



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 04 094

Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

ANÁLISE ESTATÍSTICA/PROBABILÍSTICA DE CABOS ISOLADOS NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Cláudio Roberto Pacheco*
Fundação Educacional de Barretos
Faculdade de Eng. Elétrica

José Carlos de Oliveira
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Eng. Elétrica

Olívio C. N. Souto
Fundação Educacional de Barretos
Faculdade de Eng. Elétrica

RESUMO

Este artigo objetiva avaliar o comportamento térmico e a expectativa de vida útil de cabos elétricos isolados sob condições não ideais de suprimento. A metodologia utilizada baseia-se em estudos estatísticos/probabilísticos para representar os fenômenos responsáveis pela degradação da energia como variações no valor eficaz das tensões e das distorções harmônicas. Os modelos obtidos são então inseridos em um programa que utiliza técnica de análise no domínio da frequência onde os diversos efeitos são implementados de acordo com o princípio da superposição. Estudos computacionais são então conduzidos para avaliar a operação de cabos sob o ponto de vista térmico e sobre a redução da vida útil.

PALAVRAS-CHAVE

Cabos Isolados, Análise Estatística, Modelagem Térmica, Distorções Harmônicas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Investigar o comportamento/desempenho dos mais variados equipamentos presentes em uma rede elétrica quando esta encontra-se com qualidade comprometida, tem sido objeto, ao longo dos anos, de várias pesquisas e desenvolvimentos pela comunidade científica nacional e internacional. Não obstante os conhecimentos dispersos sobre os diferentes temas que formam o contexto global da área, os desafios ainda são imensos, particularmente no

que se refere à sensibilidade dos diversos equipamentos que perfazem um sistema elétrico [1] e [2].

É conhecido que, num sistema elétrico industrial típico, um grande número de componentes pode ser encontrado. Dentre eles, um dos mais importantes refere-se aos cabos isolados. Estes, entretanto, não têm recebido atenção especial em relação aos efeitos provocados por uma rede com qualidade comprometida. De fato, poucas referências podem ser encontradas nesta área específica. As referências [3]–[5] propõem modelos para se determinar as capacidades de condução de corrente dos cabos em função da temperatura final de operação, entretanto, condições não-ideais não são mencionadas. Em [6], um modelo térmico usando elementos finitos é desenvolvido o qual inclui as distorções harmônicas. O artigo apresenta a temperatura final do cabo, mas não apresenta nenhuma correlação com a expectativa de vida útil. A referência [7] sugere uma alternativa para se estimar a expectativa de vida útil, sendo que a temperatura é obtida através das modelagens propostas pela norma IEC-287, a qual, não aborda a presença das distorções harmônicas e dos desequilíbrios. Na referência [8] tem-se uma extensão dos procedimentos de cálculo considerando-se os efeitos de uma operação não-ideal. Esta publicação considera a representação apenas no domínio do tempo e admite que a operação dos cabos isolados ocorre de forma invariável no tempo. Finalmente, a referência [9], utiliza-se do mesmo modelo térmico proposto por [8] e faz uma avaliação do

desempenho elétrico/térmico/vida útil do cabo empregando-se de análises no domínio do tempo e domínio da frequência. Nesta referência tanto a carga como os itens de qualidade são considerados como sendo invariáveis ao longo do tempo, ou seja, as análises realizadas pressupõem-se que as tensões de alimentação, bem como a carga alimentada, são constantes durante toda a vida útil do cabo.

Dentro deste contexto, para muitas aplicações, torna-se imprescindível reconhecer a natureza aleatória dos fenômenos encontrados nas redes elétricas, particularmente, os problemas que caracterizam uma rede elétrica com qualidade comprometida. Este é o caso das distorções harmônicas, dos níveis de desequilíbrios e das variações do valor eficaz das tensões de suprimento, os quais merecem um tratamento estatístico para uma melhor caracterização dos fenômenos e efeitos. Do exposto segue que, em qualquer procedimento de cálculo, deve-se considerar a dinâmica operacional do sistema, sem a qual os resultados relativos a, por exemplo, temperatura e vida útil, possam não expressar a realidade com que os componentes elétricos operem.

