



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 04 068

Tópico: Análise, Diagnósticos e Soluções

AVALIAÇÃO DO ESTADO OPERACIONAL DE CABOS ISOLADOS SOB CONDIÇÕES ADVERSAS: ESTRATÉGIAS E PROPOSTA DE DIAGNÓSTICO

Mateus Duarte Teixeira* José Carlos de Oliveira
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

Cláudio Roberto Pacheco Olívio C. N. Souto
Fundação Educacional de Barretos
Faculdade de Engenharia Elétrica

RESUMO

Este artigo tem por objetivo investigar as principais metodologias empregadas no diagnóstico do estado operacional da isolação de cabos elétricos. Desta forma, são ilustrados alguns dos indicadores destacados na literatura para quantificar os níveis de deterioração apresentados pelos cabos, bem como algumas estratégias usadas para avaliar os níveis de degradação, considerando, inclusive, suas vantagens e limitações. Convém relatar que os estudos nessa área de concentração são ainda embrionários e constituem-se em técnicas de medição com os cabos energizados (“on-line”) ou não (“off-line”). A partir dos fundamentos fornecidos, faz-se uma proposição de um procedimento de análise, a ser empregado para a concepção de um equipamento de medição “on-line”, com os cabos em operação.

PALAVRAS-CHAVE

Cabos Elétricos, diagnóstico, vida útil, análise preditiva.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados à qualidade da energia elétrica podem ocasionar uma série de inconvenientes aos mais diferentes consumidores e dispositivos. Estes envolvem desde pequenas alterações no funcionamento de equipamentos até interrupções do fornecimento de energia. Neste particular, destacam-se os cabos elétricos,

os quais são responsáveis pela interligação geração/carga e, como a grande maioria dos diversos dispositivos que perfazem o sistema elétrico, estão sujeitos a operar fora das suas condições ideais.

Desta forma, elevações de temperatura associadas, por exemplo, com a qualidade da energia [1], e correspondentes reduções de sua vida útil são, dentre outros fatores, fenômenos que podem vir a comprometer o desempenho destes. A elevação de temperatura, a umidade, as solicitações dielétricas, são fatores que, de forma isolada ou conjunta, trazem grandes impactos sobre o isolamento dos cabos [1]. Estes fenômenos, relacionados com problemas na isolação, podem implicar no surgimento de efeitos prejudiciais que se manifestam na forma de arborescências (“water-trees”) [2]. Estas produzem descargas elétricas de pequena intensidade, as quais, de acordo com bibliografias próprias à área, podem trazer substanciais impactos sobre a confiabilidade operativa dos componentes aqui enfocados. Estes fenômenos, como dito, estão fortemente atrelados com as condições operacionais dos isolamentos e se manifestam na forma de descargas similares às atmosféricas, respeitadas as magnitudes dos fenômenos.

Desta forma, torna-se necessário e de suma importância a obtenção de informações que possam retratar e/ou prever quais as condições operacionais da isolação dos cabos elétricos. Surge, portanto, a necessidade de obter-se indicadores que permitam expressar a situação

* Av. João Naves de Ávila, 2000 - CEP 38400-902 - Uberlândia - MG - BRASIL
Tel.: +55 (034) 3239-4180 - FAX: +55 (034) 3239-4166 - E-mail: mteixeira@alunos.ufu.br

momentânea em que se encontra o cabo, bem como conceber a proposta de um equipamento de medição que, a priori, seja capaz de quantificar, analisar e avaliar os níveis destes parâmetros e a partir destes dados extraídos de forma “on-line”, com os cabos em pleno funcionamento, fornecer um diagnóstico completo sobre o estado de degradação do isolante.

Tendo em vista tais fatos, este artigo tem por meta discutir os principais indicadores do estado operacional encontrados na literatura [3, 4, 5, 6]. Todos estes vinculados com os níveis de degradação do isolante. As análises enfocam, dentre outros aspectos, as vantagens e limitações das estratégias. Fundamentando nos princípios físicos abordados apresenta-se, ao término deste trabalho, uma proposta de indicadores e equipamento destinado a avaliar o desempenho operacional de cabos isolados.

