muito maiores que quando foi aplicada tensão apenas com desequilíbrio de frequência fundamental de 3%. Nesse caso, o aumento na elevação de temperatura em relação ao teste de tensão apenas com desequilíbrio de frequência fundamental foi da ordem de 2/3 superior ao obtido quando foi aplicado apenas harmônicas equilibradas. No caso de aplicação simultânea de 5ª, 7ª e 11ª ordens harmônicas, e, com 3% de desequilíbrio de frequência fundamental, houve aumento da elevação de temperatura superior a 3 vezes ao obtido apenas com a aplicação de desequilíbrio de frequência fundamental. A Figura 4-17 mostra as elevações de temperatura resultantes dos

testes de aplicação de tensão com 3% de desequilíbrio de frequência fundamental e harmônicas equilibradas com amplitudes de 5% e 15%.

Figura 4-17 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental com desequilíbrio de 3% e harmônicas equilibradas com 5% e 15% de amplitude

4.5.5. Caso de aplicação de tensão com desequilíbrio de frequência fundamental e harmônicas desequilibradas

Quando foram aplicadas ao motor, simultaneamente, tensão com desequilíbrios de frequência fundamental de 3% e harmônicas desequilibradas com amplitudes de 5% e 10%, as elevações de temperatura foram maiores do que quando foram aplicadas tensão apenas com desequilíbrios de frequência fundamental de 3%. O aumento na elevação de temperatura em relação ao teste apenas com desequilíbrio de frequência fundamental foi da ordem de duas vezes a elevação de temperatura obtida quando foram aplicadas apenas harmônicas desequilibradas. A Figura 4-18 mostra as elevações de temperatura resultantes dos testes de aplicação de tensão

com 3% de desequilíbrio de frequência fundamental e harmônicas desequilibradas com 5% e 10% de amplitude.

Figura 4-18 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental com desequilíbrio de 3% e harmônicas desequilibradas com 5% e 10% de amplitude

Quando foram aplicadas ao motor, simultaneamente, tensão com desequilíbrios de frequência fundamental de 5% e harmônicas desequilibradas com amplitudes de 5% as elevações de temperatura foram maiores que quando aplicados apenas desequilíbrios de fundamental de 5%. O aumento na elevação de temperatura em relação ao teste apenas com desequilíbrio de frequência fundamental foi da ordem de cinco vezes a elevação de temperatura obtida quando foram aplicadas apenas harmônicas desequilibradas. A Figura 4-19 mostra as elevações de temperatura resultantes dos testes de aplicação de tensão com 5% de desequilíbrio de frequência fundamental e harmônicas desequilibradas com 5% de amplitude.

Figura 4-19 - Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental com desequilíbrio de 5% e harmônicas desequilibradas com 5% de amplitude

4.5.6. Comentários finais sobre os resultados dos testes

Fica evidente, para o tipo de carga avaliada, que a presença de harmônicas equilibradas ou desequilibradas, agindo simultaneamente aos desequilíbrios de fundamental, afeta significativamente a elevação de temperatura do motor submetido aos testes. Conforme demonstraram os resultados apresentados, existe a necessidade de se investigar melhor como os desequilíbrios combinados com harmônicos podem afetar o desempenho dos motores de indução. É importante ressaltar que, embora não tenha sido monitorado, o nível de ruído audível observado (de forma qualitativa) quando há distúrbios de desequilíbrio de frequência fundamental ou de harmônicas foi muito pronunciado. Além do nível de ruído, observaram-se pulsações de torque, que podem causar desgaste mecânico dos rolamentos da máquina. Esses fatos foram indicados pelo intenso ruído ocorrido durante a realização dos testes. Além disso, mostra-se muito importante a definição

de indicadores de desequilíbrios de tensão que considerem, além da frequência fundamental, também a influência de frequências harmônicas equilibradas ou não. Pretende-se mostrar nos capítulos seguintes formas alternativas para obtenção desses parâmetros.

Não foram observadas tendências diferentes nos efeitos de harmônicas de ordem par em relação as harmônicas de ordem ímpar.

Capítulo V

5. REPRESENTAÇÃO DE GRANDEZAS DE UM SISTEMA DE FORNECIMENTO DE ENERGIA

5.1. Sistemas de Representação de Grandezas Temporais

As grandezas de um sistema trifásico de fornecimento de energia são representadas normalmente por meio dos valores instantâneos de suas formas de ondas. Desses valores instantâneos obtém-se uma série de parâmetros que permitem traduzir a qualidade do sistema quanto à conformidade dos sinais fornecidos. À concessionária é comum atribuir a responsabilidade de manter a tensão dentro de certos padrões estabelecidos e ao consumidor cabe atender a padrões de emissão de correntes distorcidas e ocupação do sistema (fator de potência). Os parâmetros que geralmente são utilizados para acompanhamento da qualidade de fornecimento da grandeza elétrica tensão são: variações de tensão de curta e longa duração, distorção harmônica, desequilíbrio e flutuações rápidas (flicker), todos em termos de valores eficazes e frequência da fundamental. Os órgãos reguladores têm feito um esforço muito grande no sentido de definir procedimentos padronizados para a obtenção desses parâmetros a fim de minimizar possíveis diferenças entre valores obtidos por diferentes medidores que empregam diferentes procedimentos de cálculos. Além disso, procuram seguir procedimentos definidos por estudos que são em geral definidos de forma a refletir efeitos térmicos sofridos por equipamentos quando submetidos a condições não adequadas de fornecimento. Os principais estudos realizados sobre a definição de protocolos de medição desses parâmetros

são os indicados na referência [17] que é uma das principais referências utilizadas pela IEC [20] e [21].

Apesar de os órgãos reguladores utilizarem, em geral, parâmetros baseados em tensões exclusivamente de fase ou de linha, para avaliação da QEE, parece oportuno verificar a possibilidade de uso de outras formas de representação das grandezas de um sistema trifásico e, a partir dessas, obter parâmetros de QEE que reflitam efeitos de distúrbios na tensão sobre equipamentos do sistema elétrico e de uso final de energia, como é o caso dos motores trifásicos de indução, que se mostram sensíveis à qualidade da tensão.

5.2. Transformação de Eixos

Num sistema trifásico de fornecimento de energia elétrica, pode-se definir para cada uma das grandezas, tensão ou corrente, três variáveis associadas às formas de ondas das grandezas de fase ou de linha desse sistema de fornecimento. Considerando que essa tese pretende investigar os efeitos de desequilíbrios e distorções harmônicas de tensões sobre cargas do tipo motor de indução trifásico, a palavra variável está associada a três tensões ou, quando a grandeza for corrente, está associada a três correntes.

Os valores instantâneos das grandezas de fase ou de linha de um sistema trifásico de fornecimento de energia elétrica, em função do tempo, podem ser representados de três formas distintas [16] e [34]. As formas de representação são: (a) -

representação dos valores instantâneos das variáveis no sistema conhecido por ABC; (b) - representação dos valores instantâneos das variáveis no sistema conhecido por $\alpha\beta$; e (c) - representação dos valores instantâneos das variáveis no sistema conhecido por DQ.

O sistema de representação na forma ABC consiste em apresentar os valores instantâneos de cada uma das variáveis em função do tempo. Esses valores podem ser tomados como uma combinação linear de três vetores unitários defasados de 120° entre si. Para cada instante de observação associa-se um vetor resultante obtido a partir da combinação linear dos vetores unitários definidos. Esses vetores unitários não formam uma base ortogonal. Nessa representação há a necessidade de avaliar três variáveis para se obter uma análise das grandezas de um sistema trifásico de fornecimento. Isso torna esse sistema de representação relativamente mais complexo em função do número de variáveis envolvidas.

O sistema de representação das variáveis, na forma $\alpha\beta$, consiste em representar os valores instantâneos das variáveis tomados como uma combinação linear de dois vetores unitários defasados de 90° entre si. Para cada instante de observação associa-se um vetor resultante obtido da combinação linear dos vetores unitários definidos. Esses vetores unitários formam uma base ortogonal. Nessa representação há a necessidade de se avaliar apenas duas variáveis para se obter uma análise das grandezas de um sistema trifásico de fornecimento. Isso torna essa forma de representação relativamente mais simples em função da redução no número de variáveis.

Nos dois casos anteriores os sistemas vetoriais de referência definidos são sistemas de eixos fixos em relação ao tempo. Entre a primeira e segunda forma de representação, há uma redução no número de variáveis a serem avaliadas para se obter uma análise do sistema de fornecimento. O sistema de representação das variáveis na forma DQ consiste em representar as variáveis tomadas como uma combinação linear de dois vetores unitários defasados de 90°, entre si, e que giram no sentido positivo de medição de ângulos (anti-horário) a uma frequência igual à frequência da rede (isso exige um circuito de sincronismo entre a frequência de rotação do sistema de representação e a frequência dos sinais da rede). Nessa forma de representação, há também a necessidade de se avaliar apenas duas variáveis para se obter uma análise das grandezas de um sistema trifásico de fornecimento. Isso torna esse sistema de representação também bastante simples.

Em (Cutri, 2004) [7] está relatado que as formas de representação anteriormente referidas foram citadas por (Ferrero et al. 1993) [16] e (Robba et al. 1996) [34]. Segundo essas referências, um terno de uma grandeza genérica (G), tensão ou corrente, de um sistema trifásico, pode ser associado a um vetor resultante ($\vec{G}_R$). A obtenção desse vetor resultante pode ser a partir das componentes definidas no sistema de referência ABC (sistema de referência de vetores $\vec{a}$, $\vec{b}$, e $\vec{c}$, com módulos iguais a unidade e ângulos defasados de 120° entre si), ou, no sistema de referência $\alpha\beta$, (sistema de referência de vetores $\vec{\alpha}$, $\vec{\beta}$, com módulos iguais a unidade e ângulos defasados de 90° entre si). A equação (5.1) mostra as relações entre as componentes nos referidos sistemas de representação.

$$\vec{G}_R(t) = \frac{2}{3} \left[g_A(t) \vec{a} + g_B(t) \vec{b} + g_C(t) \vec{c} \right] = \left[g_\alpha(t) \vec{\alpha} + g_\beta(t) \vec{\beta} \right] \quad (5.1)$$

onde :

$\vec{G}_R(t)$ - representa o vetor resultante de uma grandeza genérica (G) obtida para um dado instante,

$g_A(t), g_B(t)$ e $g_C(t)$ - são os valores instantâneos das componentes do vetor resultante nas direções $\vec{a}, \vec{b}$ e $\vec{c}$

$g_\alpha(t)$ e $g_\beta(t)$ - são os valores instantâneos das componentes do vetor resultante nas direções $\vec{\alpha}$ e $\vec{\beta}$,

$\vec{a}, \vec{b}$ e $\vec{c}$ - são os vetores unitários no sistema de referência ABC, defasados de 120° ,

$\vec{\alpha}, \vec{\beta}$ - são os vetores unitários no sistema de referência $\alpha\beta$ defasados de 90° .

