

# Caracterização da distribuição estatística de arborescências em água em cabos isolados em XLPE e análise harmônica da corrente dissipativa

Guilherme Sombrio, Vitoldo S. Filho, Guilherme C. Silva e Fernando A. Azevedo

**Resumo** – Foi realizada análise estatística da ocorrência do fenômeno de arborescência em água em cabos isolados em XLPE retirados da rede subterrânea de Curitiba após 30 anos de operação. As distribuições estatísticas mostraram que a ocorrência de arborescências em água do tipo “bow tie” é predominante em relação às arborescências em água do tipo “vented tree”. As arborescências do tipo “bow tie” apresentam comprimento na faixa de 50  $\mu\text{m}$  a 800  $\mu\text{m}$ , com valor médio em torno de 150  $\mu\text{m}$  e desvio padrão de  $\pm 80 \mu\text{m}$ . Estes resultados serviram como apoio para o desenvolvimento da técnica de diagnóstico de arborescências em água denominada Análise Harmônica da Corrente Dissipativa. Foi demonstrado em laboratório que a técnica é eficiente. Ajustes ainda devem ser realizados para melhorar o limite de detecção da mesma.

**Palavras-chave** – arborescência em água, cabos isolados, degradação, diagnóstico, envelhecimento.

## I. INTRODUÇÃO

O projeto de P&D intitulado “Desenvolvimento de sistemas de medida para diagnóstico de arborescências em cabos isolados de média tensão”, com código ANEEL 2866-011/2005, desenvolvido nos ciclos 2004/2005 e 2005/2006 pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) em parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), teve como objetivo desenvolver técnicas e equipamentos para diagnóstico de cabos isolados de redes subterrâneas. Duas técnicas foram desenvolvidas, sendo a primeira intitulada “Análise Harmônica da Corrente Dissipativa”, para detecção de arborescências em água e a segunda intitulada “Análise Estatística de Descargas Parciais”, para a

detecção de arborescências elétricas e outros mecanismos de geração de descargas parciais. Em um novo projeto, que já está em andamento, buscar-se-á integrar estas técnicas em um sistema único, a ser instalado em um laboratório móvel. Neste artigo estão descritos apenas os resultados relativos ao diagnóstico de arborescências em água, isto é, a técnica de Análise Harmônica da Corrente Dissipativa.

Os cabos isolados utilizados nas redes subterrâneas de distribuição são caracterizados por quatro elementos básicos: condutor metálico, sistema dielétrico, blindagem metálica e proteção externa. O condutor, elemento de transporte de energia elétrica, pode ser único no caso de cabos singelos (unipolares) e/ou múltiplo no caso de cabos multipolares. O sistema dielétrico é constituído por semicondutora interna, isolamento e semicondutora externa. A blindagem metálica serve como condutor para o transporte das correntes de carga capacitiva e de curto-circuito do sistema e a proteção externa serve como reforço mecânico e proteção contra penetração de água e agentes externos [1]. A Figura 1 apresenta uma ilustração de um cabo isolado.



Figura 1. Cabo isolado.

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Os autores agradecem às Instituições CNPq, COPEL e ANEEL pelo apoio financeiro.

Vitoldo S. Filho e Guilherme C. Silva trabalham no LACTEC (e-mails: vitoldo@lactec.org.br; gcsilva@lactec.org.br). Guilherme Sombrio foi aluno de iniciação científica pelo CNPq, desenvolvendo suas atividades no LACTEC.

Fernando A. Azevedo trabalha na COPEL (e-mail: fernando.azevedo@copel.com).

A isolamento primária dos cabos utilizados em redes subterrâneas de distribuição é composta por material dielétrico sólido extrudado, podendo ser de polietileno entrecruzado (XLPE) ou um elastômero de etileno propileno (EPR) [2].

O polietileno é um polímero sintético membro de uma série de compostos químicos chamados poliolefinas. É obtido a partir da reação de polimerização do monômero etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ). A polimerização ocorre na presença de catalisadores sob determinadas condições de temperatura e pressão. Dependendo das condições impostas no processo de polimerização é que se obterá o polietileno de baixa densidade

(LDPE), o polietileno de alta densidade (HDPE) ou o polietileno entrecruzado (XLPE). O XLPE é um polímero termofixo, normalmente obtido pelo entrecruzamento do LDPE e possui excelente estabilidade térmica em elevadas temperaturas [3, 4].

Esta característica permite que mais potência possa ser transportada para a mesma seção do condutor do que o cabo com isolamento em polietileno. Em sistemas onde se tem alto nível de curto-circuito uma economia global pode ser obtida com a utilização de isolamento termofixa. Atualmente, o polietileno entrecruzado com retardante de arborescência (TR-XLPE) tem sido utilizado com o objetivo de minimizar a degradação provocada pelo crescimento de arborescências em água [1]. O polietileno, reticulado ou não, possui excelentes propriedades elétricas, entre as quais se podem citar: alta resistividade volumétrica, baixa permissividade, baixo fator de dissipação e alta rigidez dielétrica em corrente alternada e impulso [Erro! Indicador não definido.1, 3].