2.0 - SÍNTESE DAS PROPOSTAS EXISTENTES E ANÁLISE CRÍTICA

Pesquisas científicas enfocando a busca de estratégias de diagnósticos “on-line” do estado operacional da isolação de cabos elétricos têm merecido a atenção de pesquisadores e várias proposições podem ser encontradas na literatura especializada atual. Basicamente, a idéia está dirigida para o estabelecimento de um procedimento que seja capaz de monitorar em tempo real as condições de isolamento dos cabos de energia. Para tanto, a identificação de parâmetros ou variáveis diretamente correlacionados com o estado da qualidade da isolação do cabo são imperativos. Dentro deste contexto e, reconhecendo a atualidade do assunto, apresenta-se a seguir, uma síntese dos principais indicadores e correspondentes metodologias de análise, conforme relatado pelas publicações referidas no texto. Ademais, são apontadas as vantagens e limitações atribuídas a cada uma das metodologias.

2.1 Método da Corrente Contínua de Fuga (CC)

Um dos indicadores destinados a retratar o índice de degradação dos cabos refere-se ao nível da corrente contínua de fuga que flui através da blindagem da isolação. A metodologia consiste em aplicar uma tensão contínua entre o condutor e a blindagem da isolação do cabo e, em seguida, medir a correspondente corrente contínua oriunda da aplicação desta tensão.

Segundo [2], a metodologia em questão apresenta algumas limitações quando da sua utilização. São elas:

- Existe necessidade da utilização de fontes de tensão contínua de substancial porte para a realização dos testes;
- O cabo a ser diagnosticado deve estar sem carregamento e desenergizado;
- Não há a possibilidade de realizar-se várias medições simultaneamente, ou seja, os cabos devem ser diagnosticados individualmente;
- O tempo necessário para a realização dos testes, mesmo em cabos individuais, é alto.

2.2 Método do Fator de Dissipação do Dielétrico (Medição da $\text{tg}\delta$)

Esta estratégia de avaliação é bastante utilizada [2], pois não existe necessidade do cabo estar desenergizado. Desta forma, a corrente de fuga que flui através da isolação dos cabos, idealmente, deveria ser totalmente capacitiva (corrente adiantada de 90° em relação à tensão fase-terra aplicada ao cabo). No entanto, como em condições práticas e normais tal isolante inexistente, o que se observa é um ângulo de deslocamento próximo de 90° . Esta diferença angular refere-se ao chamado ângulo de perdas da isolação.

Existem algumas dificuldades inerentes a aplicação deste procedimento. São elas:

- O tempo necessário para a realização das medições é elevado, uma vez que, os cabos devem ser avaliados separadamente;
- O ângulo medido ($\text{tg}\delta$) refere-se a um valor médio ao longo de todo o comprimento do cabo. Isto conduz, às vezes, a diagnósticos incorretos, uma vez que níveis de $\text{tg}\delta$ em determinados pontos acima dos valores permitidos podem estar camuflados.

2.3 Método da Componente Contínua

Estudos e pesquisas, a exemplo de [3], estabelecem que, quando o isolante apresentar sinais de degradação, devidos, principalmente, ao fenômeno da arborescência elétrica ou “water-tree”, uma pequena componente contínua pode ser detectada na corrente de fuga alternada. A magnitude e a polaridade desta componente contínua estão intimamente relacionadas com o grau de deterioração da isolação do cabo. Assim,

este é um indicativo para se avaliar as condições operacionais em que se encontram as isolações dos cabos. Dentre as principais vantagens e desvantagens desta estratégia pode-se identificar que a mesma:

- Possibilita diagnóstico preciso quando associado a outro método, como, por exemplo, o fator de dissipação ($\text{tg}\delta$);
- Permite medições “on-line”;
- A maior dificuldade está no fato da componente contínua se manifestar com amplitudes da ordem de nanoAmperes (nA). Isto dificulta uma leitura precisa visto que, alguns dispositivos eletrônicos utilizados para tal fim, por si só, apresentam níveis de “off-set” da ordem de miliAmperes (mA).