Os valores das componentes nas direções dos vetores unitários $\vec{\alpha}$ e $\vec{\beta}$, no sistema $\alpha\beta$, podem ser obtidos a partir das componentes nas direções dos vetores unitários

$\vec{a}, \vec{b}$ e $\vec{c}$. A transformação do sistema de coordenadas $\vec{a}, \vec{b}$ e $\vec{c}$ para o sistema de coordenadas $\vec{\alpha}$ e $\vec{\beta}$ é conhecida como transformação de Clarke, (Clarke, 1943) [9] e pode ser obtida conforme a equação (5.2).

$$\begin{bmatrix} g_\alpha(t) \\ g_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_A(t) \\ g_B(t) \\ g_C(t) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Nas análises de interesse neste trabalho, não são consideradas relevantes as componentes de seqüência zero. Neste caso, ou seja, considerando seqüência zero nula, existe a transformação inversa e esta é única.

A Figura 5-1 ilustra o vetor resultante $\vec{G}_R$ a partir dos sistemas de referências de vetores unitários $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ e $(\vec{\alpha}, \vec{\beta})$ em um dado instante de tempo t .

Figura 5-1 – Vetor resultante $\vec{G}_R$ nos sistemas de referência ABC e $\alpha\beta$

Além dos sistemas de representação citados anteriormente, também está relatado em (Cutri, 2004) [7] que se pode obter o vetor resultante ($\vec{G}_R$) a partir das componentes definidas no sistema de referência DQ (sistema de referência com vetores unitários $\vec{d}$ e $\vec{q}$, com módulos iguais a unidade e ângulos de 90° entre si),

mas nesse sistema de representação os referidos eixos giram no sentido positivo (anti-horário) com velocidade angular $\omega=2\pi f$ (f é a frequência da fundamental do sinal). A obtenção das componentes do vetor ($\vec{G}_R$) no sistema DQ a partir das componentes no sistema $\alpha\beta$ é conhecida como transformação de Park, (Choi et al, 2000) [8] e (Senini; Wolfs, 2000) [36]. As componentes podem ser obtidas por meio da equação (5.3) indicada a seguir:

$$\begin{bmatrix} g_d(t) \\ g_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi) & \sin(\omega t + \phi) \\ -\sin(\omega t + \phi) & \cos(\omega t + \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_\alpha(t) \\ g_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

onde :

$g_d(t)$ e $g_q(t)$ - são os valores instantâneos das componentes do vetor resultante nas

direções $\vec{d}$ e $\vec{q}$,

$\vec{d}$ e $\vec{q}$ - são os vetores unitários no sistema de referência DQ, defasados de 90°, girando com velocidade angular $2\pi f$.

A Figura 5-2 ilustra o vetor resultante $\vec{G}_R$ a partir do sistema de referência de vetores

unitários ($\vec{d}$, $\vec{q}$) girantes.

Figura 5-2 – Vetor resultante $\vec{G}_R$ no sistema de referência DQ

Considerando que os eixos (DQ) estejam sincronizados com a componente de seqüência positiva de frequência fundamental, verificam-se os seguintes casos possíveis:

caso 1) quando há apenas tensões equilibradas de frequência fundamental apenas de seqüência positiva, neste caso:

- uma componente de frequência fundamental de seqüência positiva é observada com amplitude fixa e de valor igual ao valor de pico dos sinais da grandeza de entrada sobre o eixo (d) e nula sobre o eixo (q).

A Figura 5-3.a ilustra as componentes nos eixos $\alpha\beta$ e DQ obtidas para um instante de tempo genérico. A Figura 5-3.b ilustra valores instantâneos dos sinais originais e das componentes dos sinais nos eixos DQ obtidas no tempo.

Figura 5-3 – Sinais apenas com componentes de frequência fundamental de seqüência positiva – (a) representação das componentes nos sistemas $\alpha\beta$ e DQ, para um instante de tempo genérico, (b) representação das componentes no tempo.

caso 2) quando há apenas tensões desequilibradas de frequência fundamental de componentes de seqüência positiva e negativa, neste caso:

- a amplitude da componente de frequência fundamental de seqüência positiva observada no eixo (d) corresponde ao valor médio do sinal nesse eixo e a média é nula no eixo (q); e uma componente de frequência fundamental de seqüência negativa é observada sobre o eixo (d) com amplitude de ondulação igual à amplitude da componente de seqüência negativa e frequência $2.f_0$, e, sobre o eixo (q), com amplitude de valor de pico igual à amplitude da componente de seqüência negativa e frequência $2.f_0$.

A Figura 5-4.a ilustra as componentes nos eixos $\alpha\beta$ e DQ obtidas para um instante de tempo genérico. A Figura 5-4.b ilustra valores instantâneos dos sinais originais e das componentes dos sinais nos eixos DQ obtidas no tempo.

Figura 5-4 - Sinais apenas com componentes de frequência fundamental de seqüências positiva e negativa – (a) representação das componentes nos sistemas $\alpha\beta$ e DQ, para um instante de tempo genérico, (b) representação das componentes no tempo.

caso 3) quando há apenas tensões equilibradas de frequência fundamental apenas de seqüência positiva, e harmônicas equilibradas de seqüência positiva, neste caso:

- a amplitude da componente de frequência fundamental de seqüência positiva corresponde ao valor médio do sinal observado no eixo (d) e amplitude média nula no eixo (q); e as componentes de frequências harmônicas de seqüência positiva são observadas sobre o eixo (d) com amplitude de ondulação igual à amplitude da componente harmônica e frequência $(h-1)f_0$, e, sobre o eixo (q), com amplitude de valor de pico igual à amplitude da componente harmônica e frequência $(h-1)f_0$.

A Figura 5-5.a ilustra as componentes nos eixos $\alpha\beta$ e DQ obtidas para um instante de tempo genérico. A Figura 5-5.b ilustra valores instantâneos dos sinais originais e das componentes dos sinais nos eixos DQ obtidas no tempo.

Figura 5-5 - Sinais com componentes de frequência fundamental e componentes de 5ª ordem harmônica equilibrada (seqüência negativa) – (a) representação das componentes nos sistemas $\alpha\beta$ e DQ, para um instante de tempo genérico, (b) representação das componentes no tempo.

caso 4) quando há apenas tensões equilibradas de frequência fundamental apenas de seqüência positiva, e harmônicas equilibradas de seqüência negativa, neste caso:

- a amplitude da componente de frequência fundamental de seqüência positiva corresponde ao valor médio do sinal observado no eixo (d) e amplitude média nula no eixo (q); e as componentes de frequências harmônicas de seqüência negativa são observadas sobre o eixo (d) com amplitude de ondulação igual à amplitude da componente harmônica e frequência $(h+1)f_0$, e, sobre o eixo (q), com amplitude com valor de pico igual à amplitude da componente harmônica e frequência $(h+1)f_0$.

A Figura 5-6.a ilustra as componentes nos eixos $\alpha\beta$ e DQ obtidas para um instante de tempo genérico. A Figura 5-6.b ilustra valores instantâneos dos sinais originais e das componentes dos sinais nos eixos DQ obtidas no tempo.

Figura 5-6 - Sinais com componentes de frequência fundamental e componentes de 7ª ordem harmônica equilibrada (seqüência positiva) – (a) representação das componentes nos sistemas $\alpha\beta$ e DQ, para um instante de tempo genérico, (b) representação das componentes no tempo.

caso 5) quando há tensões desequilibradas de frequência fundamental de seqüências positiva e negativa, e frequências harmônicas desequilibradas de seqüências positiva e negativa, neste caso:

- há sobreposição dos efeitos relatados em cada um dos casos anteriores, sendo que é necessário separar os distúrbios de frequência fundamental dos de harmônicas antes de se fazer a transformação para o sistema de representação.

Ressalta-se que as verificações feitas considerando as componentes harmônicas representadas no sistema de eixos (DQ) coincidem com as observações apontadas por (Wakileh, J. G., 2001) [37] e mencionadas no item 3.1 deste trabalho em termos

de efeitos de componentes harmônicas sobre os campos girantes dos motores de indução. Esse fato reforça a tese de que esse sistema de representação pode ser usado para fornecer um indicador adequado de QEE para os motores de indução que reflita as solicitações ocorridas sobre essa máquina quando em condições de tensões distorcidas e desequilibradas.

5.3. Decomposição de Sinais Temporais

Em (Mafarão, E. F. 2000) [28] e (Deckemann, S. 2000) [11], foi apresentada uma forma alternativa para a decomposição de sinais elétricos no tempo, que possibilita identificar as diferentes parcelas de potência que circulam pela rede em qualquer condição de operação e distúrbios nos sinais de tensões e correntes. Nesse trabalho [28], foram utilizadas técnicas matemáticas aplicáveis a funções temporais cujos tratamentos teóricos são encontrados em livros texto (Kaplan 1969 [24], Lathi 1987 [27] e Kreyszig 1993 [25]). Além disso, em [28], maior enfoque foi dado para a obtenção das parcelas de potências ativa e reativa da fundamental, além daquelas relacionadas a distúrbios devidos à presença de frequências harmônicas nos sinais, parcelas ditas residuais. A partir desse desenvolvimento, o autor propõe uma série de indicadores de potência os quais são indicativos dos diversos distúrbios que podem estar presentes na rede e revelam qual a ocupação do sistema pelas cargas. A grande vantagem do trabalho apresentado em [28] é que todas as parcelas de potência são obtidas sem a necessidade de realizar transformações de eixos, e, além disso, as técnicas desenvolvidas são aplicáveis e válidas para um sistema de fornecimento com qualquer número de fases, o que não ocorre com o método de transformação de eixos.

Embora o desenvolvimento apresentado em [28] seja realmente aplicável a sistemas de fornecimento com qualquer número de fases, para o objetivo deste trabalho apenas uma pequena parcela do trabalho [28] é de maior interesse e será utilizada. O tratamento de interesse refere-se ao conceito de Norma Euclidiana Instantânea. A fim de simplificar as demonstrações e torná-las mais objetivas aos interesses desse trabalho, será apresentada diretamente a aplicação das técnicas aos sinais elétricos de interesse, ou seja, a sinais genéricos de tensões e correntes.