Neste sentido, este artigo tem por objetivo investigar os efeitos advindos de uma rede elétrica com qualidade comprometida, no desempenho elétrico, térmico e na expectativa de vida útil de cabos elétricos isolados. As situações operacionais designadas por não-ideais estão caracterizadas pela presença de harmônicas, desequilíbrios e variações RMS das tensões de suprimento. Para a modelagem elétrica é empregada a metodologia de análise no domínio da frequência em conjunto com a técnica da superposição de efeitos e da análise estatística/probabilística designada por passo-a-passo no tempo. Desta forma, serão utilizadas informações extraídas de um banco de dados representativo de um barramento industrial real, onde se configuram, via medições, as variações de tensão no que tange ao seu valor eficaz, distorções harmônicas, etc., ao longo do tempo. O modelo elétrico/térmico obtido é então implementado no simulador designado por MATLAB e várias simulações são realizadas.

2.0 - O MODELO TÉRMICO

Para investigar o acréscimo de temperatura de um cabo sob condições não-ideais de funcionamento, é empregado um modelo térmico trifásico. Este consiste em representar o cabo em termos de parâmetros concentrados de acordo com as diferentes camadas dos cabos. Esta

técnica utiliza procedimentos bem conhecidos baseados no emprego de conceitos como: condutância térmica, capacitância térmica e fontes de calor [6]. A figura 1 extraída da referência [9] ilustra o circuito térmico equivalente.

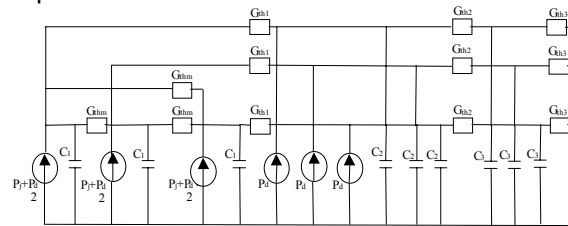


Figura 1 – Modelo Térmico do Cabo

Na figura acima:

- P _ Identificado por um subscrito correspondente, representa as fontes de calor;
- G_{th} _ Com um correspondente subscrito significa a condutância térmica entre duas camadas distintas do cabo;
- C _ Seguido por um subscrito representa a capacitância térmica entre duas camadas distintas.

De acordo com o circuito equivalente mostrado na figura 1, o modelo permite a obtenção da elevação de temperatura para as situações de regime transitório e permanente. Seguindo os procedimentos tradicionais, as condutâncias e capacitâncias térmicas são calculadas considerando condições puramente senoidais de tensão e corrente, dados físicos dos cabos e fontes de calor associadas às perdas no cobre, dielétricas e na blindagem.

Em relação às fontes de calor do cabo, são conhecidas que elas são provenientes de três origens distintas, quais sejam: do cobre (P_j), do dielétrico (P_d) e da blindagem (P_s). Uma vez que as perdas no cobre e blindagem são concentradas, estas são consideradas como sendo produzidas em um único ponto. Por outro lado, as perdas dielétricas são eminentemente distribuídas em diferentes localizações ao longo da isolamento. Por este motivo, estas últimas são divididas em duas fontes, como indicado na figura 1. Informações pertinentes à obtenção dos parâmetros térmicos como condutâncias e capacitâncias térmicas podem ser obtidas na referência [9].

2.1 – Distribuição das Perdas no Cabo

Usando a representação no domínio da frequência, as perdas no cobre podem ser calculadas usando a equação (1):

$$P_j = R_1 \cdot I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \cdot I_n^2 \quad (1)$$

Onde:

- R_1 – resistência à frequência fundamental;
 I_1 – corrente fundamental;
 R_n – resistência harmônica de ordem n;
 I_n – corrente harmônica de ordem n.

Deve ser enfatizado que há uma relação não-linear entre a impedância do cabo e a frequência (efeito skin). Desta forma, a metodologia empregada para considerar tal fenômeno, utilizou-se dos conceitos propostos pela referência [10] aliados à técnica da superposição para considerar o fenômeno supracitado. Outro efeito importante considerado refere-se à dependência das perdas no cobre com a temperatura do condutor. Este fenômeno foi também incorporado, corrigindo a resistência com a temperatura calculada no cabo.

Assumindo que o cabo possa ser suprido por tensões compostas pela fundamental e harmônicas, as perdas dielétricas no domínio da frequência podem ser expressas por:

$$P_d = \frac{V_1^2 \cdot tg \delta}{X_{C_1}} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_n^2 \cdot tg \delta}{X_{C_n}} \quad (2)$$

Sendo:

- V_1 – tensão fase-neutro fundamental;
 X_{C_1} – reatância capacitiva fundamental do cabo;
 V_n – tensão fase-neutro harmônica de ordem n;
 X_{C_n} – reatância capacitiva harmônica de ordem n do cabo.

