

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

S. X. Duarte, e N. Kagan

**Resumo** - Neste trabalho é discutida a necessidade de monitorar, além das tensões eficazes, os desequilíbrios de frequência fundamental e as distorções harmônicas de tensão. É apresentada 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). Propõe-se obter um parâmetro de qualidade que combina o parâmetro de desequilíbrio e o 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. Além disso, o trabalho mostra análises sobre como os distúrbios na tensão afetam um motor de indução e prejudica 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 e sistemas.

**Palavras Chave** - Desequilíbrios de Tensão, Distorção Harmônica de Tensão, Indicador de Qualidade, Impacto da Qualidade sobre Motores, Qualidade da Tensão.

## I. INTRODUÇÃO

NESSE artigo, discute-se a necessidade de monitoração de indicadores de desequilíbrios<sup>1</sup> de tensão de frequência fundamental agindo simultaneamente com harmônicas, e além disso, a possibilidade de se obter um indicador que combine desequilíbrios de frequência fundamental e distorções harmônicas de tensão. O objetivo 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 desequilíbrios de frequência fundamental e distorções harmônicas na tensão, agindo simultaneamente.

---

Este trabalho foi realizado totalmente com recursos disponibilizados pelo laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da USP – ENERQ-ct.

<sup>1</sup> Em todo o texto deste artigo, o grau ou fator de desequilíbrio de tensão deve ser entendido como a razão entre o módulo da componente de seqüência negativa pelo módulo da componente de seqüência positiva obtidos das tensões das fases ou linhas, dado em percentagem.

## II. ASPECTOS RELEVANTES E JUSTIFICATIVOS

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 [2], [3], [4], [5] e [8]. Adequadamente, a ANEEL, em conjunto com suas agências estaduais, primeiro definiu a criação de indicadores e limites relativos à continuidade do serviço. 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 limites para outros fenômenos como variações de tensão de curta duração e os desequilíbrios e distorções harmônicas de tensão, contemplando também efeitos térmicos de longa duração.

A ANEEL, através da resolução 505/2001 [8], regulamentou e definiu 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. 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 [3] e [7] se estiverem presentes cargas monofásicas e trifásicas.

## III. EFEITOS DE DISTÚRBIOS NA TENSÃO EM MOTORES DE INDUÇÃO

A partir das análises e expressões apresentadas [9], sobre motores de indução trifásicos, foram feitas outras análises. Concluiu-se dessas análises, que o parâmetro do circuito equivalente representativo das perdas no ferro é pouco influenciado pela presença de harmônicas nas tensões de alimentação dos motores de indução trifásicos. Já, a reatância de magnetização ( $X_m$ ) colocada em paralelo no circuito equivalente é diretamente proporcional à frequência. Nesse caso, quanto maiores as frequências harmônicas presentes nas tensões, maior será a reatância de magnetização.

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 reatâncias se alteram com o aumento da frequência. Os resultados obtido relativos às impedâncias equivalentes para as seqüências positiva e negativa do motor, vistas dos seus terminais de entrada, para cada ordem harmônica, mostraram que apenas para a frequência fundamental a impedância de seqüência negativa é bastante inferior à impedância de seqüência positiva. 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.

O fato da impedância de seqüência negativa para a frequência fundamental ser muito inferior à impedância de seqüência positiva explica o porquê dos motores de indução trifásicos serem tão suscetíveis a tensões de seqüência negativa, ou seja, ao grau de desequilíbrio de frequência fundamental da tensão de entrada.

Em relação aos efeitos de distorções harmônicas de tensão sobre os motores de indução, pode-se citar também a norma NEMA [6], 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 [7] recomenda, 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.

#### IV. TESTES DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM MOTOR DE INDUÇÃO

##### A. 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. 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.

O valor obtido para a constante de tempo térmica do motor foi de 12 minutos. 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.

##### B. 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 pesquisadas.

##### 1) Caso de aplicação de desequilíbrio de frequência fundamental

Ficou evidente que o desequilíbrio de seqüência negativa de frequência fundamental é bastante influente na elevação de temperatura do motor e, portanto, nocivo à vida útil do motor. Os valores de elevação de temperatura observados foram de aproximadamente 0,9 °C para cada 1 % de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental. Esses resultados dos testes ficaram bastante próximos aos obtidos e indicados pelo EPRI (PEAC) na referência [3]. Também, seguindo a linha apresentada na referência [1], a vida útil do motor ficaria bem próxima à indicada nessa referência.