Para um instante de tempo genérico $t=t_k$ analisa-se a função genérica $[g_i(t)]$ como grandeza vetorial no espaço n -dimensional, sendo (i) a fase. Para um sistema polifásico com n fases, define-se a Norma Euclidiana Instantânea – NEI para $[g(t_k)]=[g]$, como:

$$\| [g] \| = \sqrt{[g][g]} = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + \dots + g_n^2} \quad (5.4)$$

Associando a NEI à norma média de uma função contínua no intervalo $[t_k, t_k+\Delta t]$, ou seja:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_k+\Delta t} [g(t)]^2 dt = \| [g(t_k)] \|^2 = \| [g] \|^2, \quad (5.5)$$

Então, a norma instantânea é dada por:

$$\| [g] \| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_k+\Delta t} [g(t)]^2 dt} = \| [g(t_k)] \| \quad (5.6)$$

Para sinais periódicos com período (T), a norma corresponde ao valor eficaz, ou seja, é a média quadrática da função no intervalo considerado. Quanto menor o período de discretização Δt mais a função se aproxima do valor instantâneo da função contínua. Para sinais amostrados com pequenos intervalos de amostragem, substitui-se o valor amostrado a cada instante e calcula-se a NEI. Todos esses tratamentos foram baseados nas demonstrações apresentadas em (Marafão, E. F, 2000) [28]. Para ilustrar o comportamento da Norma Euclidiana Instantânea calculou-se a NEI considerando os mesmos três primeiros casos simulados no item 5.2. A Figura 5-7.a ilustra a NEI obtida para o caso de tensão com componente de frequência fundamental equilibrada (seqüência positiva), que resulta em norma constante ao longo do tempo. A Figura 5-7.b ilustra a NEI obtida para o caso de tensão com componente de frequência fundamental desequilibrada (seqüência positiva e negativa). A Figura 5-7.c ilustra o caso da NEI obtida para tensão com componente de frequência fundamental equilibrada somada à componente de 5ª ordem harmônica também equilibrada (seqüência negativa).

Figura 5-7 – Representação da Norma Euclidiana Instantânea (a) – tensão com componente de frequência fundamental equilibrada (seqüência positiva), (b) – tensão com componente de frequência fundamental desequilibradas (seqüência positiva e negativa) e (c) – tensão com componente de frequência fundamental adicionada a 5ª harmônica equilibrada.

Comparando os resultados obtidos os três primeiros casos apresentados no item 5.2, com os casos apresentados no item 5.3 verifica-se uma diferença absoluta entre os valores das amplitudes da componente no eixo (d) em relação ao valor obtido para a NEI. A Figura 5-8 mostra as diferenças absolutas obtidas em cada caso comparado. Nota-se, da análise desses três casos de comparação, que as diferenças instantâneas obtidas dependem da composição do sinal e não são constantes para qualquer dos casos. Este fato impede a definição de uma constante de aproximação geral, revelando que cada caso é diferente do outro. No entanto, ambos os métodos permitem identificar os distúrbios presentes na tensão.

Figura 5-8 – Diferenças instantâneas absolutas entre a componente no eixo (d) em relação à NEI, obtidas para cada caso simulado.

5.4. Indicadores de Distúrbios na Tensão

A partir das representações das tensões nos sistemas DQ ou a partir da Norma Euclidiana Instantânea (NEI) é possível, como foi apresentado nos itens 5.2 e 5.3, identificar a ocorrência de desequilíbrios de tensão assim como a presença de distorções harmônicas em qualquer das tensões das fases o que representa grande avanço em relação aos indicadores atuais destes fenômenos. Então parece oportuno que a partir desses métodos sejam obtidos indicadores de distúrbios presentes na tensão. Resta ainda investigar se há a necessidade de se obterem indicadores desses distúrbios separadamente, ou seja, para a frequência fundamental e para distorções harmônicas ou obter um indicador conjunto. Essas investigações serão aprofundadas e complementadas nos capítulos subseqüentes.

Capítulo VI

6. PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DE DISTÚRBIOS NA TENSÃO

6.1.Introdução

A partir dos objetivos estabelecidos no capítulo I, das observações apresentadas no capítulo II sobre perda de vida de motores de indução, dos efeitos que distúrbios na tensão causam sobre os motores de indução apresentados no capítulo III e dos resultados das seqüências de testes apresentados no capítulo IV, foi possível confirmar que as elevações de temperatura dos enrolamentos dos motores de indução são afetadas por desequilíbrios de freqüência fundamental e por harmônicas presentes na tensão de alimentação desses equipamentos. Além disso, verificou-se que as elevações de temperatura dos enrolamentos são maiores quando estão presentes na tensão distúrbios simultâneos de desequilíbrios de freqüência fundamental e freqüências harmônicas. Dessas constatações, é razoável a proposição de um parâmetro de qualidade de tensão que indique os efeitos combinados desses distúrbios permitindo avaliar a qualidade da tensão de fornecimento. Pretende-se, neste capítulo, propor algumas formas para se obter um parâmetro de qualidade da tensão, a partir dos métodos de representação de grandezas elétricas apresentados no capítulo V, que indiquem o efeito de elevação de temperatura dos enrolamentos dos motores devido a presença de distúrbios na tensão.

6.2.Parâmetro de Qualidade de Tensão

A partir dos métodos de representação temporal das grandezas de um sistema de fornecimento de energia elétrica apresentados no capítulo V, pode-se obter parâmetros de qualidade relativos a desequilíbrios de frequência fundamental e a distorções harmônicas. É possível propor um outro parâmetro que combine os outros dois anteriores ponderados por algum fator de ajuste (peso) que seja considerado adequado. O problema principal é obter, além dos parâmetros individuais relativos a cada distúrbio, um terceiro parâmetro que reflita a elevação de temperatura dos enrolamentos dos motores de indução devido aos efeitos individuais e efeitos combinados de cada distúrbio. Neste sentido, é apresentada uma forma para o tratamento dos sinais que permite obter os parâmetros de qualidade referentes a cada distúrbio, assim como, o parâmetro de qualidade combinado.

6.3.Tratamento e Separação de Distúrbios

Há diversas formas de tratamento de sinais que permitem separar distúrbios referentes a sinais de frequência fundamental dos distúrbios referentes a frequências harmônicas. Como não é objeto deste trabalho investigar qual dessas formas de tratamento de sinais é a melhor do ponto de vista de desempenho e facilidade de realização, não são feitos comentários adicionais. Apenas são apresentadas duas maneiras possíveis para separação dos distúrbios que, em princípio, possuem elevado desempenho, além de fácil realização. A forma de tratamento apresentada foi extraída da referência [28].

É importante esclarecer que quando uma norma recomenda o uso específico de um método de cálculo para obter um parâmetro de qualidade, pode estar restringindo a possibilidade de uso de outras formas de cálculo igualmente válidas. Isso porque, em geral, nos textos dessas normas não há referência clara dizendo que podem ser utilizados outros métodos de cálculo que forneçam os mesmos resultados dos métodos recomendados. É oportuno comentar que há várias formas para se obter um parâmetro de qualidade de um determinado distúrbio. Não é conveniente, portanto, restringir o uso de qualquer método de cálculo que permita obter o valor de um parâmetro de qualidade. Esse comentário vale para o que recomenda a IEC 61000-4-30 [20] sobre a forma de cálculo do desequilíbrio de tensão de sequência negativa. Da mesma forma, o PRODIST - Procedimento de Distribuição da Energia Elétrica [33] mantém essa mesma recomendação.

6.4.Algoritmo para Obter Parâmetros de Qualidade de Tensão a Partir da Representação no Sistema DQ

Admitindo sinais da grandeza tensão, constituída por distúrbios de desequilíbrio de frequências fundamental e harmônicas, é possível, a partir de técnicas para tratamentos de sinais, obter separadamente as componentes referentes a cada distúrbio [28]. Um algoritmo possível para obter parâmetros de qualidade de tensão referente a cada distúrbio usando o sistema de representação (DQ) é mostrado no diagrama de blocos da Figura 6-1. Neste diagrama nota-se a presença dos seguintes blocos principais:

1. filtro passa baixa (FPB) a fim de enquadrar os sinais de tensão ao critério de Nyquist,
2. filtro rejeita faixa (FRF) sintonizado na frequência fundamental,
3. comparador, usado para separar as componentes de frequência fundamental das componentes harmônicas,
4. transformação em componentes no sistema de eixos DQ, dos sinais de frequência fundamental e frequências harmônicas;
5. cálculo dos parâmetros de qualidade de frequência fundamental e de frequências harmônicas,
6. cálculo do parâmetro de qualidade devido aos distúrbios combinados.

Figura 6-1 - Diagrama de blocos para obter parâmetro de qualidade de desequilíbrio de frequência fundamental, de frequências harmônicas e parâmetro combinado, a partir do sistema de representação DQ.

As transformações necessárias à representação das grandezas no sistema de eixo girante (DQ) foram apresentadas no capítulo V, assim como, alguns comentários sobre as características que cada tipo de distúrbio impõe sobre os sinais nos eixos (d) e (q), respectivamente.

Do tratamento de sinais de tensão apresentado na Figura 6-1, obtêm-se os sinais referentes à frequência fundamental e os referentes às frequências harmônicas, ambos no sistema de representação (DQ).

Obtida a componente de frequência fundamental no sistema (DQ), sabe-se que, a amplitude de modulação do sinal no eixo (d) ou (q) corresponde à amplitude da componente de sequência negativa (desde que haja sincronismo entre os eixos de referência desse sistema de representação e a frequência fundamental do sinal). Desses sinais, pode-se obter o parâmetro de qualidade de desequilíbrio de tensão (FDu).

As componentes harmônicas dos sinais de tensão que aparecem nos eixos (d) ou (q) correspondem ao efeito combinado das harmônicas que estão presentes em qualquer das fases dos sinais de entrada. A partir das componentes nesse sistema de representação, pode-se obter um parâmetro que corresponde à distorção harmônica total (FHu) do sinal no eixo (d) ou (q). Essa distorção é o efeito da presença de tensões de frequências harmônicas em qualquer das fases, ou linhas do sistema de fornecimento.

A partir dos sinais obtidos nos eixos (d) e (q) é possível escrever equações que permitem calcular os parâmetros de qualidade de tensão para a frequência fundamental e para as frequências harmônicas.

Para um período² do sinal de frequência fundamental, define-se o fator de qualidade de desequilíbrio de tensão como o parâmetro $FDu(\%)$, dado por:

$$FDu(\%) = \frac{\frac{máx(u_{1d}) - mín(u_{1d})}{2}}{méd(u_{1d})} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

onde:

- $FDu(\%)$ é o parâmetro de qualidade que indica o fator de desequilíbrio de tensão obtido a partir da componente no eixo de (d) ou (q),
- $máx(u_{1d})$ é o valor máximo da amplitude da componente do eixo (d) ou (q) obtida num período do sinal de frequência fundamental,
- $mín(u_{1d})$ é o valor mínimo da amplitude da componente do eixo (d) ou (q) obtida num período do sinal de frequência fundamental,
- $méd(u_{1d})$ é o valor médio da amplitude da componente do eixo (d) obtida num período do sinal de frequência fundamental,

Ressalta-se que o numerador indicado na equação (6.1) corresponde à amplitude da componente de sequência negativa dos sinais de frequência fundamental e o

² Entende-se por período, um intervalo de tempo completo do sinal amostrado. A rigor não há restrição, pode ser utilizado intervalo de 1 ciclo, 12 ciclos ou qualquer outro intervalo que seja conveniente ao tratamento dos sinais.

denominador dessa mesma equação corresponde à amplitude da componente de sequência positiva desses sinais.