2.4 Método da Medição da Resistência da Isolação

Um outro indicativo visando analisar e avaliar os danos acarretados ao isolante dos cabos, está relacionado com a clássica resistência de isolamento [4]. Quando esta se apresentar abaixo dos limites estabelecidos, isto é um sinal que o isolante está perdendo suas características elétricas. Há alguns anos atrás havia a necessidade dos cabos serem desenergizados para a realização dos testes. Porém, nos dias atuais, é possível a realização de tais medições com os cabos energizados. No entanto, vale ressaltar que, as medições devem ser realizadas individualmente, o que acarreta longos períodos para a execução dos testes.

2.5 Método da Medição da Tensão Residual

De acordo com a referência [4], a técnica aplicada consiste em medir a tensão residual na isolação do cabo, quando a este é aplicada uma tensão contínua. O método em questão apresenta algumas desvantagens e/ou limitações, as quais são:

- Os cabos devem estar desenergizados para a execução dos testes;
- As medições devem ser realizadas separadamente, ou seja, um cabo por vez, o que implica em longos períodos para a realização dos ensaios;
- Existe a necessidade da utilização de fontes de tensão contínua de porte.

2.6 Método da Medição da Distorção da Corrente de Fuga.

A não linearidade da corrente de fuga que circula pela blindagem da isolação do cabo pode ser explicada por teorias de descargas parciais ainda pouco exploradas [5]. O método de medição da distorção da corrente de fuga, principalmente pela presença de componentes pares em sua composição, se mostrou muito eficiente no diagnóstico “on-line” de cabos de média tensão. No entanto, a obtenção de correntes de fuga pode ser também atribuída à presença de tensões operacionais distorcidas, o que é muito comum nos sistemas reais. Isto pode trazer uma falsa interpretação dos resultados.

3.0 - UMA PROPOSTA CONSOLIDADA

Do exposto segue que, grande parte das metodologias utilizadas para a avaliação e diagnóstico do estado físico em que se encontra o isolamento dos cabos, pode apresentar deficiências e limitações. Isto tem orientado para o emprego de um processo de cruzamento de informações, utilizando-se para tanto de dois indicadores de forma conjunta. Algumas referências [2] e [6] relatam que este procedimento fornece resultados mais precisos e confiáveis. Dentro deste contexto, esta seção objetiva explorar uma estratégia fundamentada na determinação do ângulo de perdas da isolação, o qual, como se sabe, é proporcional à potência ativa dissipada no isolante e, ao mesmo tempo, na medição do nível de componente contínua presente na corrente de fuga. Vale observar que os indicadores mencionados permitem medições e monitorações em tempo real (“on-line”). Os indicadores supra-indicados são considerados em maiores detalhes na seqüência.

3.1 Potência Ativa Dissipada no Dielétrico.

Conforme discutido, um dos indicadores está relacionado com a medição do ângulo de perdas da isolação ($\text{tg}\delta$). No entanto, esta não é uma tarefa muito simples de se executar visto que, o referido valor se apresenta em faixas de valores extremamente pequenos, o que pode trazer grandes dificuldades para os trabalhos de medição. Por este motivo, torna-se fundamental proceder às medições utilizando-se um outro parâmetro que venha a contornar os problemas mencionados. Neste sentido, surge a idéia de correlacionar o ângulo de perdas com a potência ativa dissipada pela isolação do cabo. Ademais, vale salientar que ambos, $\text{tg}\delta$ e potência ativa dissipada no dielétrico, estão intimamente

relacionados com a corrente de fuga que flui pelo isolante do cabo.

A figura 1 apresenta um modelo elétrico representativo do processo que dá origem a corrente de fuga em um isolante e o correspondente diagrama fasorial.