##### 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 são 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.

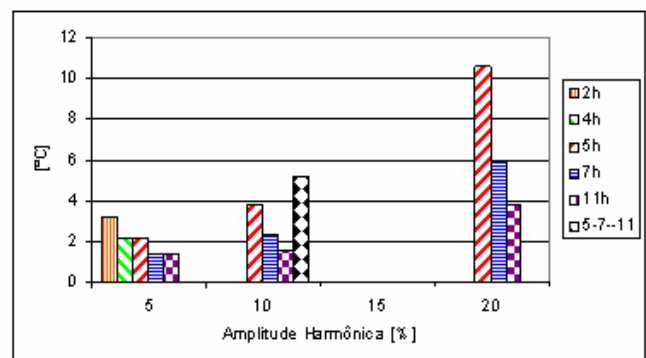


Fig. 1 – elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental e harmônica equilibradas.

Esse resultado era esperado, já que, para frequências

harmônicas superiores à fundamental as impedâncias de seqüência positiva e negativa são praticamente iguais, conforme verificação da variação das impedâncias de entrada de um motor de indução trifásico para as seqüências positiva e negativa em função da ordem harmônica. A Figura 1 mostra as elevações de temperatura resultantes para os testes com aplicação de tensão com freqüência fundamental equilibrada e harmônicas equilibradas.

### 3) Caso de aplicação de tensão de freqüência fundamental equilibrada e harmônicas desequilibradas

Quando foi aplicada ao motor uma tensão com freqüência fundamental equilibrada e freqüências harmônicas desequilibradas, ou seja, harmônicas que apresentam componentes de seqüências positiva e negativa, nos testes aplicados as componentes de seqüências tinham 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 que para o teste com essa mesma ordem harmônica desequilibrada a elevação de temperatura foi da ordem de 0,6 °C. A Figura 2 mostra as elevações de temperatura resultantes para os testes com aplicação de tensão de freqüência fundamental equilibrada e harmônicas desequilibradas.

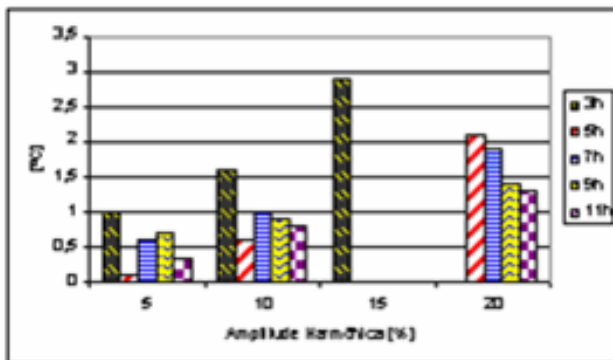


Fig. 2 – Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de freqüência fundamental equilibrada e harmônicas desequilibradas.

### 4) Caso de aplicação de tensão com desequilíbrio de freqüência fundamental e harmônicas equilibradas

Quando foram aplicadas ao motor, simultaneamente, tensão com desequilíbrio de freqüência fundamental de 3% e harmônicas equilibradas com amplitudes de 5% e 15%, as elevações de temperatura foram muito maiores que quando aplicada tensão apenas com desequilíbrio de freqüência fundamental de 3%.

Nesse caso, o aumento na elevação de temperatura em relação ao teste de tensão apenas com desequilíbrio de freqüência 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 freqüência fundamental, houve aumento da elevação de temperatura superior a 3 vezes ao obtido apenas com a aplicação de desequilíbrio de freqüência fundamental. A Figura 3 mostra as elevações de temperatura

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

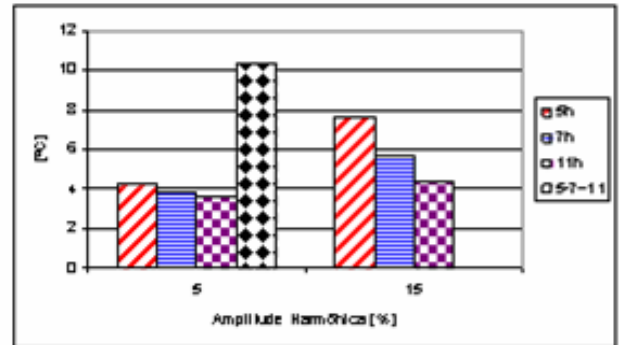


Fig. 3 – Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de freqüência fundamental com desequilíbrio de 3 % e harmônicas equilibradas com 5 % e 15 % de amplitude.