Para um período completo do sinal de frequência fundamental, define-se o fator de qualidade de distorção harmônica total de tensão, obtido da componente de eixo (d) ou (q) como o parâmetro $FHu(\%)$, dado por:

$$FHu(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(u_{hdi})^2}}{\frac{méd(u_{ld})}{\sqrt{2}}} \cdot 100\% \quad (6.2)$$

onde:

- $FHu(\%)$ é o parâmetro de qualidade que indica o fator de distorção harmônica total de tensão obtido a partir da componente no eixo de (d) ou (q),
- u_{hdi} são os valores instantâneos do sinal no eixo (d) ou (q) correspondentes às harmônicas,
- n é o número de amostras presentes num período do sinal de frequência fundamental.

Ressalta-se que o numerador indicado na equação (6.2) corresponde à amplitude da distorção harmônica total obtida do sinal no eixo (d) ou (q) e o denominador dessa mesma equação corresponde ao valor eficaz da componente de sequência positiva obtida do sinal no eixo (d).

6.5. Algoritmo para Obter Parâmetros de Qualidade de Tensão a Partir da Norma Euclidiana Instantânea (NEI)

De forma análoga à decomposição no sistema nos eixos (DQ), também é possível obter separadamente parâmetros de qualidade de distúrbios de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental e de harmônicas a partir da NEI. Um algoritmo possível para obter parâmetros de qualidade de tensão referente a cada distúrbio a partir da NEI é mostrado no diagrama de blocos da Figura 6-2. Neste diagrama nota-se a presença dos seguintes blocos principais:

1. filtro passa baixa (FPB) a fim de enquadrar os sinais ao critério de Nyquist,
2. filtro rejeita faixa (FRF) sintonizado na frequência fundamental,
3. comparador, usado para separar as componentes de frequência fundamental das componentes harmônicas,
4. cálculo da NEI dos sinais de frequência fundamental e de harmônicas;
5. cálculo dos parâmetros de qualidade de frequência fundamental e de frequências harmônicas,
6. cálculo do parâmetro de qualidade devido aos distúrbios combinados.

Figura 6-2 - Diagrama de blocos para obter parâmetro de qualidade de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental, de frequências harmônicas e parâmetro combinado a partir da NEI.

As transformações necessárias para obter a NEI foram apresentadas no capítulo V, assim como, alguns comentários sobre as características que cada tipo de distúrbio impõe sobre o sinal obtido nessa forma de representação.

Do tratamento de sinais apresentado na Figura 6-2, obtêm-se os sinais referentes à frequência fundamental e os referentes às frequências harmônicas. Para ambos, foi calculado a NEI.

Obtida a NEI da componente de frequência fundamental (nei_1), sabe-se que, para um ciclo do sinal de frequência fundamental, a razão entre a amplitude de modulação da (nei_1) e o seu valor médio corresponde ao parâmetro de desequilíbrio de frequência fundamental (FDu).

Para a NEI obtida das componentes de frequências harmônicas (nei_H), pode-se obter um parâmetro que corresponde à distorção harmônica total do sinal (FHu). Essa

distorção é o efeito da presença de harmônicas nas tensões de fase ou de linha do sistema de fornecimento.

As equações que permitem calcular os parâmetros de qualidade de tensão chamados de fator de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental (FDu) e o fator de distorção harmônica total de tensão (FHu) obtidos a partir da (nei_1) são colocadas a seguir.

Para um período do sinal de frequência fundamental, define-se o fator de qualidade de desequilíbrio de tensão como o parâmetro $FDu(\%)$, dado por:

$$FDu(\%) = \frac{\frac{máx(nei_1) - mín(nei_1)}{2}}{méd(nei_1)} \cdot 100\% \quad (6.3)$$

onde:

- $FDu(\%)$ é o parâmetro de qualidade que indica o fator de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental obtido a partir da (nei_1),
- $máx(nei_1)$ é o valor máximo da amplitude da (nei_1) obtida num período do sinal de frequência fundamental,
- $mín(nei_1)$ é o valor mínimo da amplitude da (nei_1) obtida num período do sinal de frequência fundamental,
- $méd(nei_1)$ é o valor médio da amplitude da componente da (nei_1) obtida num período do sinal de frequência fundamental,

Para um período completo do sinal de frequência fundamental, define-se o fator de qualidade de distorção harmônica total obtida da (nei_h) como o parâmetro $FHu(\%)$, dado por:

$$FHu(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(nei_{hi})^2}}{\frac{méd(nei_h)}{\sqrt{2}}} \cdot 100\% \quad (6.4)$$

onde:

- $FHu(\%)$ é o parâmetro de qualidade que indica o fator de distorção harmônica total de tensão obtido a partir da (nei_h),
- nei_{hi} são os valores instantâneos do sinal da (nei_h) correspondentes às tensões harmônicas,

6.6. Parâmetro Combinado de Qualidade de Tensão

A partir de qualquer dos métodos usados para o cálculo dos parâmetros de qualidade (FDu) e (FHu), propõe-se aqui um parâmetro de qualidade (FQu). Esse parâmetro deve ser obtido da combinação dos parâmetros FDu e FHu. Uma das dificuldades é estabelecer como deve ser feita a combinação dos valores dos parâmetros individuais obtidos. A proposta inicial feita aqui parte da avaliação dos fatores de qualidade obtidos em cada um dos testes realizados no capítulo IV, assim como das elevações de temperaturas observadas de cada teste aplicado. A

proposta para obter um parâmetro de qualidade de tensão que combina os efeitos dos distúrbios analisados está indicada na equação (6.5):

$$FQu = k_1 FDu + k_h FHu \quad (6.5)$$

onde:

- FQu é o parâmetro de qualidade de tensão obtido a partir da combinação dos parâmetros de qualidade de desequilíbrio de frequência fundamental e de distorção harmônica total,
- k_1 é uma constante de ponderação que atribui o peso com que o desequilíbrio de frequência fundamental deve contribuir na formação do parâmetro FQu ,
- k_h é uma constante de ponderação que atribui o peso com que as distorções harmônicas devem contribuir na formação do parâmetro FQu ,

No capítulo VII são apresentados valores para as constantes k_1 e k_h obtidas de regressões lineares feitas a partir dos valores de elevação de temperatura dos enrolamentos em função dos parâmetros FDu e FHu obtidos dos testes realizados neste trabalho.

Capítulo VII

7. PARÂMETROS DE QUALIDADE DE TENSÃO OBTIDOS

7.1.Introdução

No capítulo VI foram apresentadas maneiras para obtenção dos parâmetros de qualidade de tensão referentes a desequilíbrios de frequência fundamental, de distorções harmônicas e um terceiro parâmetro de qualidade que pondera os fatores anteriores por duas constantes convenientemente avaliadas. Neste capítulo, a partir de regressões lineares aplicadas aos resultados dos testes, propõem-se valores das constantes de ponderação adequadas para obtenção do parâmetro de qualidade de tensão que represente a elevação de temperatura devido ao efeito combinado dos distúrbios que podem estar presentes na tensão de fornecimento.

7.2.Constantes de Ponderação

Considerando que foram feitos aproximadamente 60 horas de testes dos quais se registraram, além das temperaturas, os valores instantâneos das tensões de linha aplicadas ao motor e as correntes instantâneas de fase absorvidas pelo motor, a partir desses registros pode-se calcular os valores dos parâmetros de qualidade referentes ao desequilíbrio de frequência fundamental, assim como, os parâmetros relacionados às frequências harmônicas. A partir dos valores das elevações de temperaturas registrados e dos valores dos parâmetros de qualidade calculados

para cada distúrbio, para cada teste, foram feitas regressões lineares, relacionando a elevação de temperatura com o parâmetro de qualidade. Dessas regressões obtiveram-se os valores das constantes de ponderação procuradas. Além disso, foi possível comparar os resultados dos parâmetros de qualidade obtidos para cada um dos métodos de cálculo sugeridos no capítulo VI, a partir das componentes nos eixos (d) e (q) e da NEI.

A Figura 7-1 mostra o resultado obtido para a constante de ponderação obtida da regressão linear da elevação de temperatura dos enrolamentos do motor de indução em função do parâmetro de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental calculado a partir dos testes realizados.

Figura 7-1 – Elevação de temperatura em função do parâmetro de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental.

A partir dos pares ordenados do parâmetro de qualidade FDu calculado e da elevação de temperatura dos enrolamentos, a regressão linear indica uma constante de ponderação desse parâmetro de valor aproximadamente igual a 0,9. Essa

constante mostra que para cada 1 % de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental ocorre uma elevação de temperatura de 0,9 °C dos enrolamentos do motor de indução.

A Figura 7-2 mostra os resultados obtidos para três constantes de ponderação obtidas das regressões lineares da elevação de temperatura dos enrolamentos do motor de indução em função do parâmetro de distorção harmônica calculado com base nos testes realizados para os casos com harmônicas equilibradas (trifásicas), desequilibradas (monofásicas) e todos os resultados dos testes juntos.

Figura 7-2 – Elevação de temperatura em função do parâmetro de distorção harmônica.

Dos pares ordenados do parâmetro de qualidade FHu e elevação de temperatura dos enrolamentos obtém-se, das regressões lineares, as constantes de ponderação desse parâmetro de valores aproximadamente iguais a 0,21; 0,30 e 0,28 correspondentes, respectivamente, a harmônicas desequilibradas, equilibradas e de todos os resultados de testes de harmônicas juntos. A constante que deve ser considerada mais representativa neste caso é a que resultou da regressão linear

obtida de todos os testes juntos, já que essa deve ser possivelmente a regra geral encontrada nos sistemas de distribuição em baixa tensão. Então, para cada 1 % de distorção harmônica de tensão ocorre uma elevação de temperatura de 0,28 °C dos enrolamentos do motor de indução.

Utilizando a equação (6.5) com os valores das constantes de ponderação obtidas das regressões lineares apresentadas anteriormente, foram calculados os parâmetro de qualidade de tensão FQu a fim de representar os efeitos combinados dos distúrbios estudados.

A Figura 7-3 mostra os valores obtidos dos parâmetros de qualidade de tensão FQu, FDu e FHu, que são a representação do comportamento da elevação de temperatura dos enrolamentos do motor de indução devido a ação dos distúrbios de desequilíbrio de frequência fundamental, de distorções harmônicas e da ação combinada dos outros dois.

O parâmetro de qualidade de tensão FQu mostra que a elevação de temperatura devida ao efeito combinado dos distúrbios de desequilíbrio de frequência fundamental e distorção harmônica de tensão é maior. Esse efeito já foi observado dos resultados dos testes realizados. Apesar disso, ainda não é possível afirmar que esse valor é representativo de qualquer condição genérica de funcionamento, embora já seja um bom indicativo.

Figura 7-3 – Elevação de temperatura em função dos parâmetros FQu, FDu e FHu.

Pode-se verificar da análise da figura 7-3 que, para uma mesma porcentagem de distúrbio, o valor de elevação de temperatura indicado pelo parâmetro combinado FQu é bem superior aos outros dois parâmetros individuais FDu e FHu. Isso indica que o valor limite admitido para o parâmetro de qualidade de tensão FQu deve ser menor que os valores admitidos para os parâmetros de desequilíbrio de frequência fundamental FDu ou de distorção harmônica FHu agindo separadamente.