A borracha de etileno propileno (EPR) é um polímero obtido da copolimerização do etileno e propileno (EPM) ou um terpolímero etileno-propileno-dieno-monômero (EPDM) dando origem a um elastômero com ótimas características físicas. O termo “isolamento de composto a base de EPR” se aplica bem neste caso, pois uma formulação típica de EPR contém de sete a nove ingredientes onde o EPM ou EPDM constitui apenas 45% a 50% do peso total do composto. O restante da formulação consiste em carga mineral, antioxidante, agente de vulcanização, co-agentes, agentes de processo e agentes especiais que conferem características específicas aos compostos [1]. O EPR, assim como o XLPE, têm sido amplamente utilizado em cabos de potência devido a suas excelentes propriedades elétricas [2]. Valores relativos às propriedades elétricas do polietileno e do EPR são listados na Tabela I [2].

Tabela I. Propriedades elétricas do polietileno e do EPR.

Propriedades	LDPE	HDPE	XLPE	EPR
Resistividade volumétrica ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$5 \times 10^{17}$	$5 \times 10^7$	$10^{16}$	$10^{15}$ - $10^{17}$
Rigidez dielétrica (kV/mm)	75	100	50	-
Permissividade relativa (1 kHz)	2,3	2,35	2,3	3,2
Fator de dissipação (1 kHz)	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-3}$

Apesar das excelentes propriedades dos materiais poliméricos empregados como dielétrico sólido em cabos de potência tem sido mostrado que estes materiais podem apresentar diversos mecanismos de envelhecimento quando submetidos a diferentes estresses, os quais podem levar, em última instância, à ruptura do material [5].

#### A. Mecanismos de envelhecimento e degradação de materiais poliméricos utilizados em cabos isolados

Envelhecimento pode ser definido como as mudanças irreversíveis e deletérias que ocorrem nos materiais dielétricos com o passar do tempo, as quais afetam sua habilidade para satisfazer o desempenho requerido. Estas mudanças podem afetar as propriedades elétricas, dielétricas e físico-químicas destes materiais. Deste modo, o diagnóstico e a avaliação do envelhecimento de materiais dielétricos podem ser realiza-

dos pela observação de propriedades selecionadas, as quais seriam sensíveis ao envelhecimento [6].

Em condições reais de operação, a isolamento pode estar sujeita a diversos tipos de estresse, a saber, elétrico (tensão, frequência de operação), térmico (temperatura de operação, gradiente de temperatura), mecânico (vibração, torção) e ambiental (umidade, contaminação) [7, 8, 9]. Estes estresses, agindo de forma individual ou combinada, podem levar ao envelhecimento e degradação e, em última instância, à ruptura do sistema de isolamento. Os principais mecanismos de envelhecimento e degradação que ocorrem em cabos de potência isolados são as arborescências em água (*water trees*) e as arborescências elétricas (*electrical trees*) [Erro! Indicador não definido.5].

#### B. Arborescências em água (*Water trees*)

A arborescência em água tem como causa principal a ação combinada de campo elétrico e umidade. Arborescências em água são estruturas difusas e temporárias, com aparência de um arbusto ou gravata borboleta. Desaparecem na secagem da isolamento e reaparecem quando esta é novamente umedecida, podendo tornar-se permanentemente visíveis com o uso de tintas solúveis em água, como por exemplo, o azul de metileno [2, 10]. Conforme ilustrado na Figura 2, deve ser feita uma distinção entre dois tipos de arborescências em água: arborescências em forma de gravata borboleta (*bow-tie tree*) e arborescências em forma de canais longos e estreitos (*vented tree*). O primeiro tipo cresce a partir da presença de impurezas e vazios no volume da isolamento, lateralmente e em direções opostas, ao longo das linhas de campo elétrico. O segundo tipo inicia seu crescimento na superfície da isolamento, geralmente a partir da camada semicondutora (no caso de cabos isolados) e se propaga na direção do campo elétrico [10].

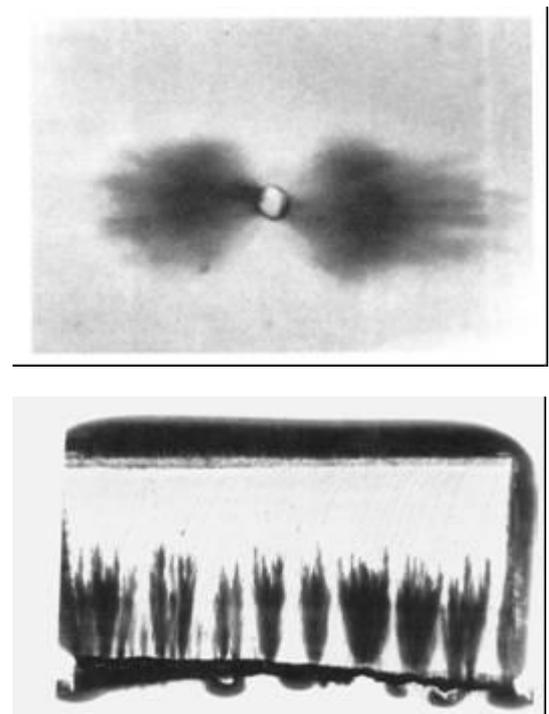


Figura 2. Arborescências em água tipo gravata borboleta (*bow-tie tree*) e tipo canal (*vented tree*)[2].

