



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

I. OLINDA - PERNAMBUCO - BRASIL

### Impacto do suprimento apresentando distorção no diagnóstico da condição operativa de cabos isolados degradados por arborescência

<b>Fernando Nogueira de Lima</b>	<b>José Carlos de Oliveira</b>	<b>Darizon Alves de Andrade</b>
<b>Universidade Federal de Mato Grosso</b>	<b>Universidade Federal de Uberlândia</b>	<b>Universidade Federal de Uberlândia</b>
fernandn@ufmt.br	jcoliveira@ufu.br	darizon@ufu.br

<b>Rildo Marley T. da Silva</b>	<b>Antonio de Pádua Finazzi</b>	<b>Bismarck Castillo Carvalho</b>
<b>Companhia Energética de Brasília</b>	<b>Universidade Federal de Mato Grosso</b>	<b>Universidade Federal de Mato Grosso</b>
rildo@ceb.com.br	apfinazzi@ufmt.br	bcc@ufmt.br

#### Palavras-chave

Arborescências  
Cabos elétricos  
Corrente de fuga  
Degradação  
Diagnóstico.

#### Resumo

As questões relacionadas com a qualidade de energia elétrica representam desafios crescentes para o setor elétrico. No que tange ao fornecimento de energia com qualidade e confiabilidade, um dos problemas que é motivo de preocupação no setor produtivo consiste na descontinuidade não programada do suprimento devido à ocorrência de falhas em componentes diversos da instalação, particularmente aqueles relativos a defeitos na isolação nos cabos de potência, que são responsáveis por parcela significativa das paradas intempestivas de consumidores. Dentre as principais causas da degradação da isolação de cabos de potência destaca-se o fenômeno conhecido por arborescência (*water tress*) que provoca o envelhecimento precoce dos cabos elétricos, podendo ocasionar o rompimento do material dielétrico. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma estratégia metodológica voltada para o diagnóstico do estado operacional da isolação de cabos elétricos a partir de um modelo matemático equivalente de cabo, que inclui em sua formulação a característica não linear das arborescências. A metodologia culmina com a determinação de um conjunto de indicadores de estado que, correlacionados, permite emitir um diagnóstico sobre a condição física em que se encontra a isolação, considerando a influência, na corrente de fuga, de tensões de suprimento distorcidas, comumente encontradas em sistemas elétricos reais.

## 1. Introdução

Diversos estudos e métodos diagnósticos vêm sendo desenvolvidos para a detecção de arborescências em cabos isolados com vistas a extrair informações sobre o nível de degradação da camada isolante. Objetivam, portanto, a disponibilização de ferramentas que auxiliem na manutenção preventiva e no acompanhamento da sua vida útil, possibilitando prever as condições operacionais da isolação dos cabos elétricos. Salienta-se que os métodos hoje existentes têm, evidentemente, abordagens diferentes. Como principal diferença entre as diversas técnicas existentes pode-se citar o fato de que algumas delas requerem que o cabo esteja sem carregamento e desenergizado, enquanto que outras permitem o diagnóstico on-line de cabos, portanto, sem a necessidade de desconexão dos circuitos. Uma breve descrição dos métodos mencionados, onde são destacadas as vantagens e desvantagens de cada um dos principais trabalhos pode ser encontrado na referência <sup>1</sup>,

Merecem destaques as referências <sup>2-6</sup>, que mostram que há uma correlação entre a manifestação das arborescências e a existência de correntes de fuga com expressivo conteúdo harmônico, mesmo sob a ação de uma tensão de suprimento senoidal. A partir dessa constatação, um dos mecanismos utilizados para avaliação do estado operacional dos cabos consiste em analisar o módulo e a fase da terceira harmônica da corrente de fuga, o que permite diagnosticar a severidade da degradação para diferentes comprimentos de arborescências <sup>3</sup>. Outro indicador utilizado para efetuar o diagnóstico é a Distorção Harmônica Total de Corrente da corrente de fuga -  $DHT_c$ , o qual se mostra mais sensível ao comprimento médio das arborescências do que a  $tg\delta$ , sendo, pois, mais indicado para identificar pequenas arborescências perante situações de elevados estresses elétricos <sup>2,4</sup>. Este último indicador, o ângulo de perdas dielétricas ( $tg\delta$ ) é mais apropriado para tratar de degradações uniformes <sup>3</sup>.