Obter os coeficientes de ponderação dos parâmetros de qualidade de cada distúrbio, deve ser objeto de estudos futuros que dependem da realização de mais ensaios, além de medições das composições espectrais características das tensões nos sistemas de distribuição em vários níveis de tensão. Não há pretensão de encerrar o assunto aqui, neste trabalho, devido ao número limitado de testes realizados e necessidade de se investigar outras questões relacionadas aos aumentos de perdas causados por distúrbios e seu reflexo sobre o parâmetro de qualidade proposto.

Apesar de não ser objetivo final desse trabalho encerrar a questão sobre os fatores de ponderação a serem utilizados, foram feitas algumas mudanças nos valores dos coeficientes de peso dos parâmetros de qualidade avaliados. A Figura 7-4 mostra três curvas A, B e C. A curva A foi obtida com os coeficientes $k_1=0,88$ e $k_h=0,28$, a curva B com os coeficientes $k_1=1,0$ e $k_h=0,28$, e a curva C com os coeficientes $k_1=1,0$ e $k_h=0,35$. A curva B admite que os desequilíbrios de frequência fundamental devem entrar com peso máximo no cálculo do parâmetro combinado, devido ao seu potencial de degradação ser muito elevado. Na curva C, além de se considerar que o desequilíbrio de frequência fundamental é muito importante, considera-se um aumento da influência das harmônicas, já que os testes com harmônicas múltiplas indicaram uma influência maior na elevação de temperatura, em relação à ação de harmônicas individuais (o valor 0,35 para o coeficiente das harmônicas foi usado a fim de ajustar a curva de elevação de temperatura resultante para o caso de desequilíbrio de frequência fundamental e distorção harmônica equilibrada agindo simultaneamente). Mais uma vez, ressalta-se que os valores dos coeficientes a serem usados na equação (6.5), devem ser obtidos com base em estudos futuros com a realização de mais testes e medições de harmônicas em campo.

Figura 7-4 – Elevação de temperatura em função dos parâmetros FQu para diferentes coeficientes de ponderação.

Na Figura 7-4 pode-se comparar o parâmetro de qualidade de tensão obtido da curva C com o obtido da curva A. Nota-se que para uma mesma elevação de temperatura o fator de qualidade de tensão obtido pela curva C é maior. Essa curva está sendo proposta porque apresenta uma melhor aderência em relação aos efeitos de elevações de temperatura que ocorrem nos motores de indução trifásicos devido a distúrbios de desequilíbrios de frequência fundamental combinados a distúrbios de mais de uma ordem harmônica na tensão (que deve ser o caso mais geral). Por exemplo: para uma elevação de temperatura de 3 °C o fator de qualidade de tensão indicado na curva C é de 3% enquanto que na curva A esse fator é de 2,5%. Considerando um limite de compatibilidade para o fator de qualidade de tensão de 2%, o fator obtido pela curva C é muito mais severo que o indicado pela curva A.

7.3.Comparações de Resultados de Parâmetros de Qualidade de Tensão

A Tabela 7-1 apresenta valores dos parâmetros de qualidade de tensão calculados pelos dois métodos mostrados no capítulo VI. Esses cálculos foram feitos para todos os 60 testes realizados, porém foram mostrados aqui apenas os resultados dos parâmetros calculados para os ensaios 1, 2, 6, 7 e 8 referidos no item 4.3. O fator de qualidade de tensão F_{Qu} foi calculado com os valores dos coeficientes de ponderação usados para obter a curva C da Figura 7-4. Estes resultados são apresentados para demonstrar que os parâmetros obtidos pelos dois métodos sugeridos (DQ e NEI) permitem obter resultados iguais para os parâmetros de qualidade estudados. Notam-se, das avaliações dos resultados, diferenças inferiores a 0,1 %, em valor absoluto, em alguns casos, para o parâmetro de distorção harmônica, porém, não se verificou diferença no parâmetro de desequilíbrio de frequência fundamental. Para o parâmetro de qualidade F_{Qu} , as diferenças ficam ainda mais reduzidas em função dos coeficientes de ponderação usados para obter esse parâmetro. Além dos valores dos fatores de qualidade de tensão calculados em cada teste, também é mostrado na Tabela 7-1 os valores das elevações de temperatura dos enrolamentos do motor de indução obtidas em cada teste aplicado.

Tabela 7-1 – Parâmetros de Qualidade de Tensão

Ensaio	Teste	Desequilíbrio de Frequência Fundamental (FDu) [%]			Distorção Harmônica (FHu) [%]		Parâmetro de Qualidade de Tensão (FQu) [%]		Elevação de Temperatura [°C]
		Método			Método		Método		
		Clássico	Eixos (DQ)	NEI	Eixos (DQ)	NEI	Eixos (DQ)	NEI	
1	A	0,22	0,22	0,22	0,15	0,15	0,27	0,27	0,00
	B	3,27	3,27	3,27	0,16	0,16	3,33	3,33	2,78
	C	5,31	5,31	5,30	0,12	0,11	5,35	5,34	4,78
	D	0,19	0,19	0,19	4,96	4,96	1,93	1,93	2,18
	E	0,19	0,19	0,19	9,80	9,79	3,62	3,61	3,78
	F	1,19	1,19	1,19	19,93	19,85	8,17	8,14	10,58
2	A	0,20	0,20	0,20	0,13	0,13	0,24	0,24	0,00
	B	0,21	0,21	0,21	5,18	5,18	2,02	2,02	1,38
	C	0,19	0,19	0,19	10,16	10,15	3,74	3,74	2,28
	D	0,20	0,20	0,20	19,83	19,77	7,14	7,12	5,88
	E	0,20	0,20	0,20	4,89	4,89	1,92	1,92	1,38
	F	0,21	0,21	0,21	9,85	9,84	3,66	3,66	1,58
	G	0,20	0,20	0,20	19,84	19,77	7,14	7,12	3,78
	H	0,21	0,21	0,21	22,19	22,14	7,98	7,96	5,18
6	A	0,45	0,45	0,44	0,13	0,13	0,49	0,49	0,00
	B	2,59	2,59	2,59	2,35	2,36	3,41	3,41	4,90
	C	4,54	4,54	4,53	4,83	4,88	6,23	6,24	10,00
	D	2,48	2,48	2,48	7,16	7,19	4,98	4,99	5,90
	E	2,57	2,57	2,57	2,45	2,46	3,43	3,43	4,90
	F	4,52	4,52	4,51	4,91	4,95	6,24	6,25	9,90
	G	2,46	2,46	2,46	7,21	7,23	4,99	4,99	5,10
7	A	0,55	0,55	0,55	0,09	0,09	0,58	0,58	0,00
	B	2,49	2,49	2,49	2,48	2,50	3,36	3,36	4,60
	C	4,45	4,45	4,45	5,02	5,05	6,21	6,21	9,30
	D	2,36	2,36	2,36	7,17	7,19	4,87	4,88	4,20
	E	2,47	2,47	2,47	2,39	2,40	3,30	3,31	4,00
	F	4,42	4,42	4,42	4,84	4,88	6,12	6,12	9,00
	G	2,33	2,33	2,33	7,10	7,12	4,82	4,82	4,00
8	A	0,62	0,62	0,62	0,16	0,16	0,67	0,67	0,00
	B	2,44	2,44	2,44	4,96	4,97	4,17	4,18	4,20
	C	2,43	2,43	2,43	14,90	14,88	7,65	7,64	7,70
	D	2,41	2,41	2,41	5,18	5,18	4,23	4,22	3,80
	E	2,39	2,39	2,39	15,10	15,07	7,68	7,67	5,65
	F	2,39	2,39	2,39	4,87	4,87	4,09	4,09	3,60
	G	2,38	2,38	2,38	14,78	14,75	7,55	7,54	4,40

Com base nos valores obtidos para os indicadores de qualidade de tensão e as respectivas elevações de temperaturas observadas, podem ser feitos os seguintes comentários:

- Quando o motor foi submetido apenas a distúrbios de desequilíbrio de frequência fundamental (ensaio 1, testes B e C, da Tabela 7-1) os valores do parâmetro de qualidade proposto (FQu), indicaram satisfatoriamente as elevações de temperatura que ocorreram nos enrolamentos do motor, sendo, portanto, adequado para representar bem esta situação de distúrbio da tensão de fornecimento.
- Quando o motor foi submetido apenas a distúrbios de frequências harmônicas (ensaio 1, testes D a F, e todos os testes do ensaio 2 da Tabela 7-1) os valores do parâmetro de qualidade proposto (FQu) indicaram satisfatoriamente as elevações de temperatura que ocorreram nos enrolamentos do motor, principalmente, no caso em que houve aplicação de mais de uma ordem harmônica agindo simultaneamente. Mesmo os casos em que se aplicou ao motor apenas uma componente harmônica agindo individualmente, o parâmetro proposto indicou satisfatoriamente as elevações de temperaturas que ocorreram. Portanto, o parâmetro de qualidade de tensão proposto (FQu), também representa bem as elevações de temperaturas para estas situações de distúrbios da tensão de fornecimento.
- Quando o motor foi submetido a distúrbios de desequilíbrios de frequência fundamental e frequências harmônicas, agindo simultaneamente (ensaios 6, 7 e 8 da Tabela 7-1) o parâmetro de qualidade de tensão proposto indicou

satisfatoriamente, para todos os testes, as elevações de temperaturas observadas nos enrolamentos do motor. Estes casos devem ser os mais comuns encontrados nos sistemas de distribuição, e, portanto, é o que possui maior representatividade para o trabalho desta tese. Nota-se, nestes casos, grande aderência entre os valores do indicador proposto com as elevações de temperaturas observadas nos enrolamentos do motor.

Ressalta-se, ainda, que o indicador de qualidade de tensão proposto (FQu) indicou adequadamente, para a maioria dos testes aplicados, as ocorrências de elevações de temperaturas observadas nos enrolamentos do motor submetido aos testes. Os testes em que ocorreu um desvio maior entre o indicador e a elevação de temperatura do enrolamento correspondem a situações pouco prováveis de serem observadas na prática, portanto não são de impacto negativo para o indicador proposto, mesmo porque, nesses casos, o indicador tende a ser conservativo no sentido de proteger os equipamentos. Os resultados dos indicadores obtidos de todos os ensaios realizados estão mostrados no anexo A, na Tabela A-1.

7.4.Avaliações dos Sinais no Tempo

Considerando que em cada teste aplicado, após o motor ter atingido regime térmico, além das temperaturas dos enrolamentos, também foram registrados os valores instantâneos dos sinais das tensões de linha aplicadas ao motor, assim como, as correntes de fase que circularam, e que, esses registros foram feitos com 512 amostras por ciclo, por um período de 20 ciclos. Foi possível aplicar os métodos de decomposição de sinais propostos no capítulo VI, tanto para a grandeza tensão como para a grandeza da corrente e obter uma série de outras informações que

ajudam a compreender outros efeitos que os distúrbios na tensão provocam sobre o comportamento do motor de indução.