O crescimento das arborescências em água não é normalmente acompanhado da presença de descargas parciais detectáveis. Em ambos os casos a região degradada é composta de microcanais de cavidades finas, na faixa de micrometros, parcialmente ou totalmente preenchidos com água. Cabos contendo um grande número de arborescências em água apresentam redução da rigidez dielétrica em AC [2]. Embora existam diversas teorias que descrevem os fenômenos de arborescência, a compreensão dos efeitos sinérgicos entre os vários processos envolvidos ainda é bastante limitada. Todavia, parece haver um consenso de que três processos básicos estão presentes: (i) oxidação, (ii) quebra de cadeias e (iii) difusão de íons [10].

Sob determinadas circunstâncias, tais como a ocorrência de sobretensão, uma arborescência em água pode converter-se em uma arborescência elétrica e após este evento a ruptura da isolamento é iminente [10]. A conversão de uma arborescência em água em elétrica é mostrada na Figura 3.



Figura 3. Conversão de arborescência em água em arborescência elétrica [2].

### C. Arborescências elétricas (*Electrical trees*)

A arborescência elétrica tem início devido à presença de pontos de concentração de estresse, como vazios, cavidades e impurezas, juntamente com a ocorrência de descargas parciais. Quando o campo elétrico dentro do vazio excede um campo crítico, determinado pelo critério de ruptura dos gases, dá-se início a ocorrência de descargas parciais. A ocorrência de descargas parciais leva a decomposição e conseqüente carbonização do material, permitindo a formação de canais permanentes a partir do ponto de origem, com encaminhamento paralelo ao campo elétrico aplicado, apresentando a forma de um arbusto de estrutura ramificada e tonalidade escura [5]. Dependendo do grau do estresse elétrico aplicado as arborescências elétricas podem crescer lentamente, mas não tão lentamente quanto as arborescências em água, ou rapidamente como resultado de um impulso produzido por surto ou descarga atmosférica [11]. Atualmente, é aceito que a injeção de cargas espaciais, as quais também podem ocorrer em corrente alternada devido à sobretensões transientes que aumentam muito o campo elétrico, é outro fator que contribui para ocorrência de arborescências elétricas [8].

Uma vez iniciada a arborescência elétrica torna-se uma questão de dias ou semanas para que ocorra a ruptura do

sistema de isolamento [5]. Na Figura 4 está apresentado o crescimento de uma arborescência elétrica induzida por uma agulha.

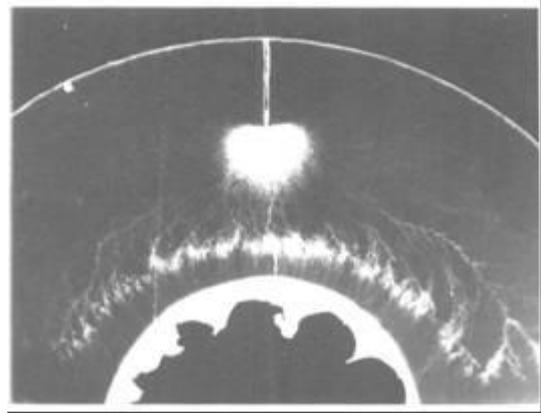


Figura 4. Crescimento de uma arborescência elétrica [2].

### D. Comportamento elétrico da isolamento

A análise da corrente que atravessa o isolamento pode ser realizada utilizando um modelo de circuito elétrico. Para um cabo que não contém arborescência o circuito equivalente é composto por uma capacitância e uma resistência em paralelo, como esquematizado na Figura 5. A capacitância  $C$  representa os mecanismos que armazenam energia em forma de campo elétrico incluindo a capacitância geométrica e a permissividade elétrica do XLPE. A resistência representa o comportamento dos mecanismos de condução no XLPE, onde a corrente é linearmente proporcional a tensão aplicada (comportamento ôhmico).

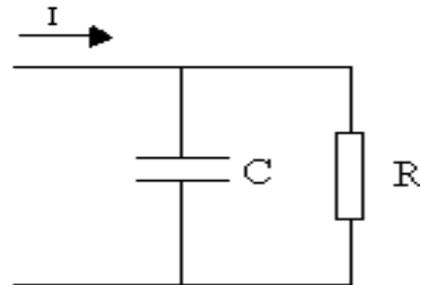


Figura 5. Circuito equivalente da isolamento do cabo novo.