### 5) Caso de aplicação de tensão com desequilíbrio de freqüência fundamental e harmônicas desequilibradas

Quando foram aplicadas ao motor, simultaneamente, tensão com desequilíbrios de freqüência fundamental de 3% e harmônicas desequilibradas com amplitudes de 5% e 10%, as elevações de temperatura foram maiores que quando aplicadas tensão apenas com desequilíbrios de freqüência fundamental de 3%.

O aumento na elevação de temperatura em relação ao teste apenas com desequilíbrio de freqüência fundamental foi da ordem de duas vezes a elevação de temperatura obtida quando foram aplicadas apenas harmônicas desequilibradas. A Figura 4 mostra as elevações de temperatura resultantes dos testes de aplicação de tensão com 3% de desequilíbrio de freqüência fundamental e harmônicas desequilibradas com 5% e 10% de amplitude.

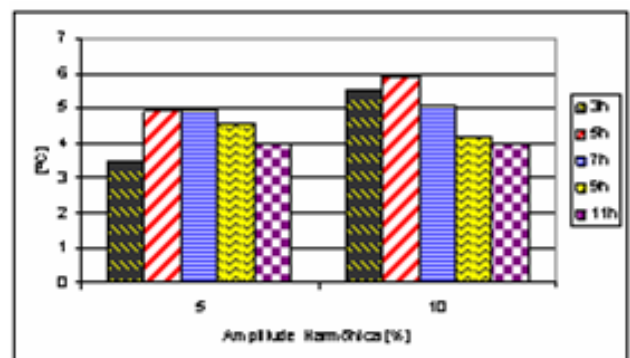


Fig. 4 – Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de freqüência fundamental com desequilíbrio de 3 % e harmônicas desequilibradas com 5 % e 10 % de amplitude.

### 6) Caso de aplicação de tensão com desequilíbrio de freqüência fundamental e harmônicas desequilibradas

Quando foram aplicadas ao motor, simultaneamente, tensão com desequilíbrios de freqüência 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%.

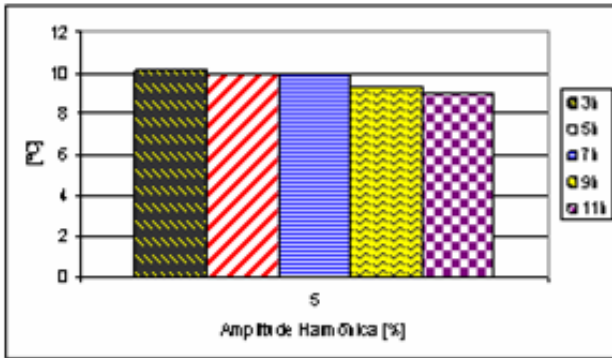


Fig. 5 – Elevação de temperatura obtida para aplicação de tensão de frequência fundamental com desequilíbrio de 5 % harmônicas desequilibradas com 5 % de amplitude.

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 5 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.

## V. PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DE DISTÚRBIOS NA TENSÃO

### A. Parâmetro de Qualidade de Tensão

A partir das representações das tensões nos sistemas DQ ou a partir da Norma Euclidiana Instantânea (NEI) é possível, identificar a ocorrência de desequilíbrios de tensão assim como a presença de distorções harmônicas em qualquer das tensões das fases. A partir dessas representações, propõem-se obter parâmetros de qualidade relativos a distúrbios devido a desequilíbrios de frequência fundamental e devido a distorções harmônicas. Além dos parâmetros referidos anteriormente propõe-se um outro parâmetro que combine os outros dois parâmetros 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.

### B. Algoritmo para Obter Parâmetros de Qualidade de Tensão a partir das Representações no Sistema DQ ou Norma Euclidiana Instantânea

Admitindo sinais da grandeza tensão, constituída por distúrbios de desequilíbrio de frequência fundamental e harmônica, é possível, a partir de técnicas para tratamentos de sinais, obter separadamente as componentes referentes a cada distúrbio [4].

Obtida a componente de frequência fundamental no sistema (DQ) ou NEI, pode-se obter o parâmetro de qualidade de desequilíbrio de tensão (FDu).