Neste contexto, o presente artigo volta-se para a modelagem do fenômeno da arborescência, reconhecendo suas características não lineares e focando como meta a extração de informações relevantes ao conhecimento do estado operacional de um determinado cabo isolado, encontrando-se o mesmo em operação. Para tanto são consideradas situações em que a tensão de alimentação é puramente senoidal, assim como diferentes situações em que a tensão de alimentação apresenta distorções da forma de onda, dentro dos limites recomendados pelo ONS – Operador Nacional do Sistema.

## 2. Modelo para representação das arborescências

Estudos experimentais e teóricos têm demonstrado que mesmo sob tensão de suprimento puramente senoidal, a corrente de fuga que flui entre a superfície do condutor e a blindagem da isolação de um cabo com presença de arborescências apresenta um comportamento não linear, com conteúdo harmônico considerável. A predominância da componente de terceira ordem neste tipo de estudo é nitidamente significativa. De maneira a ilustrar a não linearidade que se verifica entre a corrente de fuga e a tensão aplicada, a Figura 1 exibe a característica V-I de uma amostra de cabo isolado com XLPE, fortemente degradada por arborescências. A obtenção da curva se deu utilizando-se uma tensão de suprimento puramente senoidal <sup>3</sup>.

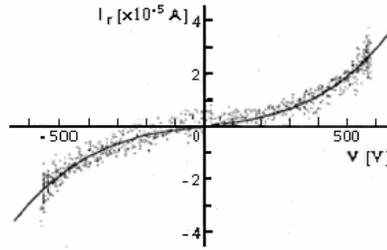


Fig. 1. Curva característica V-I de arborescências.

Assumindo como hipótese que o comportamento não linear das arborescências é similar à característica V-I de um diodo semiconductor, polarizado diretamente, restrita, no entanto, à região de operação que ainda não ocorreu condução plena, é possível representar a característica não linear da Figura 1 por meio da equação (1) <sup>7</sup>.

$$i_{arb}(t) = \frac{1}{R^2} [k_{arb}^2 v^3(t) - v(t)] + \frac{v(t)}{R_{ad}} \quad (1)$$

Onde:

- $i_{arb}(t)$  = Corrente na amostra degradada
- $v(t)$  = Tensão de alimentação
- $R$  = Resistência da isolação
- $R_{ad}$  = Resistência de adequação
- $k_{arb}$  = Constante

O primeiro termo do segundo membro da expressão anterior corresponde à característica não linear da arborescência. O segundo termo, por sua vez, está relacionado com a adequação da não linearidade para cada nível de degradação considerado.

A combinação de conceitos clássicos associados com a modelagem de cabos e a inserção do fenômeno da degradação originam o circuito equivalente da Figura 2.

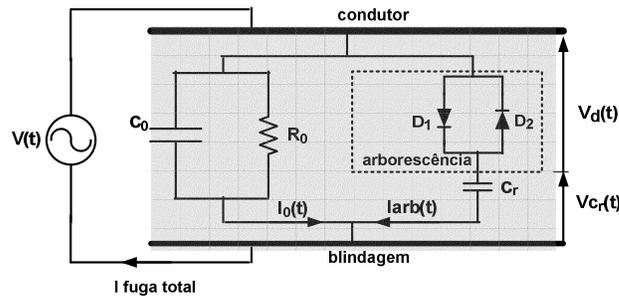


Fig. 2. Circuito equivalente de um cabo apresentando arborescências.

Os parâmetros  $C_0$  e  $R_0$  mostrados na figura representam, respectivamente, a capacitância e a resistência da isolação do cabo isento de qualquer deterioração. Os dois diodos em anti-paralelo, conectados em série com o capacitor  $C_r$ , estão relacionados com o fenômeno da degradação do isolamento do cabo. A inserção desse último capacitor, tem por propósito representar a parte remanescente da camada isolante, ainda não atingida pela degradação. A Figura 2 destaca ainda a existência de uma corrente total de fuga

advinda da composição de duas outras, uma representando a situação normal de operação,  $i_o(t)$ , e outra, associada com a presença do fenômeno da arborescência,  $i_{arb}(t)$ .