Para um cabo degradado, além das componentes já citadas, existe uma componente da corrente resistiva com comportamento não linear. Essa corrente depende da tensão aplicada no cabo, da quantidade de arborescências e do comprimento das mesmas. Para reproduzir o circuito equivalente da isolamento degradada insere-se uma resistência não ôhmica em paralelo, ver Figura 6.

A parte não linear da corrente resistiva insere componentes harmônicas que estão relacionadas com o comprimento das arborescências presentes no cabo. O terceiro harmônico da corrente resistiva que atravessa a isolamento esta relacionada com o tamanho das arborescências, logo, para saber o estado de envelhecimento do cabo basta analisar essas componentes harmônicas [12].

Para obter apenas a parte resistiva deve-se subtrair a parte capacitiva da corrente e aplicar a Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transformer - FFT), que permite separar todos os harmônicos contidos em um sinal. Com esse resultado é possível estimar o estado de degradação da isolação em XLPE.

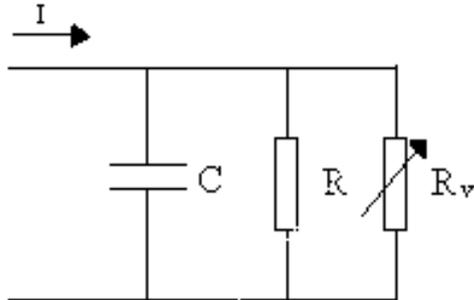


Figura 6. Circuito equivalente da isolação do cabo degradado.

Vale ressaltar que para construir um sistema de medida para diagnóstico de arborescências é preciso conhecer algumas características do polietileno entrecruzado, o processo de formação das arborescências, os efeitos na tensão e na corrente aplicada no cabo e como variam na presença de arborescências. A partir desses parâmetros é possível determinar o estado de envelhecimento que a isolação de XLPE se encontra.

## II. EXPERIMENTAL

### A. Distribuição estatística de arborescências

Para auxiliar nos testes da técnica de Análise Harmônica foi realizada um estudo prévio de análise estatística da ocorrência de arborescências em amostras de cabos isolados em XLPE retirados da rede subterrânea de Curitiba após 30 anos de operação.

A Figura 7 ilustra um dos cabos isolados em XLPE retirados da rede subterrânea de Curitiba.



Figura 7. Cabo degradado preparado para o ensaio elétrico.

A isolação em XLPE foi removida em ambos os lados do cabo. Os pedaços, com 30 cm de comprimento, foram identificados como lado direito (D) e lado esquerdo (E). Após esse procedimento, com o objetivo de se obter partes aleatórias ao longo da isolação, a amostra foi dividida em quatro partes equidistantes e, novamente, em três partes iguais, de modo que a identificação das amostras seguisse o critério de identificar o lado, a primeira repartição e por último a segunda repartição (E11, E12, E13, E21...). Foi adotado esse

método para dividir as amostras com o intuito de diminuir o efeito da degradação local e para que o tratamento estatístico da incidência de arborescências pudesse ser feito posteriormente de forma eficiente.

As amostras retiradas do cabo degradado foram fatiadas com uma espessura de 150  $\mu\text{m}$  com o micrótomo Leika RM 2165. Para visualizar as arborescências submetem-se as amostras a um processo de tingimento para obtenção de contraste entre as arborescências e suas vizinhanças. Nesse procedimento utilizou-se uma solução aquosa com 250 mL de água destilada, 8 mL de amônia e 0,5 g de azul de metileno. As amostras ficaram imersas nessa solução durante quatro horas a uma temperatura de, aproximadamente, 70  $^{\circ}\text{C}$  [13]. A Figura 8 apresenta as amostras após processo de tingimento.

Com as amostras devidamente tingidas, iniciou-se a identificação, medição e a contagem das arborescências. Para tanto foi utilizado um microscópio óptico Zeiss West Germany equipado com uma lente graduada. Antes do início das medidas a escala foi calibrada utilizando uma rede de difração de 100 linhas/polegada.



Figura 8. Amostras após processo de tingimento.

Nas Figuras 9 e 10 são mostradas micrografias de arborescências do tipo "bow tie" e do tipo "vented", respectivamente.



Figura 9. Micrografia de uma arborescência em água do tipo "bow tie".

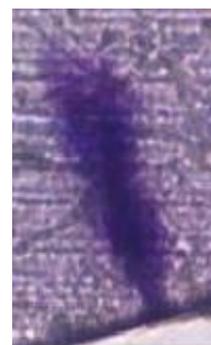


Figura 10. Micrografia de uma arborescência em água do tipo "vented".

Todas as arborescências encontradas nas fatias selecionadas foram identificadas e tiveram seu comprimento medido conforme descrito anteriormente. As Figuras 11 e 12 apresentam as distribuições estatísticas características obtidas para uma amostra de cabo isolado. Os resultados globais estão apresentados na Tabela II.