Para um período<sup>2</sup> completo do sinal de frequência fundamental, define-se o fator de qualidade de desequilíbrio de tensão como o parâmetro FDu. Esse parâmetro corresponde à amplitude de ondulação do sinal, do eixo (d) ou da NEI, dividido pelo seu valor médio.

No caso do sinal do eixo (d) a amplitude da ondulação do sinal corresponde à componente de seqüência negativa e o valor médio desse sinal corresponde à amplitude da componente de seqüência positiva.

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

Para um período completo do sinal de frequência fundamental, define-se o fator de qualidade de distorção harmônica total de tensão obtida da componente de eixo (d), (q) ou NEI como o parâmetro FHu. Esse parâmetro corresponde à raiz da média quadrática do sinal dividido pelo seu valor médio.

### C. 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, assim como, das elevações de temperaturas observadas de cada teste aplicado. A proposta para obter um parâmetro de qualidade de tensão que combine os efeitos dos distúrbios analisados está indicada na equação:  $FQu = k_1 FDu + k_h FHu$ , onde: 1)  $FQu$  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, 2)  $k_1$  é uma constante de ponderação que atribui o peso com que o desequilíbrio de frequência fundamental deve contribuir na formação do parâmetro  $FQu$ , e 3)  $k_h$  é uma constante de ponderação que atribui o peso com que as distorções harmônicas devem contribuir na formação do parâmetro  $FQu$ .

No item VI 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

<sup>2</sup> 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.



trabalho.

## VI. PARÂMETROS DE QUALIDADE DE TENSÃO OBTIDOS

### A. 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 registradas e dos valores dos parâmetros de qualidade calculados para cada distúrbio, para cada teste, foram feitas regressões lineares, relacionando a elevação de temperatura em função do 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, a partir das componentes nos eixos (DQ) e da NEI.

A partir dos pares ordenados do parâmetro de qualidade  $F_{Du}$  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 ocorreu uma elevação de temperatura de 0,9 °C dos enrolamentos do motor de indução.

Para harmônicas foram obtidas três constantes de ponderação. Foram feitas regressões lineares da elevação de temperatura dos enrolamentos do motor de indução em função do parâmetro de distorção harmônica. Essas regressões foram calculadas a partir dos testes realizados para os casos com harmônicas equilibradas (trifásicas), desequilibradas (monofásicas) e todos os resultados dos testes juntos.

Dos pares ordenados do parâmetro de qualidade  $F_{Hu}$  e elevação de temperatura dos enrolamentos, obteve-se das regressões lineares, as constantes de ponderação desse parâmetro de valores aproximadamente iguais a 0,21; 0,30 e 0,28 correspondentes 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 (1) com os valores das constantes de ponderação obtidas das regressões lineares apresentadas anteriormente, calculou-se os parâmetro de qualidade de tensão  $F_{Qu}$  a fim de representar os efeitos combinados dos

distúrbios estudados.

O parâmetro de qualidade de tensão  $F_{Qu}$  mostra que a elevação de temperatura devido 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.

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 à limitação dos testes realizados e necessidade de se investigar outras questões relacionadas aos aumentos de perdas devido aos 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 6 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 considerar que o desequilíbrio de frequência fundamental é muito importante, considera um aumento da influência das harmônicas, já que nos testes com harmônicas múltiplas indicaram maior influência na elevação de temperatura, que a 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 (1), devem ser obtidos a partir de estudos futuros com a realização de mais testes e medições de harmônicas em campo. A partir da Figura 6 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.

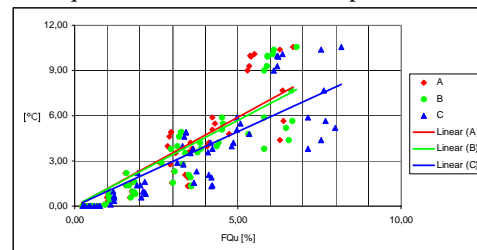


Fig. 6 – Elevação de temperatura em função dos parâmetros  $F_{Qu}$  para diferentes coeficientes de ponderação.

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.