Na figura anterior,  $v_d(t)$  representa a tensão na região degradada do cabo. A corrente  $i_{arb}(t)$  que flui no material isolante do cabo é determinada de acordo com (2), utilizando para tanto o método de EULER.

$$\frac{1}{R^2} [k_{arb}^2 v_d^3(t) - v_d(t)] = C_r \frac{d}{dt} [v(t) - v_d(t)] \quad (2)$$

### 3. Validação do modelo matemático

Para a validação experimental do modelo matemático desenvolvido, lança-se mão das formas de onda da Figura 3. Essas formas de onda foram extraídas da referência <sup>3</sup>, como resultado de experimentações com amostras de cabos apresentando diferentes níveis de degradação. Trata-se de amostras da isolação de cabos a base de XLPE, de 0.5 mm de espessura sob ação de uma tensão de 1 kV, com frequência de 50 Hz. Para provocar o surgimento das arborescências, um lado do material amostrado foi mantido imerso em uma solução de 1 mol/l de NaCl e submetida a uma tensão de 3 kV, por um período de 100, 300 e 500 horas. Observa-se que quanto maior for o tempo de exposição do material ao agente agressivo, maior é o nível de degradação atingida e em consequência, maior a distorção da corrente de fuga.

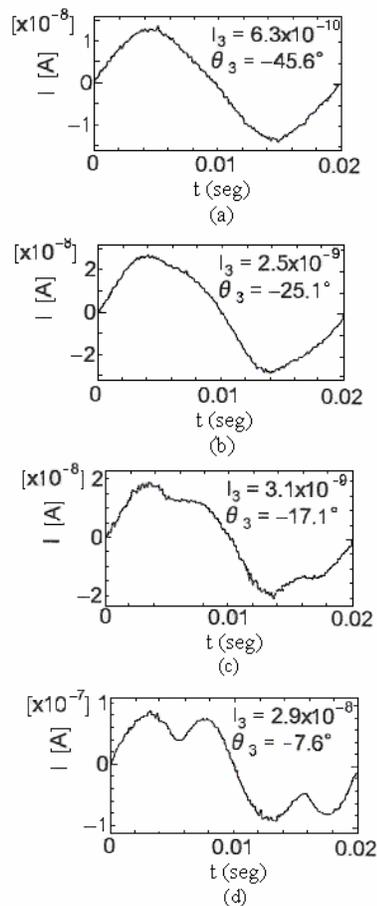


Fig. 3. Corrente de fuga: a) devido a stress causado por 3kV/100h; b) devido à 3kV/300h e c) devido à 3kV/500h.

É importante destacar que as correntes anteriormente ilustradas correspondem à parcela da corrente de fuga que está em fase com a tensão de alimentação. Essas correntes são obtidas subtraindo-se, da corrente de fuga total, a corrente de característica capacitiva que flui na amostra degradada. Para tanto, é utilizado o circuito apresentado na Figura 4, onde a camada isenta de deterioração é representada por um capacitor padrão.

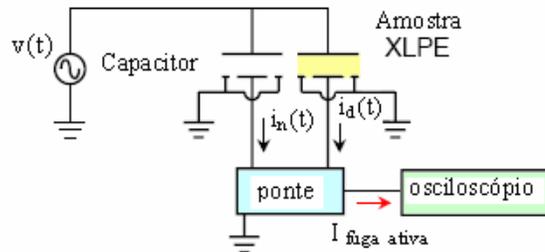


Fig. 4. Circuito para medição da corrente de fuga em fase com a tensão.

Por meio da metodologia apresentada neste trabalho é possível reproduzir, computacionalmente, o experimento representado na Figura 4. Essa possibilidade representa um significativo avanço nesta área de conhecimento, na medida em que permite, por meio de procedimento matemático, a determinação das parcelas ativa e reativa a partir, tão-somente, do conhecimento da forma de onda da corrente de fuga total. Ressalta-se que, por meio desse procedimento, identifica-se, na corrente capacitiva mencionada, a presença de componentes harmônicas sem as quais não se obtém êxito na recuperação da corrente de fuga de referência, como dito, medida em laboratório. Todavia, essa parcela de corrente é merecedora de maiores aprofundamentos que levem a um pleno entendimento do seu real significado físico. Na Figura 4,  $i_n(t)$  representa a corrente puramente capacitiva de uma amostra isenta de deterioração e  $i_a(t)$  a corrente que flui na amostra degradada.