Tabela II. Média e o desvio padrão do comprimento das arborescências em água do tipo "bow tie".

Grupo de amostras	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )
E11	176,26	77,77
E12	174,79	88,31
E13	157,71	84,79
Total	168,25	84,64

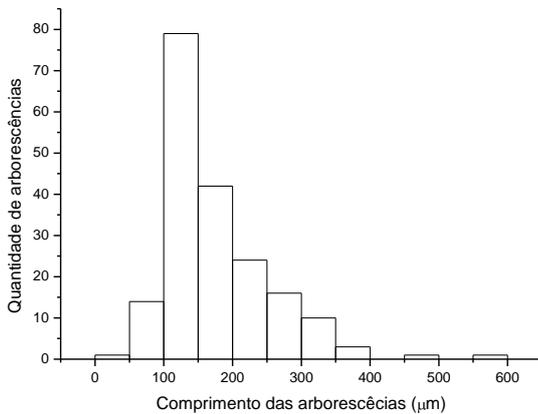


Figura 11. Gráfico de distribuição do comprimento das arborescências em água do tipo "bow tie".

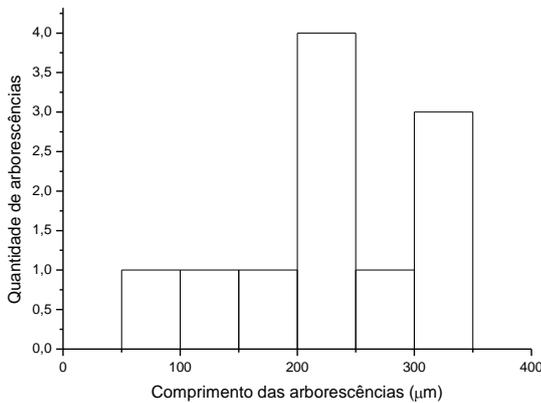


Figura 12. Gráfico de distribuição do comprimento das arborescências em água do tipo "vented".

### B. Análise harmônica da corrente dissipativa

Inicialmente, com o objetivo de validar o método de análise de arborescências em água por correntes harmônicas, foi montado um arranjo experimental para determinar o limite de detecção do método. Dois amplificadores de corrente foram desenvolvidos para amplificar o sinal de corrente na amostra de cabo XLPE e o sinal de corrente de um capacitor padrão de 1 nF.

Na Figura 13 é apresentado o diagrama do circuito eletrônico amplificador de corrente. O desenvolvimento foi iniciado com o projeto conceitual seguido de simulação computacional. Na simulação do circuito mostrado na Figura 13 uma fonte de 10 kV (rms) foi aplicada a uma capacitância de 600 pF, equivalente a capacitância de 2 m de cabo XLPE. Essa corrente capacitiva foi aplicada à entrada do amplificador de corrente o qual realiza a transdução da corrente da entrada para tensão de saída dentro da faixa de -10 a + 10 V (padrão da placa de aquisição de dados da National Instruments).

A vantagem deste método de transdução de corrente para tensão em relação aos circuitos com resistência "shunt" para a medida de corrente capacitiva é que o circuito de medição não introduz uma componente dissipativa na corrente medida.

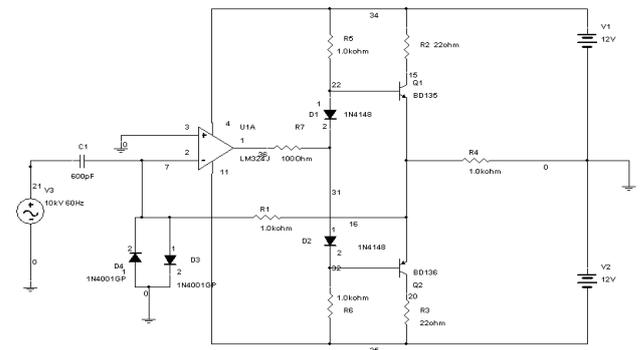


Figura 13. Diagrama do circuito eletrônico amplificador de corrente.

Após análise do funcionamento do circuito por meio da simulação computacional foi projetada e montada uma placa de circuito impresso contendo dois amplificadores de corrente, conforme o diagrama da Figura 14 e uma fonte simétrica estabilizada de  $\pm 12\text{Vcc}$  com entrada para a rede de 220 V ou 127 V. Um circuito teste utilizando uma amostra de cabo XLPE com capacitância  $C_a$  e um capacitor padrão  $C_p$  de 1 nF (Haefely) foi montado para o teste da técnica de separação da corrente dissipativa (ver Figura 14).