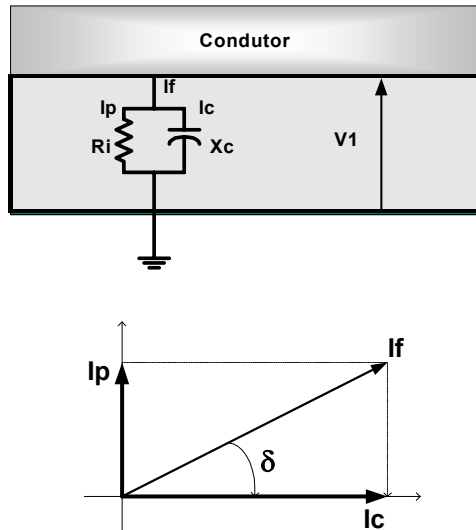


Figura 1 – Representação da Isolação do cabo e diagrama fasorial correspondente

Na figura:

- I_f – corrente de fuga que flui pela isolação;
- I_p – parcela da corrente que representa as perdas “Joule”;
- I_c – corrente capacitiva;
- R_i – resistência da isolação;
- X_c – reatância capacitiva da isolação;
- V_1 – tensão fase-neutro aplicada ao cabo;
- δ - ângulo de perdas da isolação.

Normalmente, nos catálogos de fabricantes de cabos isolados são fornecidos, dentre outras características elétricas, a reatância capacitiva e a tensão nominal do mesmo (fase-fase e fase-neutro). Assim, com base nessas informações e com o auxílio do modelo e diagrama fasorial apresentados acima, pode-se obter a corrente capacitiva do referido cabo, a qual é dada por:

$$I_c = \frac{V_1}{X_c} \quad (1)$$

A reatância capacitiva apresentada na equação (1) é função da frequência do sistema e da capacitância apresentada pela isolação do cabo. Partindo do pressuposto que a frequência do sistema elétrico a que o cabo está submetido seja constante, e que a capacitância obtida através de parâmetros físicos e geométricos do cabo seja também fixa, conclui-se que a corrente capacitiva

será meramente uma função da tensão aplicada ao cabo. Admitindo que a tensão seja a nominal do cabo, então a corrente de fuga capacitiva do dielétrico será a nominal e, uma vez preservada a qualidade do isolamento e a geometria do cabo, a mesma possui valor constante. Esta conclusão, embora óbvia, é de grande importância para a obtenção e interpretação da outra parcela da corrente de fuga do dielétrico, qual seja, da parcela ativa da mesma. Assim, do diagrama fasorial tem-se que:

$$I_a = I_c * tg\delta \quad (2)$$

Outras expressões passíveis de obtenção são:

$$R_i = \frac{V_1}{I_a} \quad (3)$$

e:

$$\Delta P = \frac{V_1^2}{R_i} \quad (4)$$

Substituindo (2) e (3) em (4) obtém-se:

$$\Delta P = \frac{V_1^2 * tg\delta}{X_c} \quad (5)$$

Considerando que o cabo esteja operando sob condições nominais, como enfocado anteriormente, constata-se através da equação (5) que, ao ocorrer um aumento no ângulo de perdas da isolação ($tg\delta$), para se satisfazer a equação em questão, existe a necessidade de um acréscimo do termo ΔP . Este incremento de potência ativa dissipada no isolamento é indicativo que o cabo está alterando suas características dielétricas. Cada tipo de material isolante utilizado na confecção dos cabos apresenta um ângulo máximo de perdas admissível pelo isolante ($tg\delta_{máx.}$) a qual corresponde a uma máxima potência ativa dissipada admissível pela isolação. Isto posto conclui-se que, se a $tg\delta$ estiver acima dos valores máximos permitidos, a referida potência também estará, e desta forma, este último parâmetro poderá ser empregado para diagnosticar o estado de degradação do dielétrico.

Objetivando obter uma metodologia mais segura para o diagnóstico pretendido procede-se, na seqüência, ao estabelecimento de um outro indicador, Esta segunda grandeza está associada com a já esclarecida componente contínua, a qual, de forma conjunta com a anterior, fornecerá uma estratégia de maior confiabilidade para o diagnóstico objeto deste trabalho.

3.2 Componente Contínua.Presente na Corrente de Fuga

Estudos e pesquisas [2] têm demonstrado que, quando da manifestação do fenômeno da arborescência, existe uma pequena componente contínua, superposta à corrente alternada de fuga, que flui entre a superfície do condutor e a blindagem da isolação. Além disso, tem-se observado que o surgimento desta corrente contínua está intimamente relacionado com o grau de degradação da isolação do cabo. Alguns trabalhos [Soda] mencionam e comprovam que há uma estreita relação entre os níveis desta componente contínua e o comprimento das "water-trees". Além disso, foi constatado que o fenômeno focado está vinculado não somente a geração da componente contínua, mas também que o mesmo exerce influência, de forma direta, na distorção da corrente de fuga, na diminuição da tensão de ruptura suportável pelo dielétrico, redução da resistência da isolação, aumento no número de ocorrências de descargas parciais, etc.