A Figura 7-5 mostra os sinais de tensões e correntes nos sistemas de representação ABC, (DQ) e NEI, para os sinais de frequência fundamental e harmônicas obtidos dos métodos de decomposição apresentados no caso do teste de aplicação de 3% de desequilíbrio de frequência fundamental agindo simultaneamente a 15% de amplitude de 5ª harmônica imposta a uma das fases (desequilibradas).

As Tabelas 7-2, 7-3 e 7-4 resumem os valores obtidos dos sinais apresentados para o teste citado. Das análises das formas de ondas mostradas e dos resultados apresentados nas tabelas já citadas, observa-se que a imposição de uma componente de seqüência negativa na tensão causou uma elevada componente de seqüência negativa de corrente, confirmando que a impedância de seqüência negativa é muito inferior à impedância de seqüência positiva. Estes resultados foram obtidos em todos os casos de testes aplicados. Quando são aplicadas tensões harmônicas ao motor, há o aparecimento de correntes harmônicas das mesmas ordens harmônicas que as existentes na tensão. Isto causou, além de elevação de temperatura conforme mostraram os resultados dos testes apresentados no capítulo IV, também, um elevado ruído audível e pulsações de torque, apesar de não registrados.

Figura 7-5 – Tratamentos dos sinais de tensões e correntes adquiridas referente ao teste com 3% de desequilíbrio de frequência fundamental e 15% de amplitude de 5ª harmônica desequilibrada.

Tabela 7-2 – Valores eficazes das componentes de fase dos sinais registrados
Componentes de Frequência Fundamental

Tensões nas Fases [V]			Correntes nas Fases [A]		
AB	BC	CA	AB	BC	CA
201,0	202,1	214,8	1,18	1,53	2,10

Tabela 7-3 – Valores eficazes das componentes de seqüências dos sinais registrados
Componentes de Seqüência de Frequência Fundamental

Tensões de Seqüência [V]		Correntes de Seqüência [A]	
Positiva	Negativa	Positiva	Negativa
205,8	9,3 (4,5%)	1,54	0,57 (37%)

Tabela 7-4 – Parâmetros de qualidade calculados para os sinais registrados

Parâmetros					
Qualidade de Tensão [%]			Qualidade de Corrente [%]		
FDu	FHu	FQu	FDi	Fhi	FQi
4,5	4,8	6,2	37,3	21,7	48,1

Tabela 7-5 – Impedâncias de seqüência positiva e negativa calculadas

Impedâncias [Ω]	
Seq positiva	Seq Negativa
133,7	16,3

Conforme mostra a Tabela 7-2, um pequeno desequilíbrio de tensão de frequência fundamental impõe ao motor de indução um forte desequilíbrio de corrente de frequência fundamental. Este mesmo comportamento pode ser observado diretamente dos valores das componentes de seqüências positiva e negativa mostrados na Tabela 7-3 obtidos deste ensaio. A partir da Tabela 7-3 verifica-se que, para o motor submetido ao teste, 4,5% de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental causa um desequilíbrio de corrente de frequência fundamental de 37%. Observando os indicadores apresentados na Tabela 7-4 observa-se claramente que esses indicadores são adequados para mostrar os distúrbios presentes na tensão, pois refletem todos os fenômenos envolvidos com poucos parâmetros. Os valores das impedâncias de seqüência positiva e negativa para a frequência fundamental podem ser observados diretamente na Tabela 7-4 e confirmam que a impedância de seqüência negativa de frequência fundamental é bastante inferior à impedância de seqüência positiva. As Tabelas 7-2, 7-3 e 7-4 mostram os resultados obtidos de apenas um dos testes aplicados, sendo os

resultados obtidos de todos os testes realizados colocadas no anexo B, nas Tabelas B-1, B-2 e B-3.

Capítulo VIII

8. CONCLUSÕES

8.1. Contribuições

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou apresentar uma série de contribuições das quais se destacam:

1) A principal contribuição deste trabalho corresponde à proposta de um indicador de qualidade de tensão capaz de refletir os efeitos térmicos sofridos por motores trifásicos de indução devido a distúrbios de desequilíbrio de frequência fundamental e distorções harmônicas na tensão de fornecimento. Ficou evidente, pelos resultados apresentados que o indicador proposto reflete adequadamente distúrbios de desequilíbrio de frequência fundamental agindo simultaneamente com componentes harmônicas. O indicador proposto se mostrou muito adequado para refletir os distúrbios ocorridos na tensão e que causam efeitos de degradação sobre os motores de indução.

2) Uma outra contribuição importante corresponde ao fato de ter mostrando que o indicador de qualidade de tensão proposto, além de representativo das condições da tensão de fornecimento, pode reduzir a quantidade de indicadores de qualidade de fornecimento de energia elétrica a serem monitorados pelos órgãos reguladores, por exemplo, não é necessário um indicador específico para cada grandeza de fase ou de linha, pois o indicador proposto reflete o efeito combinado de distúrbios na tensão que ocorrem em qualquer das fases ou linhas do sistema de fornecimento.

3) A indicação de que as impedâncias de seqüência positiva e negativa dos motores de indução para harmônicas superiores à freqüência fundamental são praticamente iguais também é uma contribuição importante apresentada. Esta conclusão pode auxiliar na definição de modelos de representação para máquinas de indução.

4) Mais uma outra contribuição que pode ser obtida do trabalho desta tese é a recomendação de que as normas não devem restringir a aplicação de qualquer que seja o algoritmo de cálculo usado para forneça um parâmetro de qualidade de energia, desde que, esse algoritmo obtenha valores equivalentes aos obtidos pelos algoritmos recomendados pelas normas. Esta conclusão é aqui apresentada considerando que, nesta tese, foi utilizado um método não convencional de cálculo de desequilíbrio na freqüência fundamental e de distorções harmônicas, que fornecem valores iguais aos obtidos por métodos convencionais.

5) A metodologia utilizada para a definição dos fatores de ponderação usados para calcular o fator de qualidade de tensão que combina distúrbios de freqüência fundamental e distorções harmônicas presentes na tensão também é uma importante contribuição. Além da metodologia apresentada, a determinação dos valores dos coeficientes de ponderação utilizados no trabalho desta tese são também uma contribuição.

6) Além das contribuições anteriormente mencionadas, a série de resultados práticos apresentados, a metodologia utilizada para a realização destes ensaios e a forma de avaliar como distúrbios na tensão afetam os motores trifásicos de indução constituem também importantes contribuições.

8.2.Recomendações para Trabalhos Ulteriores

Apesar das várias e importantes contribuições apresentadas no item anterior, algumas questões ainda necessitam de respostas, ou, necessitam serem complementadas para consolidar o indicador de qualidade de tensão proposto. Sugere-se uma lista de trabalhos ulteriores que podem ser desenvolvidos para responder às questões que ainda podem ser levantadas. Com isso, pode-se complementar os estudos realizados no trabalho desta tese, com a finalidade de consolidar o indicador de qualidade de tensão proposto. Os estudos ulteriores que podem ser desenvolvidos são:

- 1) verificar como o aumento de perdas no motor de indução relaciona-se com o valor do parâmetro de qualidade de tensão proposto, com objetivo de consolidar sua representatividade em termos de aumento das perdas no motor;
- 2) melhorar a representatividade dos fatores de ponderação utilizados na expressão do fator de qualidade de tensão proposto por meio da realização de mais testes em motores de indução;
- 3) investigar os efeitos de desequilíbrios de tensão de frequência fundamental e distorções harmônicas (inclusive sub-harmônicas) agindo separados e simultaneamente sobre outros equipamentos de uso comum nas redes de distribuição de energia elétrica, estabelecendo relação entre os efeitos e o indicador de qualidade de tensão proposto neste trabalho;

4) investigar, por meio de campanha de medição, as composições espectrais dos sinais de tensão mais comuns presentes nos sistemas de fornecimento de energia para servir de subsídios à definição dos fatores de ponderação usados para o cálculo do indicador de qualidade de tensão proposto neste trabalho;

5) investigar como os sinais nos sistemas de representação (DQ) e NEI se comportam em relação a outros parâmetros de um motor de indução como torque, potências, perdas, etc.

8.3.Considerações Finais

Finalmente, pode-se avaliar que o desenvolvimento deste trabalho possibilitou aumentar o conhecimento de como os indicadores de qualidade de energia elétrica são capazes de representar bem as condições não adequadas a que podem estar submetidos equipamentos conectados às redes de energia elétrica, devido a distúrbios na tensão. Mostrou que a qualidade da tensão pode ser obtida por meio um indicador de qualidade capaz de refletir o efeito combinado de distúrbios de frequência fundamental e de distorções harmônicas, reduzindo, em consequência, a quantidade de indicadores a serem monitorados para aferir a qualidade da tensão de fornecimento. Também, mostrou métodos não convencionais para cálculo de indicadores de qualidade de tensão. Apresentou uma metodologia consistente que permitiu a definição de um indicador de qualidade que reflete as condições da tensão de fornecimento relacionadas aos efeitos degradantes que distúrbios na tensão causam sobre motores de indução. Além disso, criou uma série de possibilidades de estudos ulteriores nesta área de qualidade de energia elétrica para

apoio aos órgãos reguladores, às concessionárias de energia elétrica, aos centros de pesquisa e, principalmente, aos consumidores de energia elétrica em busca de melhor conhecimento das condições da qualidade de energia fornecida.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Abreu, J. Policarpo G. de; Eigeles Emanuel, A.; Induction Motors Loss of Life to Voltage Imbalance and Harmonics: In: Harmonics and Quality of Power, Proceedings 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Oct. 2000. Anais eletrônicos. v1. p.75-80.

- [2] Abreu, J. Policarpo G. de; Eigeles Emanuel, A.; Induction Motors Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and Its Estimated Cost, IEEE, Transactions on Industry Applications, vol. 38, N° 1, Jan/Feb 2002.

- [3] Books, C. L.; Dugan, R. C.; Wacławski, M.; Sudaram, A. – Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance – www.pgnet.electrotek.com/

- [4] Brancato, Emanuel L., Estimation of Lifetime Expectancies of Motors, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 8, N° 3, May/Jun 1992.

- [5] Brancato, Emanuel L., Life Expectancy of Motors, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 7, N° 6, Nov/Dec 1991.

- [6] CIGRÉ, A New Simple and Effective Approximate Formulation for the Determination of Three-phase Unbalances by the Voltmeter Method, Belgique, CIGRÉ, 1986.

- [7] Cutri, Rodrigo, Compensação de Desequilíbrios de Carga Empregando Conversor Estático Operando com Modulação em Largura de Pulso, Dissertação, USP, São Paulo, 2004.
- [8] Choi, S., Lee, W., Hyun, D., Lee, T., The Control System of The active Power Filter Considering Power Factor in Unbalanced Load, In: Industry Applications Conference, Oct. 2000, Anais eletrônicos v.4 p.2123-2128.
- [9] Clarke, Edith; Circuit analysis of AC Power System, v.1, New York: John Wiley & sons, 1943.
- [10] Cummings, P. G., Estimating the Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors, IEEE, 32nd Petroleum and Chemical Ind. Conf. Houston, TX, Sept. 1985.
- [11] Deckmann, S. M., Marafão, F. P., Time Based Decompositions of Voltage, Current and Power Functions, Proceedings 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Oct. 2000. Anais eletrônicos. v1 p.289-294.
- [12] Duarte, Silvio Xavier, Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados para a Monitoração da Tensão em Regime Permanente, Dissertação, USP, São Paulo, 2000.