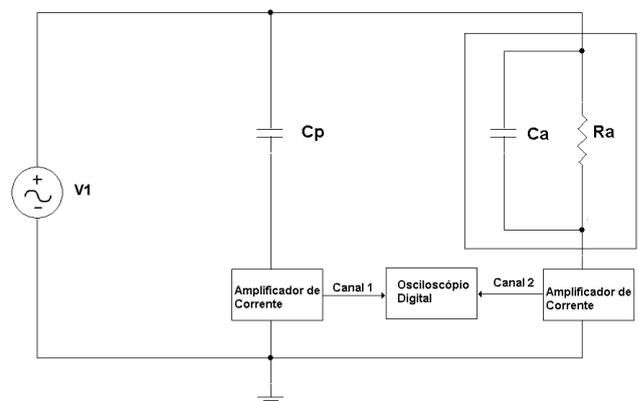


Figura 14. Diagrama esquemático do circuito de teste.

A tensão  $V_1$  aplicada foi de 8 kV rms e as correntes, no cabo e no capacitor padrão, foram medidas utilizando os amplificadores de correntes cujos sinais de saída foram registrados por um osciloscópio digital. Com o objetivo de simular a corrente dissipativa gerada pelas arborescências no cabo, foi conectado um resistor  $R_a$  de 16,8 M $\Omega$  em paralelo

com a amostra de cabo. Os sinais resultantes estão apresentados no gráfico da Figura 15.

O sinal de corrente de referência gerado pelo capacitor padrão (cor azul) apresenta-se em quadratura com a tensão aplicada (adiantado de 90°), enquanto que o sinal de corrente na amostra (cor vermelha) apresenta uma pequena defasagem devido a componente de corrente dissipativa introduzida pelo resistor conectado em paralelo com a amostra. Uma operação algébrica entre os dois sinais foi realizada [ $I_D = (I_A - I_C \cdot K)$ ] com o objetivo de separar a parte dissipativa do sinal de corrente da amostra.

Esta operação consiste em encontrar a constante **K** que resulte um sinal mínimo para a corrente **I<sub>D</sub>**. Quando a amplitude de **I<sub>D</sub>** é mínima a corrente é puramente dissipativa. Na Figura 15 o sinal da corrente dissipativa (cor preta) é o resultado desta operação.

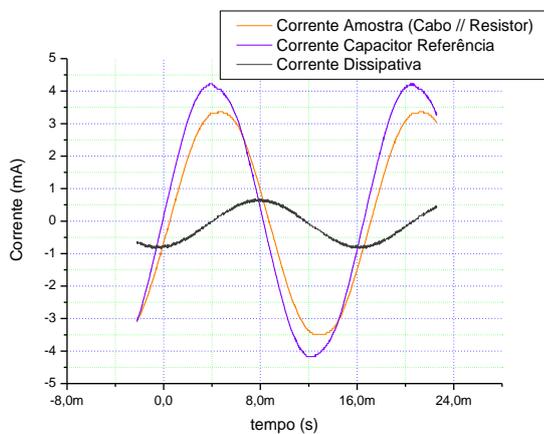


Figura 15. Sinais de corrente do arranjo experimental para verificação do método das correntes harmônicas

Com base nos resultados obtidos iniciou-se o desenvolvimento da rotina de instrumentação virtual (LabView) para realizar a operação de separação da corrente dissipativa de forma automática. Na Figura 16 é mostrado o diagrama em blocos da rotina desenvolvida para análise harmônica da corrente dissipativa.

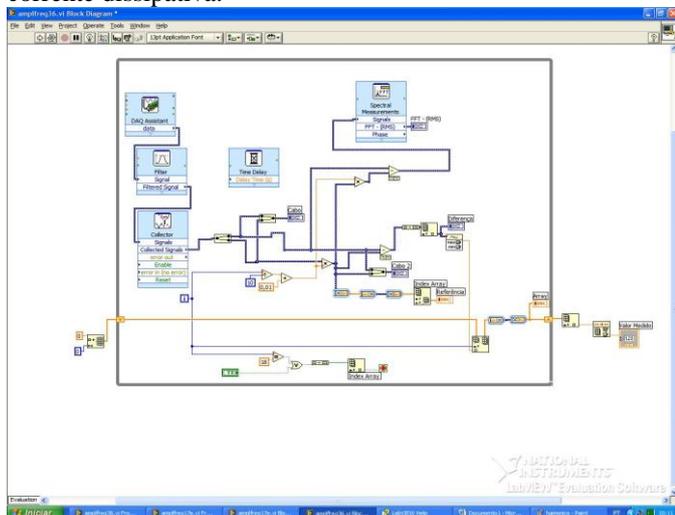


Figura 16. Diagrama em blocos da rotina para Análise Harmônica da Corrente Dissipativa.

Os sinais de saída dos amplificadores de corrente, que são relativos a corrente do capacitor padrão e a corrente na isolação do cabo, são enviados para a placa de aquisição de dados da National. Estes dois sinais são lidos nas entradas analógicas A10 e A11 e transformados em dados e depois de filtrados, o sinal de referência é multiplicado por um valor que é incrementado a cada iteração até que a subtração com o valor de corrente no cabo atinja um valor mínimo.