A Figura 5 (a) apresenta resultados ilustrativos do desempenho da metodologia computacional que foi desenvolvida, comparativamente à curva experimental que apresenta maior degradação. É perceptível a grande semelhança entre as curvas da corrente de fuga, experimental e computacional, o que sinaliza no sentido da adequada representação do fenômeno enfocado. Esses resultados agregam as componentes: fundamental e harmônicas de terceira à nona ordem da corrente, que claramente retrata a não linearidade do fenômeno. Atentando para o histograma do espectro de frequências da corrente, mostrado na Figura 5 (b), nota-se que o modelo proposto apresenta melhor desempenho na recuperação da terceira harmônica, enquanto que para as demais ordens harmônicas as discrepâncias são mais evidentes. Todavia, ressalta-se que é exatamente a terceira harmônica que a componente utilizada na literatura para fins de diagnóstico de cabos isolados, notadamente por ser predominante, particularmente nos casos de degradações mais leves ou menos severas.

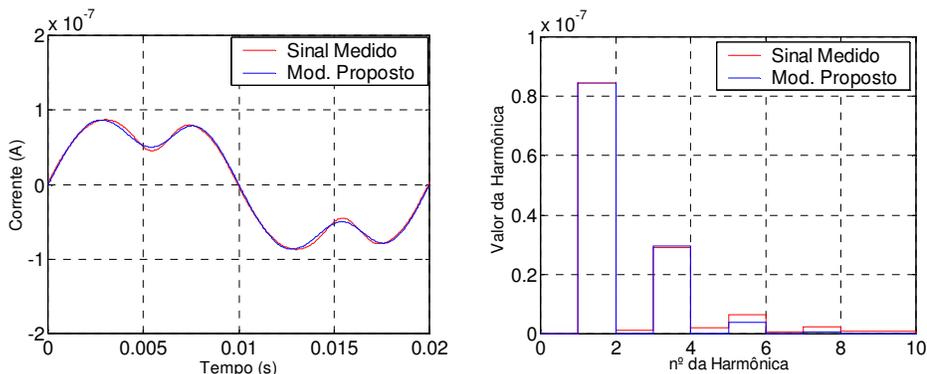


Fig. 5. Correntes de fuga ativa para strees de 3kV/500h: (a) Forma de onda; b) Espectrograma.

A Figura 6 apresenta a corrente de fuga total que flui através da camada isolante e as correspondentes componentes: ativa e reativa.

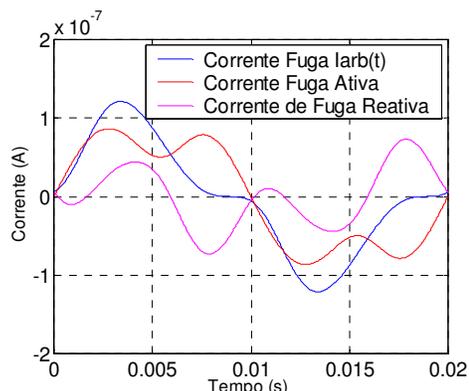


Fig. 6. Correntes de fuga: total, ativa e reativa.

Com base nas componentes ortogonais da corrente de fuga, é possível determinar os indicadores que se fazem necessários ao estabelecimento de uma sistemática para o diagnóstico do nível de degradação de um cabo elétrico. Em síntese, tais indicadores para as tensões e correntes de fuga são: valor eficaz verdadeiro, espectros de frequência, distorção harmônica total, ângulo de perdas dielétricas e a potência dissipada na isolamento.

Vale salientar, que o modelo proposto apresentou um bom desempenho quando da recuperação das formas de onda da corrente de fuga das demais situações apresentadas na Figura 3, relacionadas com diferentes níveis de degradações, conforme pode ser constatado nas Figuras 7 e 8, considerando a componente fundamental e a terceira harmônica. Sendo assim, pode-se sublinhar que a modelagem adotada representa satisfatoriamente o fenômeno de arborescência para quaisquer níveis de degradação que atingir a camada isolante, afirmação que é devidamente corroborada pelos resultados obtidos das simulações.