[13] Fuchs, E. F., Roesler, D. J., Kovacs, K. P., Aging of Electrical Appliances due to Harmonics of the Power System's Voltage, IEEE Trans. on Power Delivery, N° 3, July 1986, pp.301-07.

[14] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Kusko, A. Jr., Máquinas Elétricas – Conversão Eletromecânica da Energia Processos, Dispositivos e Sistemas, McGraw-Hill do Brasil, 1975.

[15] Ferrero, A., Morando, P; Ottoboni, R. ; Superti-Furga, G., On the Meaning of the Park Power Components in Three-Phase Systems under Non-Sinusoidal Conditions. ETEP, v.3, N° 1, Jan/Fev 1993.

[16] Ferrero, A., Unbalanceing and Distorting Loads: Can They Be Detected and Their Detrimental Effect Be Measured? In: Proceedings 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Oct 1998. Anais eletrônicos v.2.p.809-813.

[17] Hydro-Québec, CEA (Canadian Electricity Association) 220 D 711 - Power Quality Measurement Protocol CEA Guide to Performing Power Quality Surveys, Prepared by Hidro-Québec, May 1996.

[18] Hydro-Québec, Caractéristiques Électriques des tensions d'Alimentacion du Réseau d'Hydro-Québec, 6/Jun/1996.

[19] IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery, ANSI C50.32-1976 and Std 117-1974.

[20] IEC-61000-4-30 - draft 2000 - Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-30: Testing and measurement technique - Power quality measurement methods, 2000.

[21] IEC - 61000-4-7 – final draft – Ed. 2.0 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement technique - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto - 19.07.2002.

[22] Jordão, R. G., Transformadores, 1ª ed, São Paulo, Edgard Blucher, 2002.

[23] Kosow, I., Máquinas Elétricas e Transformadores, 14ª ed, São Paulo, Globo,

[24] Kaplan, W., Advanced Calculus, World Student Series, 4ª ed, Addison-Wesley Publishing Company, 1969.

[25] Kreyszig, E., Advanced Engineering Mathematics, 7ª ed, John Wiley and Sons. Inc, USA, 1993.

[26] LabView - Basics Course Manual, February, 1996.

[27] Lathi, B. P., Sistemas de Comunicação, Guanabara, Rio de Janeiro, 1987.

- [28] Mafarão, F. P., Deckmann e Paiva, E. P., Instantaneous Evaluation of Power Quality Indexes, 5º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP'99) 1, 1999, p.117-122.
- [29] Mafarão, F. P., Deckmann, S., e Paiva, E. P., Monitor Digital de Qualidade de Energia Elétrica: Obtenção On Line de Indicadores de Qualidade, III Seminário Brasileiro de Qualidade sobre Energia Elétrica, 1999, p.225-230.
- [30] Mafarão, F. P., Contribuição para a Teoria de Potências Instantâneas e Aplicações em Qualidade de Energia, Dissertação, Unicamp, São Paulo, 2000.
- [31] Normas NEMA – MG1- Section IV - Performance Standards Applying to All Machines, Part 30, 1993.
- [32] Normas NEMA – MG1- Section II - Performance Standards Applying to All Machines, Part 14, 1993.
- [33] ANEEL- Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 24/03/2006.
- [34] Robba, E. J. et al., Introdução a Sistemas Elétricos de Potência, 2ed, São Paulo, Edgard Blucher, 1996.
- [35] Resolução da ANEEL nº 505 de 26 de novembro de 2001.

[36] Senni, S.; Wolfs, P, J., Novel Topology of Unbalanced Load in Single Phase Electric Traction Systems, In: Power Electronics Specialists Conference, 2001-PESC'2002 - IEEE ³³rd Annual, June 2002. Anais v.3.p.1208-1212, 2002.

[37] Wakileh, G. J., Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design, Springer, New York; 2001.

ANEXO A

Valores dos parâmetros de qualidade de tensão calculados para os ensaios de 1 a 8.

Tabela A-1– Parâmetros de Qualidade de Tensão

Ensaio	Teste	Desequilíbrio de Frequência Fundamental (FDu) [%]			Distorção Harmônica (FHu) [%]		Parâmetro de Qualidade de Tensão (FQu) [%]		Elevação de Temperatura [°C]
		Método			Método		Método		
		Clássico	Eixos (DQ)	NEI	Eixos (DQ)	NEI	Eixos (DQ)	NEI	
1	A	0,22	0,22	0,22	0,15	0,15	0,27	0,27	0,00
	B	3,27	3,27	3,27	0,16	0,16	3,33	3,33	2,78
	C	5,31	5,31	5,30	0,12	0,11	5,35	5,34	4,78
	D	0,19	0,19	0,19	4,96	4,96	1,93	1,93	2,18
	E	0,19	0,19	0,19	9,80	9,79	3,62	3,61	3,78
	F	1,19	1,19	1,19	19,93	19,85	8,17	8,14	10,58
2	A	0,20	0,20	0,20	0,13	0,13	0,24	0,24	0,00
	B	0,21	0,21	0,21	5,18	5,18	2,02	2,02	1,38
	C	0,19	0,19	0,19	10,16	10,15	3,74	3,74	2,28
	D	0,20	0,20	0,20	19,83	19,77	7,14	7,12	5,88
	E	0,20	0,20	0,20	4,89	4,89	1,92	1,92	1,38
	F	0,21	0,21	0,21	9,85	9,84	3,66	3,66	1,58
	G	0,20	0,20	0,20	19,84	19,77	7,14	7,12	3,78
	H	0,21	0,21	0,21	22,19	22,14	7,98	7,96	5,18
3	A	0,23	0,23	0,23	0,11	0,11	0,26	0,26	0,00
	B	0,28	0,28	0,28	2,57	2,58	1,18	1,18	1,00
	C	0,45	0,45	0,45	4,89	4,91	2,16	2,17	1,60
	D	0,65	0,65	0,65	7,16	7,06	3,16	3,12	2,90
	E	0,29	0,29	0,29	2,29	2,29	1,09	1,09	0,10
	F	0,41	0,41	0,41	4,68	4,67	2,05	2,04	0,60
	G	0,89	0,89	0,89	9,20	9,16	4,11	4,09	2,10
4	A	0,28	0,28	0,28	0,16	0,16	0,34	0,34	0,00
	B	0,35	0,35	0,35	2,42	2,42	1,20	1,20	0,60
	C	0,45	0,45	0,45	4,74	4,73	2,10	2,10	1,00
	D	0,96	0,96	0,96	9,26	9,19	4,19	4,17	1,90
	E	0,39	0,39	0,39	2,37	2,37	1,22	1,21	0,70
	F	0,51	0,51	0,51	4,68	4,66	2,14	2,14	0,90
	G	0,99	0,99	0,99	9,21	9,15	4,21	4,19	1,40
5	A	0,38	0,38	0,38	0,13	0,13	0,43	0,43	0,00
	B	0,42	0,42	0,42	2,31	2,30	1,22	1,22	0,35
	C	0,54	0,54	0,54	4,66	4,64	2,17	2,17	0,80
	D	0,99	0,99	0,99	9,17	9,12	4,20	4,18	1,30
	E	2,65	2,65	2,65	2,61	2,64	3,56	3,57	3,50
	F	4,59	4,60	4,59	5,12	5,23	6,39	6,42	10,10
	G	2,50	2,50	2,50	7,35	7,23	5,07	5,03	5,50

Tabela A-1– Parâmetros de Qualidade de Tensão (continuação)

Ensaio	Teste	Desequilíbrio de Frequência Fundamental (FDu) [%]			Distorção Harmônica (FHu) [%]		Parâmetro de Qualidade de Tensão (FQu) [%]		Elevação de Temperatura [°C]
		Método			Método		Método		
6	A	0,45	0,45	0,44	0,13	0,13	0,49	0,49	0,00
	B	2,59	2,59	2,59	2,35	2,36	3,41	3,41	4,90
	C	4,54	4,54	4,53	4,83	4,88	6,23	6,24	10,00
	D	2,48	2,48	2,48	7,16	7,19	4,98	4,99	5,90
	E	2,57	2,57	2,57	2,45	2,46	3,43	3,43	4,90
	F	4,52	4,52	4,51	4,91	4,95	6,24	6,25	9,90
	G	2,46	2,46	2,46	7,21	7,23	4,99	4,99	5,10
7	A	0,55	0,55	0,55	0,09	0,09	0,58	0,58	0,00
	B	2,49	2,49	2,49	2,48	2,50	3,36	3,36	4,60
	C	4,45	4,45	4,45	5,02	5,05	6,21	6,21	9,30
	D	2,36	2,36	2,36	7,17	7,19	4,87	4,88	4,20
	E	2,47	2,47	2,47	2,39	2,40	3,30	3,31	4,00
	F	4,42	4,42	4,42	4,84	4,88	6,12	6,12	9,00
	G	2,33	2,33	2,33	7,10	7,12	4,82	4,82	4,00
8	A	0,62	0,62	0,62	0,16	0,16	0,67	0,67	0,00
	B	2,44	2,44	2,44	4,96	4,97	4,17	4,18	4,20
	C	2,43	2,43	2,43	14,90	14,88	7,65	7,64	7,70
	D	2,41	2,41	2,41	5,18	5,18	4,23	4,22	3,80
	E	2,39	2,39	2,39	15,10	15,07	7,68	7,67	5,65
	F	2,39	2,39	2,39	4,87	4,87	4,09	4,09	3,60
	G	2,38	2,38	2,38	14,78	14,75	7,55	7,54	4,40

Observação: Os resultados relativos aos ensaios 9 e 10 não foram apresentados por falha na gravação das formas de ondas desses sinais.

ANEXO B

Valores das tensões e correntes eficazes da componente de frequência fundamental dos sinais monitorados para os ensaios de 1 a 8.