De modo similar, as perdas na blindagem no domínio da frequência são dadas por:

$$P_s = \lambda \cdot (R_1 \cdot I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \cdot I_n^2) \quad (3)$$

O fator λ depende da geometria do cabo e do tipo de aterramento da blindagem. A referência [11] fornece o conjunto de equações necessárias para determinar este parâmetro.

2.2 – Equação Térmica Geral

O modelo térmico pode ser finalmente descrito por um conjunto de nove equações. Estas podem ser fisicamente constatadas através da figura (1), ou seja, uma expressão para cada nó. A formulação matemática geral para representar a

relação entre as gerações térmicas e as temperaturas para os diversos pontos do cabo é dada abaixo.

$$\frac{d[\theta]}{dt} = [C_{th}]^{-1} \cdot ([P] - [\theta] \cdot [G_{th}]) \quad (4)$$

Onde:

- $[\theta]$ – vetor elevação de temperatura;
 $[C]$ – matriz de capacitâncias térmicas;
 $[P]$ – vetor de perdas no cabo;
 $[G_{th}]$ – condutância térmica.

A matriz de capacitância térmica do cabo é do tipo diagonal, conforme a seguir:

$$[C_{th}] = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

A matriz de condutância térmica é dada por:

$$[G_{th}] = \begin{bmatrix} G_1 & G_4 & G_4 & G_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_4 & G_1 & G_4 & 0 & G_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_4 & G_4 & G_1 & 0 & 0 & G_5 & 0 & 0 & 0 \\ G_5 & 0 & 0 & G_2 & 0 & 0 & G_6 & 0 & 0 \\ 0 & G_5 & 0 & 0 & G_2 & 0 & 0 & G_6 & 0 \\ 0 & 0 & G_5 & 0 & 0 & G_2 & 0 & 0 & G_6 \\ 0 & 0 & 0 & G_6 & 0 & 0 & G_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_6 & 0 & 0 & G_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_6 & 0 & 0 & G_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Sendo:

$$G_1 = 2 \cdot G_{thm} + G_{th1} \quad (7)$$

$$G_2 = G_{th1} + G_{th2} \quad (8)$$

$$G_3 = G_{th2} + G_{th3} \quad (9)$$

$$G_4 = -G_{thm} \quad (10)$$

$$G_5 = -G_{th1} \quad (11)$$

$$G_6 = -G_{th2} \quad (12)$$

3.0 – CÁLCULO DA EXPECTATIVA DE VIDA ÚTIL

De acordo com a referência [12], a degradação térmica de materiais orgânicos e inorgânicos de um equipamento elétrico, é causada

principalmente pela elevação de temperatura acima do valor nominal. Esta perda de vida útil pode ser estimada pela equação de Taxa de Reação conhecida como a expressão de Arrhenius:

$$\frac{d\rho}{dt} = A.e^{-\frac{E}{k\theta}} \quad (13)$$

Onde:

- $D\rho/d$ - variação da expectativa de vida;
- t
- A - constante do material;
- K - constante de Boltzman;
- θ - temperatura absoluta;
- E - energia de ativação da reação de envelhecimento.

Para estabelecer uma comparação entre a expectativa de vida útil do cabo sob condições ideais e não-ideais, aplicando equação (13), é possível verificar a relação entre a perda de vida do cabo e a correspondente elevação de temperatura [13]. A equação (14) fornece uma maneira de calcular a expectativa de vida útil do cabo para outra temperatura de operação além da nominal do mesmo.

$$\rho = \rho_{nom} . e^{-\left(\frac{E}{k}\right) \frac{\Delta\theta}{\theta_{nom} . (\theta_{nom} + \Delta\theta)}} \quad (14)$$

onde:

- ρ - vida útil do cabo para $\theta = \theta_{nom} + \Delta\theta$;
- ρ_{nom} - vida útil nominal do cabo para $\theta = \theta_{nom}$;
- $\Delta\theta$ - acréscimo de temperatura em relação a θ_{nom} ;
- θ_{nom} - temperatura nominal do cabo.