### B. Comparações de Resultados de Parâmetros de Qualidade de Tensão

A Tabela 1 apresenta valores dos parâmetros de qualidade de tensão calculados pelos dois métodos citados no item V. Esses cálculos foram feitos para todos os 60 testes realizados, porém foram mostrados aqui apenas os resultados dos parâmetros calculados para um dos ensaios 1 referidos no item VI. O fator de qualidade de tensão FQu foi calculado com os valores dos coeficientes de ponderação usados para obter a curva C da Figura 6. Estes resultados são apresentados para demonstrar que os parâmetros obtidos pelos dois métodos sugeridos permitem obter resultados iguais para os parâmetros de qualidade estudados. Além dos valores dos fatores de qualidade de tensão calculados em cada teste, também são mostrados na Tabela 1 os valores das elevações de temperatura dos enrolamentos do motor de indução obtidas em cada teste aplicado no ensaio 1.

Tabela 1– Parâmetros de Qualidade de Tensão

Ensaio	Desequilíbrio de Frequência Fundamental (FDu) [%]			Distorção Harmônica		Parâmetro de Qualidade de Tensão		Elevação De Temp	
	Método			(FHu) [%]		(FQu) [%]			
	Clássico	Eixos (DQ) NEI	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

## VII. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento deste trabalho contribuiu propondo 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. Também contribuiu, mostrando que o indicador proposto, além de

representativo, pode reduzir a quantidade de indicadores de qualidade de fornecimento de energia elétrica a serem monitorados pelos órgãos reguladores. A indicação de que as impedâncias de seqüência positiva e negativa dos motores de indução para harmônicas superiores à frequência fundamental são praticamente iguais é também uma contribuição apresentada. Outra, contribuição, é a recomendação de que as normas não devem restringir a aplicação de qualquer que seja o algoritmo de cálculo usado para obter um parâmetro de qualidade de energia, desde que, esse algoritmo, obtenha valores equivalentes aos obtidos pelos algoritmos recomendados. Além dessas contribuições, este trabalho apresentou uma série de resultados práticos sobre como distúrbios na tensão afetam os motores trifásicos de indução. Esses resultados apresentados aqui e a metodologia utilizada podem servir de referência para outros estudos posteriores.

Finalmente, pode-se avaliar que o desenvolvimento deste trabalho possibilitou aumentar o conhecimento de como os indicadores de qualidade de energia elétrica, no caso, tensão, 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.

## VIII. BIBLIOGRAFIA:

- [1] Abreu, J. Policarpo G. de; Eigeles Emanuel, A.; Induction Motors Loss of Life to Voltage Imbalance and Harmonics: In: Proceedings 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Oct. 2000. Anais eletrônicos. v1. p.75-80.
- [2] CIGRÉ, A New Simple and Effective Approximate Formulation for the Determination of Three-phase Unbalances by the Voltmeter Method, Belgiques, CIGRÉ, 1986.
- [3] Hydro-Québec, CEA (Canadian Electricity Association) 220 D 711 - Power Quality Measurement Protocol CEA Guide to Performing Power Quality Surveys, Prepared by Hydro-Québec, May 1996.
- [4] 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.
- [5] Mafarão, F. P., Contribuição para a Teoria de Potências Instantâneas e Aplicações em Qualidade de Energia, Dissertação, Unicamp, São Paulo, 2000.
- [6] Normas NEMA – MG1- Section IV - Performance Standars Applying to All Machines, Part 30, 1993.
- [7] Normas NEMA – MG1- Section II - Performance Standars Applying to All Machines, Part 14, 1993.
- [8] Resolução da ANEEL nº 505 de 26 de novembro de 2001.
- [9] Wakileh, G. J., Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design, Springer, New York; 2001.

**Silvio Xavier Duarte** nasceu em Ipiranga, São Paulo, Brasil, em 8 de Março de 1966. É doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Iniciou sua carreira de docente em 1988 no ensino técnico de nível médio. Atualmente é participante do grupo de pesquisadores do ENERQ/USP. Também é Professor Assistente I na Escola de Engenharia da Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros – FEI-SBC, e Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Ciências da FITO, em Osasco.

**Nelson Kagan** nasceu em São Paulo, Brasil, no dia 8 de outubro de 1960. Gradou-se na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1982. Obteve o título de mestre em 1988, pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e o título de Ph. D. em 1993 pela Universidade de Londres. Leciona na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde 1983, na qual é Professor Associado. Suas principais áreas de interesse são Planejamento de Sistemas de Potência e Qualidade de Energia