3.3 Inter-relação entre os Indicativos

A figura 2 mostra, de um modo genérico e conceitual, a associação gráfica dos dois indicadores supramencionados, destacando-se a formação de três regiões de operação distintas dos sistemas isolantes. Estas variam desde a indicação da normalidade operacional até um estado de degradação mais acentuado.

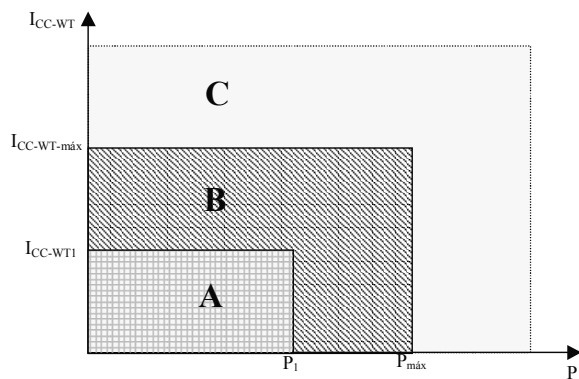


Figura 2 – Regiões ICC vs. P que indicam a condição de isolação do cabo.

Na figura 2, a região de operação designada por "A" implica que o cabo está isento de sinais de deterioração, ou seja, a isolação encontra-se em perfeitas condições operacionais. Com relação à faixa designada por "B", esta indica que o material isolante apresenta sinais de degradação

e que, o referido dispositivo necessita de atenção, ou seja, um acompanhamento mais próximo. Finalmente, a região designada por "C" informa que a isolação do cabo está deteriorada e indica que o mesmo seja vistoriado e eventualmente substituído.

Para a obtenção dos indicadores anteriormente citados, bem como para viabilizar critérios de avaliação fundamentados em dados de medição reais, apresenta-se, na seqüência, uma proposta de equipamento para o processo de monitoração "on-line".

4.0 - A CONCEPÇÃO DA ESTRUTURA DA MEDIÇÃO

Fundamentando-se nos critérios anteriormente estabelecidos, o cerne deste item consiste em apresentar uma concepção de equipamento destinado à monitoração dos níveis de degradação ocorridos nas isolações dos cabos elétricos. Tal equipamento, a priori, deve atender as seguintes premissas:

- Realizar monitorações em tempo real "on-line", com o sistema energizado;
- Apresentar versatilidade, ser compacto, de fácil manuseio e custo acessível, pois deseja-se, a princípio, instalar varias unidades de medição em diferentes cabos;
- Ser capaz de medir os indicadores apresentados anteriormente;
- Efetuar várias medições e avaliações de maneira simultânea, com o auxílio de um "software", a ser desenvolvido, para a realização dos diagnósticos.

Neste momento, é conveniente ressaltar que, para a utilização do citado equipamento, torna-se necessário que a blindagem da isolação dos cabos a serem avaliados estejam aterradas em apenas um único ponto ao longo de toda a sua extensão. Nestas condições, somente a corrente de fuga que flui pelo dielétrico encontra-se presente na blindagem.

Uma vez apresentadas às situações que devem ser atendidas para a utilização da estratégia proposta, a figura 3 mostra, na forma de diagrama de blocos, a concepção do equipamento a ser desenvolvido.