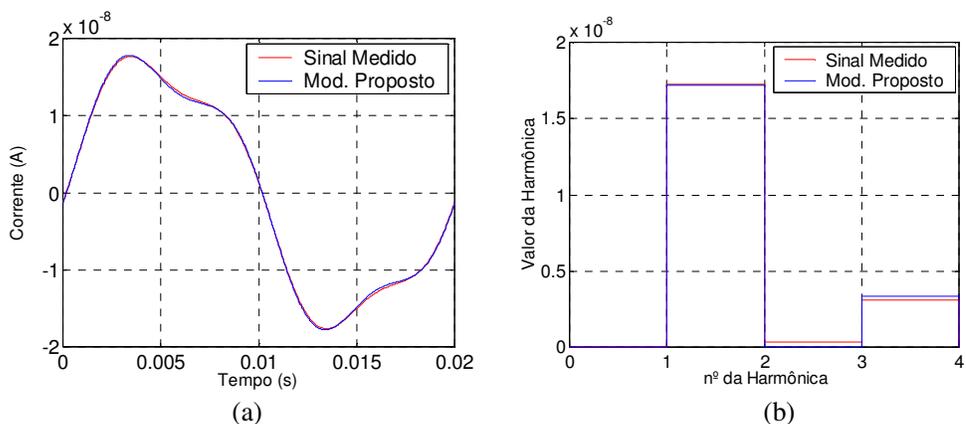


Fig. 6. Correntes de fuga ativa para stress 3kV/300h: (a) Forma de onda; b) Espectrograma

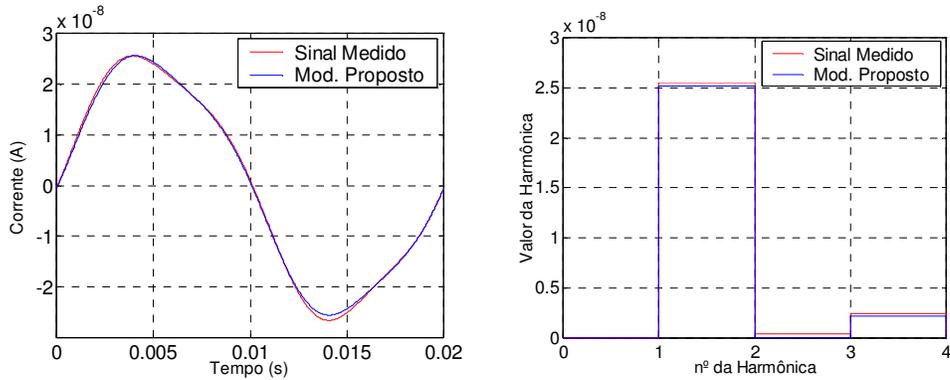


Fig. 6. Correntes de fuga ativa para stress 3kV/100h: (a) Forma de onda; b) Espectrograma

#### 4. Material isolante apresentando degradações não-uniformes

Em situações práticas a degradação da camada isolante de cabos elétricos não ocorre, necessariamente, de maneira uniforme. Sendo assim, se faz necessário proceder à análise do comportamento da corrente de fuga para situações em que as degradações se apresentem diferenciadas quanto à severidade do fenômeno. Nesse sentido, optou-se pelo desenvolvimento de blocos específicos, no ambiente ATP (*Alternative Transients Program*), representativos de diversos graus de degradação da isolamento, correspondentes às degradações uniformes analisadas anteriormente, para proceder às investigações sob essa nova condição operativa do cabo. A idéia adotada consiste em considerar a associação de blocos com degradações uniformes diferentes, proporcionando a reprodução de uma forma de onda que corresponda a uma corrente de fuga devida a degradações não uniformes. Adotando essa linha de pensamento, foi considerada a configuração apresentada na Figura 8, que resultou na criação no ATPDraw de um arquivo objeto correspondente a cada nível de degradação considerado na Figura 3.

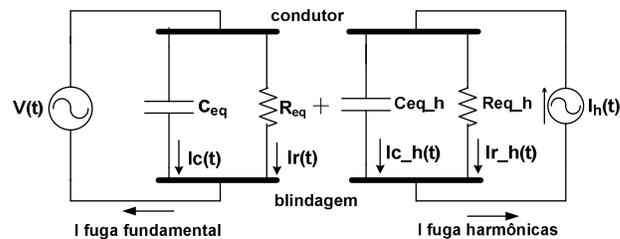


Fig. 8. Circuito equivalente representativo de uma amostra degradada.