4.0 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

A fim de investigar o comportamento elétrico/térmico dos cabos sob condições não ideais de operação, considerando a aleatoriedade dos fenômenos elétricos, três situações distintas de perda de qualidade foram investigadas. A primeira vinculada com variações dos valores RMS das tensões de suprimento (embora balanceadas), outra associada com a presença de distorções harmônicas de corrente e tensão e, finalmente, uma terceira, relacionada com ambos os efeitos tratados de forma conjunta. Para todas elas utilizou-se de um cabo comercial de 8,7/15

kV com seção de 95 mm² cujos principais parâmetros podem ser obtidos em [7]. Estas investigações bem como os resultados obtidos são discutidos na seqüência, todas empregando o já citado método passo-a-passo no tempo.

4.1 – Casos Estudados

a) Variação RMS da Tensão Fundamental

De acordo com este método, a análise é feita procedendo-se a discretização dos sinais elétricos aleatórios, a cada intervalo de tempo definido, durante os quais os mesmos são mantidos invariáveis. Para tanto, divide-se o tempo total de observação ou de medição em pequenos intervalos igualmente espaçados, e para cada ocorrência, admite-se que as tensões e corrente são constantes. Para cada um destes intervalos, os desempenhos elétricos e térmicos do cabo são avaliados, obtendo-se, ao final do período completo de estudo, o comportamento da elevação da temperatura do cabo ao longo da extensão de tempo considerada.

Utilizando a citada estratégia, a figura 2, mostra o comportamento da elevação de temperatura na isolação do cabo, quando o mesmo encontra-se alimentado por tensões trifásicas variantes no tempo.

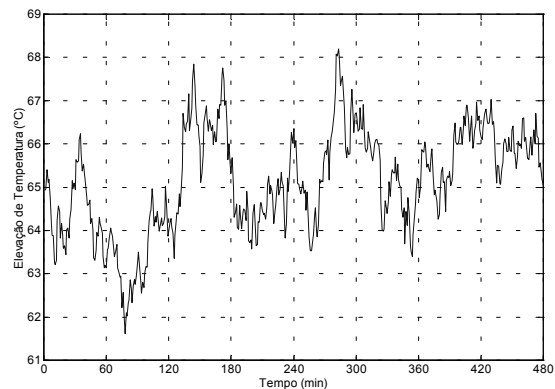


Figura 2 – Elevação da temperatura na isolação

Conforme se percebe na figura anterior, as simulações computacionais foram realizadas considerando-se que o cabo em $t=0$ encontrava-se em seu regime térmico permanente. A partir daí, a tensão de suprimento passou a se apresentar de acordo como indicado na figura 3. Esta revela que a tensão oscilou entre 11.800 V e 16.050 V. Tais oscilações conduziram a variações na elevação da temperatura entre 61,6°C e 68,2°C. Cabe ressaltar que a carga suprida pelo cabo é do tipo impedância constante e, para o valor de tensão nominal, esta resulta em uma corrente fundamental igual a nominal de carregamento do cabo empregado. Para esta

situação a vida útil estimada para o cabo é de 0,89 pu.

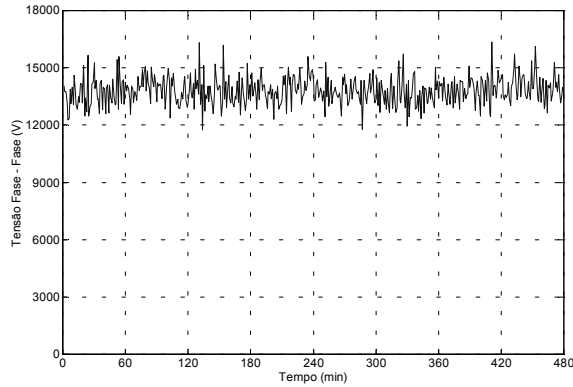


Figura 3 – Variação RMS da tensão

b) Variações das Distorções Harmônicas

Este item objetiva averiguar a influência das variações das tensões harmônicas no desempenho térmico dos cabos. Para tanto, considerou-se o cabo sendo alimentado por uma tensão fundamental constante de 13,8 kV, a qual corresponde à sua nominal, e superpôs-se a esta, uma distorção de tensão de quinto harmônico variante ao longo do tempo. A figura 4 mostra o comportamento, ao longo do tempo, da distorção harmônica enfocada.