TabelaB-1 – Valores eficazes das componentes de fase dos sinais registrados

Ensaio	teste	Componentes de Frequência Fundamental						Ensaio	teste	Componentes de Frequência Fundamental					
		Tensões nas Fases [V]			Correntes nas Fases [A]					Tensões nas Fases [V]			Correntes nas Fases [A]		
		AB	BC	CA	AB	BC	CA			AB	BC	CA	AB	BC	CA
1	A	219,5	220,4	219,7	1,46	1,56	1,51	5	A	217,7	218,6	216,5	1,47	1,60	1,50
	B	209,6	220,4	209,6	1,44	1,92	1,30		B	217,5	218,6	216,3	1,48	1,55	1,47
	C	203,4	220,3	203,4	1,43	2,14	1,24		C	217,1	218,5	215,8	1,43	1,58	1,50
	D	219,2	219,9	219,3	1,48	1,56	1,50		D	215,4	218,4	214,1	1,45	1,61	1,47
	E	218,4	219,0	218,4	1,47	1,56	1,51		E	207,8	208,6	216,0	1,29	1,46	1,81
	F	214,8	217,7	213,1	1,51	1,63	1,42		F	201,1	202,3	215,3	1,20	1,55	2,04
2	A	219,2	220,0	219,4	1,46	1,57	1,53	6	G	206,6	208,5	214,6	1,27	1,57	1,77
	B	218,8	219,6	219,0	1,47	1,57	1,52		A	217,3	218,2	215,5	1,47	1,53	1,52
	C	218,0	218,7	218,1	1,46	1,57	1,52		B	207,5	208,3	215,3	1,26	1,52	1,89
	D	214,7	215,5	214,8	1,48	1,59	1,51		C	201,0	202,1	214,8	1,18	1,53	2,10
	E	218,7	219,4	218,7	1,48	1,58	1,50		D	206,3	208,2	214,1	1,22	1,53	1,84
	F	217,8	218,6	217,8	1,49	1,56	1,51		E	207,3	208,2	215,0	1,28	1,49	1,87
	G	214,6	215,3	214,5	1,47	1,58	1,50		F	200,8	202,0	214,4	1,13	1,55	2,05
	H	215,6	216,3	215,5	1,46	1,56	1,52		G	206,1	208,1	213,7	1,22	1,56	1,82
3	A	218,8	219,5	218,5	1,48	1,55	1,50	7	A	217,0	218,0	214,7	1,44	1,52	1,50
	B	218,7	219,5	218,3	1,50	1,57	1,48		B	207,3	208,1	214,5	1,25	1,53	1,84
	C	218,0	219,5	217,7	1,48	1,59	1,47		C	200,7	201,9	213,9	1,14	1,50	2,06
	D	217,3	219,4	216,9	1,51	1,59	1,40		D	206,1	208,0	213,2	1,22	1,52	1,81
	E	218,3	219,2	217,9	1,45	1,55	1,51		E	207,2	208,0	214,2	1,25	1,46	1,85
	F	217,9	219,2	217,4	1,47	1,56	1,48		F	200,7	201,8	213,7	1,18	1,53	2,02
	G	216,2	219,1	215,7	1,42	1,62	1,47		G	206,0	207,9	212,9	1,24	1,58	1,82
4	A	218,1	219,0	217,6	1,45	1,57	1,51	8	A	216,7	217,7	213,8	1,29	1,44	1,38
	B	217,9	218,9	217,3	1,48	1,55	1,50		B	206,8	207,6	213,5	1,14	1,39	1,69
	C	217,4	218,8	216,8	1,44	1,55	1,49		C	204,7	205,5	211,3	1,11	1,36	1,69
	D	215,7	218,8	215,0	1,44	1,65	1,45		D	206,7	207,5	213,3	1,14	1,30	1,70
	E	217,8	218,8	216,7	1,44	1,53	1,50		E	204,6	205,4	211,1	1,12	1,30	1,68
	F	217,3	218,7	216,2	1,46	1,56	1,50		F	206,6	207,4	213,1	1,15	1,30	1,70
	G	215,7	218,7	214,5	1,44	1,63	1,43		G	204,6	205,4	210,9	1,12	1,31	1,68

Observação: Os resultados relativos aos ensaios 9 e 10 não foram apresentados por falha na gravação das formas de ondas desses sinais.

Valores das componentes de seqüências, positiva e negativa, das tensões e correntes da componente de freqüência fundamental dos sinais monitorados para os ensaios de 1 a 8.

TabelaB-2 – Valores eficazes das componentes de seqüências dos sinais registrados

Ensaio	teste	Componentes de Sequência de Freqüência Fundamental				Ensaio	teste	Componentes de Sequência de Freqüência Fundamental			
		Tensões de Sequência [V]		Correntes de Sequência [A]				Tensões de Sequência [V]		Correntes de Sequência [A]	
		Positiva	Negativa	Positiva	Negativa			Positiva	Negativa	Positiva	Negativa
1	A	219,85	0,48	1,51	0,04	5	A	217,59	0,83	1,52	0,06
	B	213,13	6,98	1,53	0,38		B	217,45	0,90	1,50	0,03
	C	208,87	11,08	1,55	0,57		C	217,13	1,18	1,51	0,07
	D	219,48	0,42	1,51	0,03		D	215,94	2,14	1,51	0,09
	E	218,59	0,41	1,51	0,03		E	210,73	5,58	1,49	0,34
	F	215,19	2,57	1,52	0,12		F	206,10	9,46	1,54	0,55
2	A	219,52	0,44	1,52	0,05	6	G	209,86	5,24	1,52	0,31
	B	219,16	0,46	1,52	0,04		A	217,00	0,97	1,51	0,03
	C	218,28	0,41	1,52	0,05		B	210,35	5,44	1,53	0,38
	D	215,00	0,44	1,53	0,05		C	205,84	9,34	1,54	0,57
	E	218,93	0,45	1,52	0,04		D	209,51	5,19	1,51	0,36
	F	218,04	0,46	1,52	0,03		E	210,10	5,40	1,52	0,36
	G	214,78	0,42	1,52	0,05		F	205,64	9,29	1,52	0,56
	H	215,77	0,46	1,51	0,04		G	209,24	5,15	1,52	0,34
3	A	218,92	0,49	1,51	0,02	7	A	216,58	1,19	1,49	0,03
	B	218,86	0,61	1,52	0,04		B	209,90	5,22	1,52	0,35
	C	218,39	0,98	1,51	0,05		C	205,39	9,14	1,50	0,57
	D	217,87	1,41	1,50	0,06		D	209,04	4,94	1,50	0,34
	E	218,51	0,63	1,50	0,04		E	209,74	5,17	1,49	0,38
	F	218,16	0,89	1,50	0,04		F	205,27	9,07	1,53	0,51
	G	216,99	1,93	1,50	0,10		G	208,89	4,87	1,53	0,33
4	A	218,24	0,61	1,51	0,05	8	A	216,07	1,34	1,37	0,08
	B	218,04	0,76	1,51	0,03		B	209,28	5,10	1,39	0,32
	C	217,69	0,97	1,49	0,05		C	207,13	5,04	1,36	0,35
	D	216,48	2,07	1,51	0,12		D	209,12	5,04	1,35	0,36
	E	217,76	0,84	1,49	0,04		E	207,00	4,95	1,34	0,35
	F	217,39	1,10	1,51	0,04		F	209,00	4,99	1,36	0,35
	G	216,28	2,13	1,50	0,12		G	206,89	4,92	1,34	0,35

Observação: Os resultados relativos aos ensaios 9 e 10 não foram apresentados por falha na gravação das formas de ondas desses sinais.

Valores dos parâmetros de qualidade de tensão e corrente calculados para os ensaios de 1 a 8.

TabelaB-3 – Parâmetros de qualidade calculados para os sinais registrados

Tabela 5 - Parâmetros de qualidade calculados para os ensaios registrados															
Ensaio	teste	Parâmetros						Ensaio	teste	Parâmetros					
		Qualidade de Tensão [%]			Qualidade de Corrente [%]					Qualidade de Tensão [%]			Qualidade de Corrente [%]		
		FDu	FHu	FQu	FDi	FHi	FQi			FDu	FHu	FQu	FDi	FHi	FQi
1	A	0,22	0,15	0,27	2,76	5,82	4,80	5	A	0,38	0,13	0,43	4,00	8,58	7,00
	B	3,27	0,16	3,33	25,09	9,22	28,97		B	0,42	2,31	1,22	2,11	10,05	5,63
	C	5,31	0,12	5,35	37,03	14,73	44,33		C	0,54	4,66	2,17	4,78	11,23	8,71
	D	0,19	4,96	1,93	1,97	14,98	7,22		D	0,99	9,17	4,20	5,71	13,68	10,51
	E	0,19	9,80	3,62	1,85	23,49	10,07		E	2,65	2,61	3,56	22,51	16,35	28,90
	F	1,19	19,93	8,17	7,73	49,40	25,04		F	4,59	5,12	6,39	35,64	23,12	46,64
2	A	0,20	0,13	0,24	2,95	8,19	5,81	6	G	2,50	7,35	5,07	20,51	29,96	31,42
	B	0,21	5,18	2,02	2,72	9,50	6,05		A	0,45	0,13	0,49	1,79	10,35	5,41
	C	0,19	10,16	3,74	3,04	15,24	8,38		B	2,59	2,35	3,41	24,59	17,84	31,56
	D	0,20	19,83	7,14	3,08	36,55	15,87		C	4,54	4,83	6,23	37,28	21,74	48,13
	E	0,20	4,89	1,92	2,73	9,48	6,05		D	2,48	7,16	4,98	23,90	24,74	33,14
	F	0,21	9,85	3,66	1,71	13,66	6,49		E	2,57	2,45	3,43	23,60	15,25	29,64
	G	0,20	19,84	7,14	2,99	25,53	11,92		F	4,52	4,91	6,24	36,72	17,91	45,80
	H	0,21	22,19	7,98	2,80	41,05	17,17		G	2,46	7,21	4,99	22,26	17,15	28,63
3	A	0,23	0,11	0,26	1,53	7,02	3,98	7	A	0,55	0,09	0,58	2,22	11,91	6,39
	B	0,28	2,57	1,18	2,41	10,49	6,08		B	2,49	2,48	3,36	22,75	15,76	28,77
	C	0,45	4,89	2,16	3,31	16,96	9,24		C	4,45	5,02	6,21	38,17	17,31	47,70
	D	0,65	7,16	3,16	4,28	25,83	13,32		D	2,36	7,17	4,87	22,99	15,52	28,90
	E	0,29	2,29	1,09	2,54	10,04	6,05		E	2,47	2,39	3,30	25,20	17,80	32,28
	F	0,41	4,68	2,05	2,87	14,61	7,98		F	4,42	4,84	6,12	33,39	18,34	41,91
	G	0,89	9,20	4,11	6,83	20,94	14,16		G	2,33	7,10	4,82	21,78	15,65	27,61
4	A	0,28	0,16	0,34	3,34	7,81	6,08	8	A	0,62	0,16	0,67	5,87	18,56	12,36
	B	0,35	2,42	1,20	1,64	8,77	4,71		B	2,44	4,96	4,17	23,34	20,78	31,23
	C	0,45	4,74	2,10	3,46	11,41	7,45		C	2,43	14,90	7,65	25,94	35,28	39,29
	D	0,96	9,26	4,19	8,21	17,53	14,37		D	2,41	5,18	4,23	26,46	16,92	33,45
	E	0,39	2,37	1,22	2,54	9,65	5,92		E	2,39	15,10	7,68	26,30	25,62	36,27
	F	0,51	4,68	2,14	2,63	10,79	6,41		F	2,39	4,87	4,09	25,56	18,74	33,09
	G	0,99	9,21	4,21	7,86	15,38	13,26		G	2,38	14,78	7,55	25,99	21,18	34,38

Observação: Os resultados relativos aos ensaios 9 e 10 não foram apresentados por falha na gravação das formas de ondas desses sinais.