Com base no arranjo anterior pode-se realizar a análise individual das parcelas que compõem a corrente de fuga total. Dentro desse princípio, e valendo-se de recursos próprios do simulador ATP, foram construídos blocos representativos de amostras de cabos isolados isentas de arborescências e com diferentes níveis de deterioração: baixa, média e alta. Cada um dos blocos criados possui informações relativas aos parâmetros  $R_{eq}$  e  $C_{eq}$  que o caracterizam, assim como informações pertinentes à harmônica de terceira ordem. Vale ressaltar, que a opção de restringir a contribuição apenas à terceira harmônica, objetiva facilitar as simulações a serem realizadas para validação da metodologia desenvolvida e aplicada com êxito para o caso de degradações uniformes. Todavia, a inclusão de outras ordens harmônicas pode ser facilmente considerada.

## 5. Metodologia para diagnóstico do nível de degradação de cabos isolados

Com o objetivo de contemplar situações encontradas na prática, analisa-se, a seguir, uma situação de degradação não uniforme, na qual estão presentes três níveis distintos e simultâneos de degradação. Neste contexto, é importante destacar que a gravidade da degradação está associada não somente à quantidade, mas, também ao comprimento das arborescências, conforme evidenciado ao longo do artigo.

Feitos os esclarecimentos pertinentes, a Figura 9 exhibe o diagrama ilustrativo da situação proposta, ou seja, a combinação de três blocos representativos de arborescências distintas, cada um apresentando um grau específico de degradação.

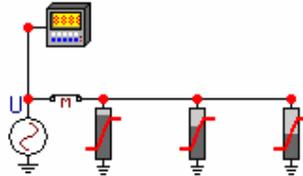


Fig. 9. Circuito equivalente para degradação não-uniforme.

A Figura 10 mostra as parcelas da corrente de fuga em fase com a tensão de alimentação para cada bloco separadamente e a respectiva composição dessas parcelas. Os correspondentes indicadores de estado, para fins de diagnóstico do estado operacional da isolação estão apresentados na tabela 1. É importante ressaltar que as discrepâncias identificadas entre os ângulos de fase  $\theta_3$  medidos (Fig.3) e calculados (tabela 1) deve-se ao processo utilizado para reproduzir, computacionalmente, as formas de onda da Figura 3, as quais foram obtidas experimentalmente.

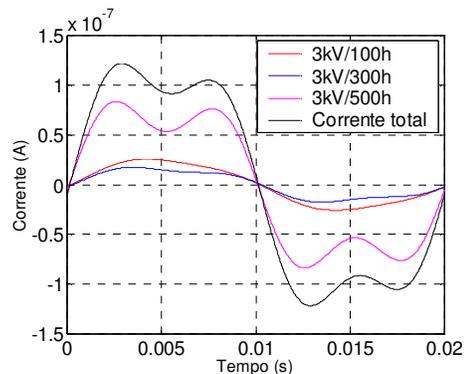


Fig. 10. Formas de onda das correntes de fuga.

**Tabela 1**

Amostra	3kV/100h	3kV/300h	3kV/500h	Total
DHT <sub>1</sub> (%)	8,50	19,40	35,60	26,70
P (μw)	12,90	8,90	46,90	67,60
I <sub>3</sub> (nA)	2,19	3,34	29,70	33,70
θ <sub>3</sub> (°)	-69,28	-46,81	-10,52	-17,10

Os resultados apresentados mostram que quanto maior a degradação maior será o valor do indicador DHT<sub>1</sub>, ao passo que o indicador  $\theta_3$  tende ao zero na medida em que a gravidade da avaria aumenta. Para situações de degradações não uniformes, esses indicadores acusam uma situação menos degradada do que a existente no cabo. Nesse sentido, o indicador  $\theta_3$ , diferentemente do DHT<sub>1</sub>, sempre diagnosticará