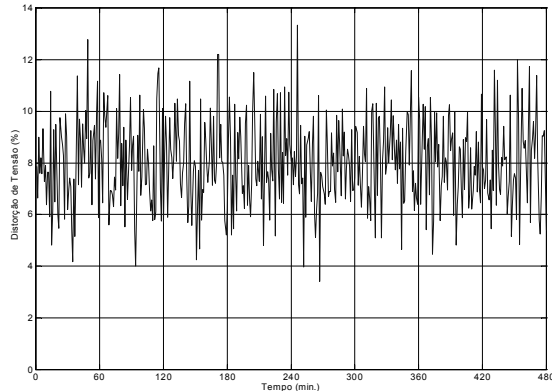


Figura 4 – Tensão de quinto harmônico variante ao longo do tempo

A tensão de quinto harmônico variou de 3% a 13,5% da tensão fundamental nominal, com valor médio em torno de 8%. Tais níveis foram obtidos de uma medição real conduzida num alimentador de laminador siderúrgico. As elevações de temperatura na isolação do cabo estão representadas na figura 5. Mais uma vez, as condições de carregamento impostas ao cabo estão atreladas às mesmas características anteriormente mencionadas.

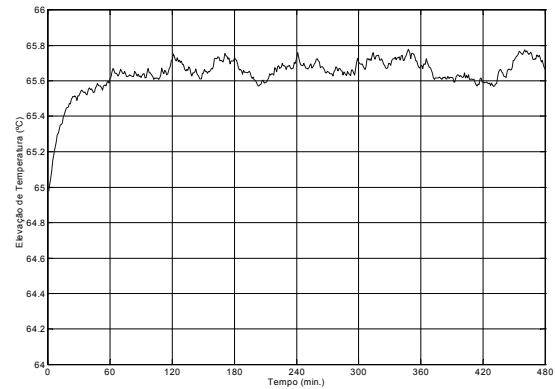


Figura 5 – Elevação da temperatura na isolação

Novamente, percebe-se na figura anterior que, as simulações computacionais foram realizadas considerando-se que o cabo em $t=0$ encontrava-se em seu regime térmico permanente. A partir daí, com os níveis e as oscilações da tensão de quinto harmônico, a elevação da temperatura na isolação do cabo estabeleceu-se entre 65 °C e 65,8 °C. Como anteriormente mencionado, as distorções harmônicas empregadas para os estudos consistiram em tensões de ordem 5 superpostas à fundamental. Além disto, a carga alimentada é do tipo impedância constante. Caso o cabo estivesse suprindo, por exemplo, um retificador, a situação seria, indiscutivelmente, substancialmente agravada. Para esta situação a vida útil estimada do cabo é de 0,96 pu.

c) Variações Conjuntas das Tensões: Fundamental e Harmônicas

Utilizando-se do mesmo perfil para as variações RMS das tensões fundamentais e das suas correspondentes tensões harmônicas, conforme mostram as figuras 3 e 4, o presente caso admite que as mesmas se encontram simultaneamente aplicadas ao cabo. Aplicando, mais uma vez, a metodologia passo-a-passo para os sinais apresentados, obtêm-se as variações de temperatura na isolação do cabo, conforme ilustra a figura 6.

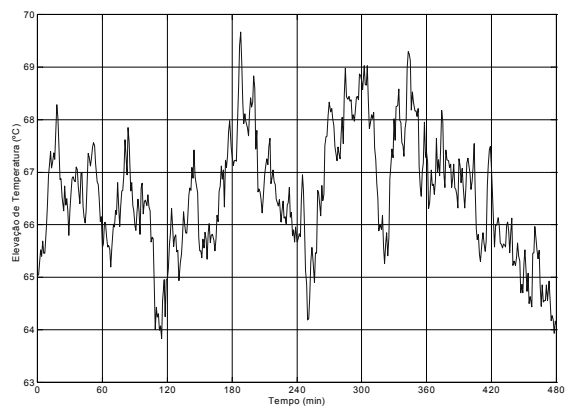


Figura 6 – Elevações de temperatura na isolação

Nesta, constata-se que as mesmas oscilaram entre 63,8 e 69,6°C. Os resultados são auto-esclarecedores sobre os impactos térmicos causados pela superposição das duas condições. Como se vê, as temperaturas sofreram aumentos da ordem de 1,4 °C. Este valor, embora pequeno, pode trazer significativas conseqüências na vida útil do componente considerado. Para este caso estudado, a vida útil estimada do cabo é de 0,83 pu.