Quando o valor mínimo é atingido, o que significa que o resultado da subtração corresponde somente à parte da corrente dissipativa do cabo, o processo de iterações é interrompido e o sinal resultante é enviado para um módulo que realiza a Transformada Rápida de Fourier (FFT). O resultado da FFT é apresentado na forma gráfica (Figura 17), onde se pode verificar as amplitudes das componentes relativas a fundamental, terceira e quinta harmônicas, as quais estão relacionadas com o fenômeno de arborescência em água.

Na Figura 17 é mostrada a tela de visualização dos sinais da rotina de Análise Harmônica da Corrente Dissipativa.

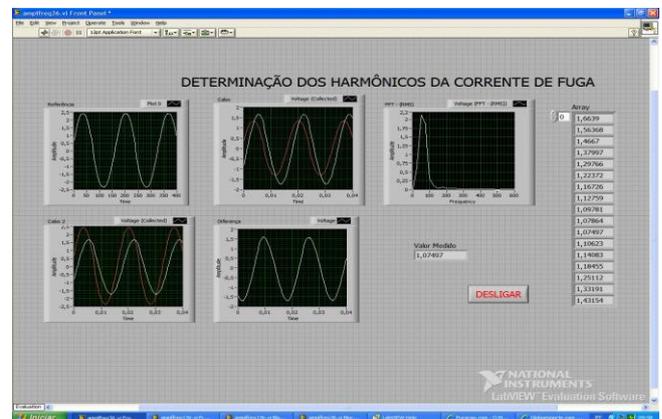


Figura 17. Tela de visualização dos sinais da rotina de Análise Harmônica da Corrente Dissipativa.

Com o objetivo de avaliar o limite de detecção do sistema em condições de laboratório foi montado um circuito equivalente em baixa tensão. Para determinar os valores das capacitâncias e resistências a serem utilizados no circuito equivalente foi verificada a dependência da corrente capacitiva em um cabo XLPE (50 mm<sup>2</sup>) utilizado em ramais de circuitos de distribuição. Foi determinada a capacitância por unidade de comprimento do cabo e com esse resultado foi calculada a reatância capacitiva. Com base na reatância capacitiva foi determinada a corrente capacitiva no cabo, para a tensão fase-terra de 8 kV, em função do comprimento do mesmo. O resultado obtido está apresentado na Figura 18.

O valor de corrente capacitiva escolhido para o teste do limite de detecção corresponde a um cabo com comprimento menor que 10 metros. Na Figura 19 é mostrado o diagrama do circuito utilizado para a simulação.

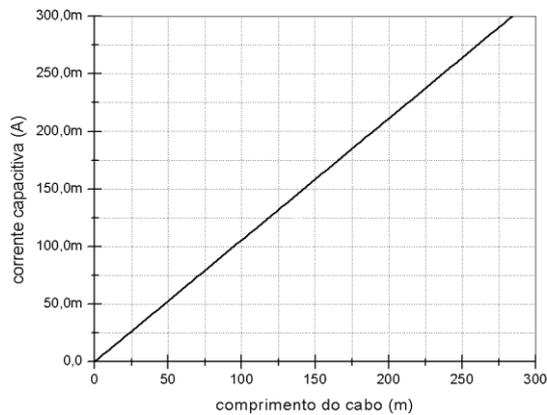


Figura 18. Gráfico da corrente capacitiva em função do comprimento de um cabo com isolamento em XLPE (50 mm<sup>2</sup>).

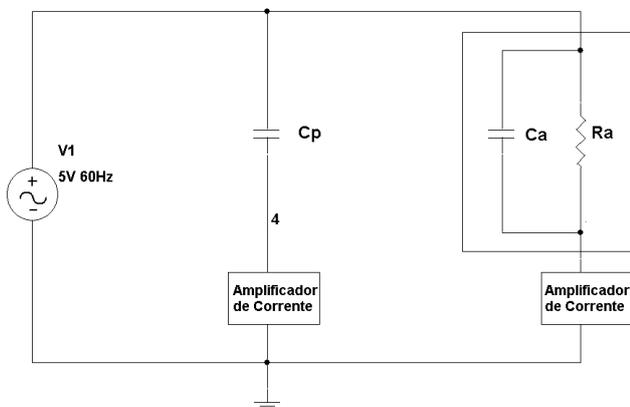


Figura 19. Diagrama do circuito em baixa tensão para a simulação de corrente no cabo XLPE.

Considerando uma fonte de 5 V, os valores do capacitor padrão **Cp** e da capacitância do cabo **Ca** foram fixados em 3  $\mu\text{F}$  e a resistência do cabo **Ra** foi aumentada a partir de 10k $\Omega$  até o limite de detecção do sistema. A forma de onda da corrente dissipativa encontrada pelo sistema após o processamento é mostrada na Figura 20.