uma situação mais próxima da degradação mais severa, sendo, portanto, mais adequado para análise do comprimento ou gravidade das arborescências. No que se refere à magnitude da corrente harmônica de terceira ordem  $I_3$  observa-se uma tendência de crescimento com o aumento de degradação. No caso de degradações não uniformes, o indicador  $I_3$  aponta para uma degradação de maior risco do que a que de fato existe. Esse indicador não tem sido utilizado isoladamente e sim na relação  $I_3/I_1$  que corresponde ao  $DHT_1$  considerando apenas a terceira harmônica ou para traçar uma curva de suportabilidade  $I_3 - \theta_3$  acima da qual o cabo se encontra em situação de risco <sup>3</sup>. Quanto a potencia dissipada, trata-se de um indicador que, no caso de degradações uniformes, pode apresentar valores menores para deteriorações mais críticas, comparativamente a amostras com maiores áreas de degradação, porém, com arborescências de pequena gravidade. Em se tratando de degradações não uniformes apresenta resultados correspondentes à somatória das potências individuais de cada arborescência. Do exposto, e tendo em vista a complexidade do fenômeno, conclui-se ser desejável e necessário proceder à análise conjunta de vários indicadores para possibilitar um diagnóstico mais próximo da realidade.

## 6. Tensão de suprimento apresentando distorção

Os estudos tratados neste item objetivam considerar a influência, nos indicadores de estado, de uma tensão de suprimento apresentando desvios de suas características ideais. Para tanto, utilizar-se-ão os limites de distorção máximos recomendados pelo Operador Nacional do Sistema - ONS, particularmente para a harmônica de ordem três e para tensões de fornecimento inferiores a 69 kV. O valor limite para esta ordem harmônica é de 5%. Partindo desse princípio e valendo-se do circuito mostrado na Figura 3, são apresentados na tabela 2 os resultados alcançados computacionalmente, utilizando uma tensão de suprimento apresentando distintos percentuais de terceira harmônica, para o caso de maior degradação (3kV/500h) apresentado na tabela 1.

**Tabela 2**

3ª h (%)	0%	1%	3%	5%
DHT <sub>1</sub> (%)	35,60	36,50	38,50	40,50
P (μw)	46,90	47,20	47,80	48,40
I <sub>3</sub> (nA)	29,70	28,50	26,40	24,40
θ <sub>3</sub> (°)	-10,52	-10,23	-9,70	-9,23

Os dados apresentadas na tabela anterior evidenciam a variação dos indicadores de estado para diferentes percentuais da terceira harmônica. Os resultados mostram que distorções da forma de onda da tensão de suprimento dentro dos limites recomendados pelo ONS, pouco influenciam os resultados obtidos na metodologia aqui descrita, e que, portanto, podem ainda ser considerados aceitáveis para fins do diagnóstico desejado.

Muito embora tenha sido constatada uma pequena influência da distorção da tensão de suprimento nos indicadores de estado, nos patamares aqui tratados, é interessante salientar que para sistemas com um forte comprometimento da qualidade de energia, em que o nível de distorção seja mais crítico, a influência será mais significativa, exigindo uma avaliação mais precisa dessa situação. Assim sendo, com vistas a generalizar a validade da metodologia proposta, foi desenvolvido um procedimento matemático capaz de determinar os indicadores de estado devidos exclusivamente ao fenômeno de arborescência, ou seja, o procedimento permite extrair da corrente de fuga total, a influência da distorção presente na tensão de suprimento. Essa metodologia é válida para quaisquer níveis de distorção, inclusive para percentuais superiores aos recomendados pelo ONS, não importando as ordens

das harmônicas que se façam presentes na tensão de suprimento. Para tanto, os seguintes passos são adotados:

- Medição da tensão de suprimento e da corrente de fuga;
- Determinação via metodologia desenvolvida das componentes ortogonais da corrente de fuga;
- Identificação do espectro de frequência da tensão de suprimento, da componente ativa e da componente reativa da corrente de fuga;
- Cálculo de  $Re_q$  e  $Ce_q$  por meio da relação da tensão fundamental e das respectivas fundamentais das componentes ativa e reativa da corrente de fuga;
- Aplicação da tensão de suprimento distorcida ao circuito  $Re_q$  paralelo com  $Ce_q$  e determinação da contribuição harmônica resultante dessa configuração;
- Subtração da contribuição harmônica do item anterior da corrente de fuga original, o que resulta na corrente de fuga devido exclusivamente ao fenômeno de arborescência;
- Aplicação da metodologia desenvolvida na corrente de fuga devido à degradação, identificando as respectivas componentes: ativa e reativa da mesma;
- Determinação dos indicadores de estado.