5.0 CONCLUSÕES

Este artigo enfocou o comportamento térmico de cabos isolados sob condições não-ideais de suprimento. Uma metodologia para incluir a relação entre situações operacionais não-ideais variantes ao longo do tempo no cabo e suas implicações sobre a expectativa térmica/vida útil foi implementada. O procedimento utiliza conceitos básicos elétricos e térmicos aplicados para inter-relacionar condições não-ideais do supridor e a temperatura/expectativa de vida útil do cabo aliados à técnica de análise estatística/probabilística designada por passo-a-passo no tempo. As equações derivadas foram então implementadas no simulador denominado MATLAB, o qual utiliza técnica de análise no domínio da frequência. Usando esta ferramenta computacional, situações não-ideais foram estudadas para um cabo comercial de 95 mm² com tensão nominal de 8,7/15 kV. As condições operativas empregadas nos estudos a exemplo de variações RMS das tensões e distorções harmônicas foram extraídas de um banco de dados via medições reais de uma instalação elétrica pertinente a uma siderúrgica. Os resultados demonstraram que as variações de tensão RMS produzem efeitos significativos no desempenho térmico dos cabos e que a elevação de temperatura na isolação do mesmo sofre alterações em decorrência das variações ao longo do tempo do supridor. Foi observada para o caso estudado oscilação de temperatura entre 61,6 °C e 68,2 °C o que resultou em 0,89 pu de vida útil para o cabo. Caso não fosse computado tais variações a vida útil do cabo seria de 1 pu como descrito em [7]. No tocante as situações envolvendo apenas a distorção de 5º harmônico superposta a tensão fundamental nominal do cabo os patamares de elevações de temperatura encontrados foram de 65 °C e 65,8 °C. Tais incrementos foram pequenos uma vez que a carga utilizada os estudos foi do tipo impedância constante e linear. Caso outros tipos de cargas fossem empregados como retificadores, por exemplo, os resultados certamente seriam mais apreciáveis. Finalmente, para a situação onde são consideradas variações RMS das tensões de

alimentação em conjunto com as distorções harmônicas os resultados foram enfáticos e esclarecedores em demonstrar os impactos térmicos causados pela superposição das duas condições. Embora outras situações operativas, a exemplo de desequilíbrios, pudessem ser estudadas/pesquisadas e facilmente implementadas no software de análise, estas não foram aqui contempladas. Todavia, convém destacar que, os resultados pertinentes a esta situação operativa, conduzem a resultados semelhantes aos apresentados neste artigo.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dugan, R. et al, Electrical Power System Quality, McGraw-Hill, USA, 1996.
- [2] Arrilaga, J. et al, Power Systems Harmonics, John Wiley & Sons, USA, 1995.
- [3] J.H. Neher, M.H. McGrath "The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems", AIEE Transactions, October 1957, pp. 752-772.
- [4] J. Stolpe, "Ampacities for cables in randomly filled trays", IEEE Transactions on Power apparatus and systems, Vol. PAS-90, pp. 962-973, 1971
- [5] K. Petty, "Ampacity of wrapped cables", IEEE Transactions on power delivery, Vol.3, No.1, January 1988.
- [6] A. Hiranandani "Calculation of ampacities and sizing of line and neutral conductors in the presence of harmonics", Annual Meeting of Industry Society, Orlando, Florida, USA, 1995.
- [7] G. Carpinelli, P. Caramia, P. Verde, F. Vitali "Probabilistic evaluation of the cable thermal useful life in MV/LV energy systems", PMAPS 97 Vancouver, B.C., pp. 379-384.
- [8] Pacheco C. R. Oliveira J. C. Vilaça A. L. A. "Power Quality Impact on Thermal Behaviour and Life Expectancy of Insulated Cables" ICHQP 2000, Orlando, EUA.
- [9] Pacheco C. R.; Oliveira J. C. "Impactos Térmicos da Qualidade da Energia em Cabos Isolados: Análise no Domínio do Tempo versus Domínio da Frequência" IV SBQEE 2001, Porto Alegre, Brasil.
- [10] Stevenson, W. D. "Elements of Power System Analysis", second edition, McGraw-Hill Company, Inc. 1962.
- [11] George J. Anders, Rating of Electric Power Cables, McGraw-Hill, 1995.
- [12] R. R. Dixon. "Thermal aging prediction from an Arrhenius plot with only data point", IEEE Transaction electrical insulation, Vol. EI-15, No. 4, 1980, pp. 331-334
- [13] E. F. Fuchs, D. J. Roesler, K. P. Kovacs, "Aging of electrical appliances due to harmonics of the power systems voltage", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.3, July 1986.