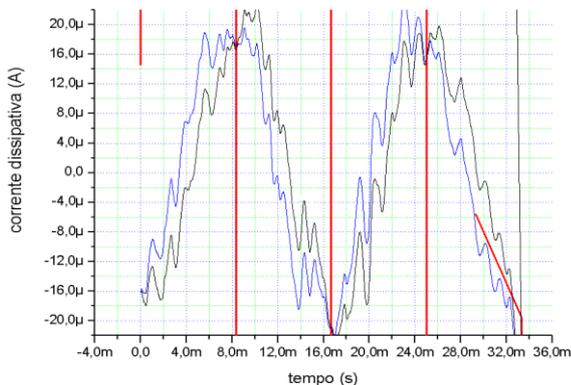


Figura 20. Forma de onda da corrente dissipativa no limite de detecção do sistema.

O valor encontrado foi de 20  $\mu\text{A}$ , as linhas verticais são da corrente dissipativa, a qual está em quadratura com a cor-

rente capacitiva, com amplitude de 8,8 mA. Estes resultados apontam que o sistema apresenta resolução satisfatória para a detecção de corrente harmônicas em cabos cujos comprimentos são maiores que 200 m.

### III. CONCLUSÕES

No cabo isolado em XLPE retirado do campo após 30 anos de operação foi observada grande incidência de arborescência em água. Nota-se que a ocorrência de arborescências do tipo “bow tie” é muito maior que a do tipo “vented tree”. Na distribuição de arborescências em água do tipo “bow tie”, encontram-se muitas arborescências na faixa de comprimento 50  $\mu\text{m}$  até 250  $\mu\text{m}$ . No caso da distribuição de arborescências em água do tipo “vented tree” a baixa quantidade de dados prejudicou a análise estatística.

A técnica de análise harmônica da corrente dissipativa apresentou limitação para medida de correntes abaixo de 20  $\mu\text{A}$ . Este limite é dependente do ruído ambiente, o qual é mais elevado para medidas em campo e, também, depende da corrente capacitiva no cabo, a qual é proporcional ao comprimento. Desta forma, novos limites de detecção deverão ser estabelecidos para os ensaios em campo.

Os resultados obtidos corroboram a necessidade do desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de diagnóstico, tendo em vista que cabos isolados com elevado tempo de operação podem ter sua taxa de falha elevada em razão da presença de arborescências.

Deve também ser ressaltado que este projeto tem uma importância estratégica muito grande para o país, uma vez que foi desenvolvido sistema de diagnóstico de cabos em solo nacional. O aprimoramento deste sistema poderá vir a eliminar a necessidade da importação deste tipo de equipamento.

### IV. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LACTEC pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste projeto. Também agradecem ao Eng. Fernando A. Azevedo pela disponibilização dos cabos isolados que foram material de estudo neste trabalho e o MSc. Fernando Piazza pelo auxílio técnico prestado.

### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. D. R. Teixeira Jr. *Cabos de Energia*. São Paulo: ArtLiber Editora, 2004.
- [2] R. Bartnikas, K. D. Srivastava. *Power and Communication Cables – Theory and Applications*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [3] C. Hall. *Polymer Materials*. London: Macmillan Education, 1989.
- [4] A. Barlow. The Chemistry of Polyethylene Insulation. *IEEE EIM*, v. 7, n. 1, p. 8-17, Jan. 1991.
- [5] L. A. Dissado, J. C. Fothergill. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. London: Peter Peregrinus, 1992.
- [6] G. C. Montanari, L. Simoni. Aging Phenomenology and Modeling. *IEEE TEI*, v. 28, n. 5, p. 775-776, Oct. 1993.
- [7] P. Cygan, J. R. Laghari. Models for Insulating Aging Under Electrical and Thermal Multistress. *IEEE TEI*, v. 25, n. 5, p.923-934, Oct. 1990.
- [8] R. J. Densley, R. Bartnikas, B. Bernstein. Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Dry-cured Insulation Systems for Power Transmission Cables. *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 9, n. 1, p. 559-571, Jan. 1994.
- [9] A. C. Gjaerde. Multifactor Aging Models – Origin and Similarities. *IEEE EIM*, v. 13, n. 5, p. 6-13, Sept. 1997.

- [10] J. P. Crine. Electrical, Chemical and Mechanical Processes in Water Treeing. *IEEE TDEI*, v. 5, n. 5, p. 681-694, Oct. 1998.
- [11] R. M. Eichhorn. *Engineering Dielectrics – Electrical Properties of Solid Insulating Materials*, v. II.A. Baltimore: ASTM STP783, 1983.
- [12] Y. Yukihiro, T. Hideo, K. Hitoshi. Study on diagnostic method for water treed cable by loss current measurement. *Electrical Insulation And Dielectric Phenomena*, Atlanta, p. 653-656, out/ 1998.
- [13] R. Ross, J. J. Smit, P. Aukema. Staining of water trees with methylene blue explained. *Conduction And Breakdown In Solid Dielectrics*, p. 456-460, jun/ 1992.