A tabela 3 apresenta os resultados alcançados com essa metodologia para o caso de maior distorção recomendado pelo ONS (5%). Na segunda coluna estão especificados os indicadores de estado considerando a tensão de suprimento puramente senoidal. A coluna 3 indica a influência da distorção da tensão de suprimento e, por fim, a última coluna apresenta os resultados obtidos com a utilização da metodologia proposta, indicando um bom resultado entre os valores esperados e os calculados.

**Tabela 3**

Indicador	Valor devido exclusivamente à Arborescência	Valor devido à Arborescência + Tensão de suprimento	Valor recuperado
DHT <sub>1</sub> (%)	35,60	40,50	35,47
P (μw)	46,90	48,40	46,91
I <sub>3</sub> (nA)	29,70	24,40	29,63
θ <sub>3</sub> (°)	-10,52	-9,23	-10,46

## 7. Conclusões

Este trabalho apresentou uma proposta de modelo para o fenômeno de arborescência, tomando por base a característica V-I de diodos semicondutores. O desempenho do modelo proposto foi comparado com registros experimentais, alcançando-se resultados altamente satisfatórios e, portanto, mostrando-se apropriado para representar o fenômeno das arborescências. A estratégia de análise conjunta de vários indicadores, advindos do conhecimento da corrente de fuga, conduz a diagnósticos mais confiáveis quanto ao grau de degradação em que se encontra a camada isolante, podendo, dessa forma, ser utilizada para fins de avaliação das condições operacionais da isolação do cabo elétrico. Os autores consideram, ainda, a possibilidade de ocorrência de degradações não uniformes, situação que certamente é encontrada em sistemas reais, assim como também, a presença de distorção na tensão de suprimento, atualmente fato comum nos sistemas elétricos. Muito embora os estudos aqui descritos, para os níveis de distorção da forma de onda de suprimento utilizados, comprovem ser pequena a influência de sinais de tensão distorcidos, é recomendável que em sistemas com padrões de qualidade fortemente comprometidos sejam objeto de uma avaliação mais criteriosa, de maneira a não conduzir a resultados que não representem a real situação do estado físico da isolação. Outro aspecto que deverá

também ser contemplado em estudos futuros é a possibilidade de injeção de correntes harmônica pelas próprias cargas alimentadas pelas redes elétricas.

## 8. Bibliografia

- 1 Teixeira, M. D., Oliveira, J. C., Pacheco, C. R., Souto, O. C., “Avaliação do Estado Operacional de Cabos Isolados sob Condições Adversas: Estratégias e Proposta de Diagnóstico”, V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Energia Elétrica, Aracajú, Brasil, Agosto de 2003.
- 2 Yagi, Y., Tanaka, H., Kimura, H., “Study on Diagnostic Method for Water Treed XLPE Cable by Loss Current Measurement”, 0-7803-53035-9/98/\$10.00© 1998 IEEE, pp 653-656.
- 3 Tsujimoto, T., Nakade, M., Yagi, Y., Adachi, K., Tanaka, H., “Development of ON-SITE Diagnostic for XLPE Cable by Harmonics in AC Loss Current”, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5- 2003, Nagoya, Vol. 1, pp 73-76.
- 4 Bulinski, A. T., So, E., Bamji, S. S., “Measurement of the Harmonic Distortion of the Insulation Loss Current as a Diagnostic Tool for High Voltage Cable Insulation”, 0-7803-5935-6/00/\$10.00 © 2000 IEEE, pp 1615-1620.
- 5 Furuhashi, T., Tohyama, K., Imai, T., Murata, Y., “Dissipation Current Waveform of Water Tree Deteriorated Low Density Polyethylene Sheet”, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on, 15-18 Oct. 2006, pp 529-532.
- 6 Masuda, S., Tsuboi, S., Fujita, A., Tohyama, K., Imai, T., Murata, Y., Kanaoka, M., “Dissipation Current Waveform Observation of Water Tree Deteriorated LDPE”, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on. 16-19 Oct. 2005, pp 233-236.
- 7 Lima, F. N., Oliveira, J. C., Andrade, D. A., Silva, R. M. T., Finazzi, A. P., “Proposta de Modelo para Representação de Arborescências e Avaliação do Nível de Degradação de Cabos Isolados por meio da Análise da Corrente de Fuga”, VII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, Santos, Brasil, Agosto de 2007, p 86.