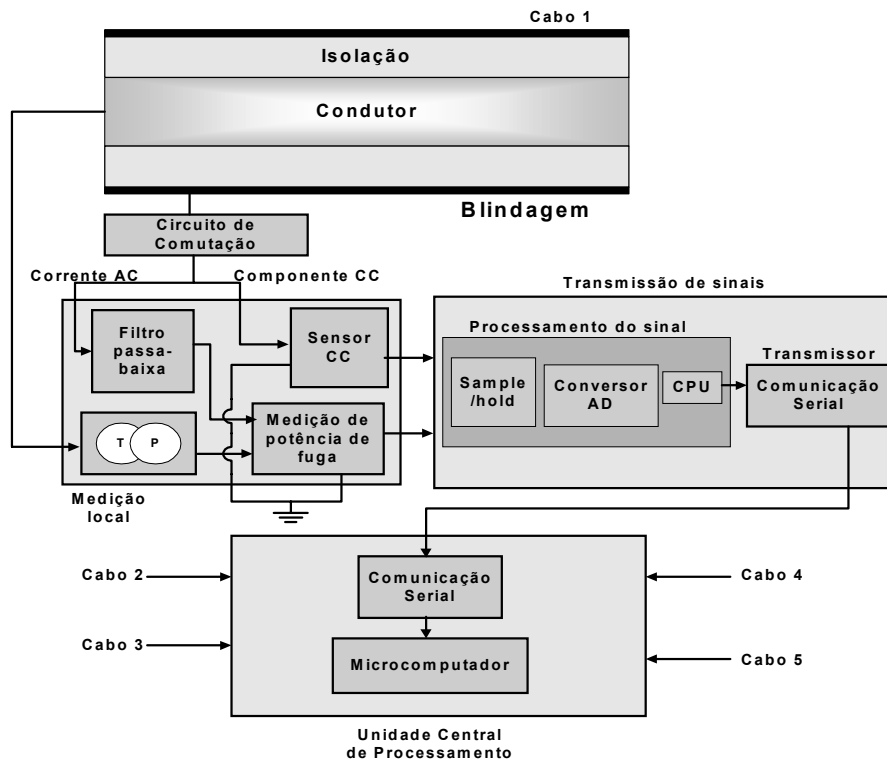


Figura 3 – Estrutura do Equipamento Proposto

5.0 - CONCLUSÕES

A falha no fornecimento energético provocado pelo rompimento da isolação de cabos elétricos isolados é, sem dúvida, motivo de preocupações, especialmente em sistemas industriais e de distribuição, ocasionando a interrupção do fornecimento e, conseqüente perda da Qualidade da Energia Elétrica. Assim, o desenvolvimento de um dispositivo capaz de quantificar e analisar o índice de degradação da isolação dos cabos em tempo real é de fundamental importância.

Preocupando-se com a matéria, este artigo abordou os principais métodos, citados na bibliografia correlata, que expressam o atual estado da arte e os avanços já obtidos neste segmento de conhecimento. Como pode ser observado, vários pesquisadores têm atuado neste contexto e uma substancial experiência já foi adquirida. Não obstante a isto, é importante ressaltar que os trabalhos ainda são embrionários e muito deve ainda ser feito para materializar a idéia em realidade aplicável.

Em seguida, foi proposta uma estratégia utilizando dois indicadores conjuntamente. A saber: o emprego da componente de corrente contínua aliada à medição da potência ativa dissipada no dielétrico possibilitam a realização

“on-line” do diagnóstico, fator este preponderante para a escolha dos mesmos.

Finalmente, foi apresentada uma concepção de um equipamento destinado a medição das grandezas mencionadas e que objetivam prever as condições operativas da isolação dos cabos.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. R. Pacheco, "Uma Contribuição a Análise de Desempenho de cabos Isolados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Maio 2002.
- [2] S Yamaguchi, S. Soda, N Takada, "Development of a New Type Insulation Diagnostic for Hot-Line XLPE Cables", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, Iss..3, July 1989.
- [3] Z. Wei, Z. Yutao, Y. Baitun, "Study on DC Component Method for Hot-Line XLPE Cable Diagnosis", *IEEE International Symp. Electr. Ins, Pittsburgh*, June, 1994
- [4] K. Soma, M Aihora, Y. Kataoka, "Diagnostic Method for Power Cable Insulation" *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-21, Iss..2, December, 1986.
- [5] Y. Yagi, H Tanaka, "Study on Diagnostic Method for Water Treed XLPE Cables by Loss Current Measurement", *Symp. Electr. Ins.* June 1990.
- [6] T. Nakayama, "On-Line Cable Monitor Developed in Japan", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, Iss..4, October 1991.