

Avaliação do Desempenho de Métodos para a Obtenção de Indicadores do Estado de Degradação de Cabos Isolados

L. N. Velasco¹, J. C. Oliveira¹, L. C. G. Freitas¹, A. Reis, Eng.¹, C. A. Rocha¹, A. P. Finazzi, Dr.², F. N. Lima, Dr.², H.C. Martins, Eng.³, W. J. Araújo, Eng.³, J. M. Borges, Eng.³.

Resumo – A qualidade do fornecimento de energia elétrica, dentre outros quesitos, contempla os indicadores de continuidade como um dos mais relevantes fatores para a caracterização da excelência do serviço. Neste contexto, um dos principais problemas responsáveis pelas interrupções não-programadas está relacionado com a degradação da isolação dos cabos elétricos. Dos fenômenos responsáveis pela deterioração dos isolamentos, um dos mais conhecidos é o da arborescência, efeito este capaz de ocasionar grandes perdas das propriedades isolantes do material dielétrico. À luz destes fatos, o desenvolvimento de procedimentos capazes de avaliar, prever e indicar o estado operacional de cabos mostra-se altamente atrativo para os fins aqui almejados. Neste cenário, este trabalho apresenta uma síntese de análise realizada em campo, empregando uma instalação de uma distribuidora de energia e contemplando medições não evasivas de um cabo de media tensão. Os resultados extraídos dos registros feitos são então empregados para a obtenção de indicadores de estado, nos termos atualmente em uso e na perspectiva de outras estratégias para o diagnóstico.

Palavras-Chave – Arborescência, cabo isolado, corrente de fuga, degradação, diagnóstico, indicadores de estado.

I. INTRODUÇÃO

DENTRE os mais distintos fenômenos responsáveis pela degradação dos isolamentos dos cabos, o da arborescência consiste num tipo relativamente comum de problema que se desenvolve no na camada de isolação destes componentes. Normalmente isto ocorre quando o cabo apresenta de vazios e impurezas no interior da isolação, falhas ou saliência nas camadas dos semicondutores nos cabos XLPE, etc. [1]. Com o avanço da degradação, a forma de onda da corrente de fuga estabelecida entre o cabo condutor, a camada de isolamento e a malha de terra sofre alterações tanto em magnitude como na sua forma de onda, fatores estes que podem evidenciar que a vida útil do componente encontra-se significativamente comprometidos no que tange a sua vida útil

[2]. Visando, pois o diagnostico da situação operacional com que se encontra um cabo isolado, vários métodos foram desenvolvidos e têm sido empregados para fins de tomada de decisões sobre a necessidade ou não de providências diversas variando desde reparos até a substituição deste componente. Neste particular, visando meios práticos para o ajuizamento dos efeitos finais do fenômeno da arborescência sobre a degradação dos cabos e observando, de forma pontual, os estudos sobre a modelagem e métodos de diagnósticos, diversos trabalhos, a exemplo de [1-9], se destinam a proposição de procedimentos para a detecção deste tipo de falha através da extração de informações e parâmetros de desempenho sobre o nível de degradação da camada de isolação de cabos. Os métodos encontrados nas mencionadas referências possuem abordagens diferentes. Um requerem que o cabo esteja desenergizado enquanto que outras se baseiam em medições com o componente energizado porém à vazio. Em [10] tem-se uma síntese destas estratégias.

Pesquisas realizadas e descritas em [10-13], complementarmente ao tema, relatam contribuições na direção do estabelecimento de modelos matemáticos destinados a representação e simulação do fenômeno da arborescência e, a partir dos sinais amostrados, são apontadas direções para a obtenção de parâmetros de desempenho do estado operacional de cabos isolados.

Avançando neste tópico, o presente artigo encontra-se focado para estudos avaliativos de desempenho da aplicação dos processos classicamente utilizados para a avaliação dos indicadores de estado de cabos, adicionando-se investigações sobre o desempenho de procedimentos complementares fundamentados no reconhecimento do padrão de não-linearidade atrelado com o fenômeno da arborescência. Os trabalhos de diagnostico contemplam, sobretudo, cabos comerciais reconhecidamente novos e antigos existentes numa instalação subterrânea de uma distribuidora de energia.

II. MODELAGEM ELÉTRICA DE CABOS ISOLADOS COM DEGRADAÇÕES POR ARBORESCÊNCIAS

O mecanismo envolvido no processo da circulação da corrente de fuga entre o condutor interno de um cabo, seu isolamento, a blindagem e o aterramento podem ser sumariamente compreendido através da Fig. 1. Esta esclarece que o material condutor propriamente dito é identificado por (A) enquanto que a blindagem do cabo que é externa à área

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica, Bloco 3N, CEP:38402-902, Uberlândia, MG – Brasil, Fone: (34) 3239 4760 / 3239 4733

²Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia Elétrica, Av. Fernando Corrêa da Costa, nº 2367 - Bairro Boa Esperança, CEP: 78060-900, Cuiabá, MT- Brasil, Fone: (65) 3615870

³Companhia Energética de Minas Gerais, Avenida Barbacena, 1200 – 16º andar – Ala B1, CEP: 30190-131, Belo Horizonte, MG – Brasil, Fone: (31) 33072469

isolada é indicada por (B). Esta superfície mais externa é metálica e oferece proteção e segurança para o cabo através de sua conexão a um ou mais pontos de aterramento. Esta estrutura construtiva determina uma configuração geométrica responsável pela existência de um efeito capacitivo similar aqueles obtidos pela associação de dois materiais cilíndricos concêntricos separados por um isolante químico qualquer. Isto implica na existência de um capacitor equivalente, advindo de uma situação idealizada, a qual, para fins práticos, pode ser ainda complementada com uma inevitável resistência equivalente e representativa das componentes ativas das correntes de fugas. Portanto, idealmente, o circuito equivalente associado com a presença das reconhecidas correntes de fuga se apresenta com características de um arranjo RC. A Fig. 2 fornece um corte transversal do componente em pauta

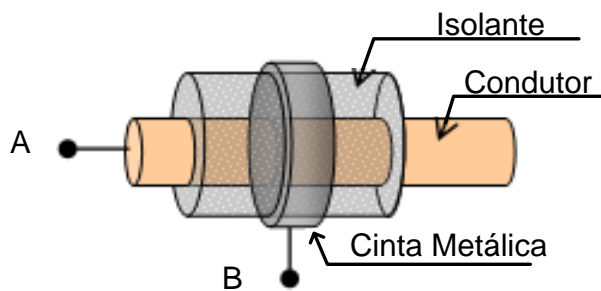


Fig. 1 - Conceção física e construtiva de um cabo isolado

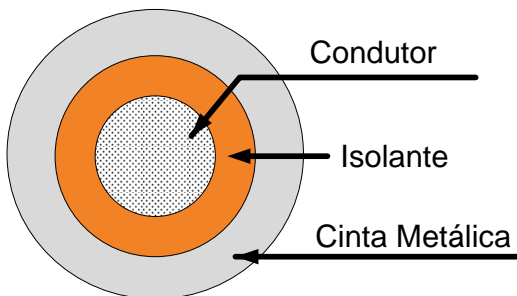


Fig. 2 - Seção transversal representativa de um cabo isolado

Nos termos acima referidos, sem a presença de efeitos anômalos devido a degradações naturais que podem se manifestar para as situações reais, o cabo pode, então, ser representado como um circuito RC, como indicado na Fig. 3. À luz desta concepção física, fica evidenciado a existência de uma corrente estabelecida entre o condutor e a blindagem que se apresenta com duas componentes, uma ativa e outra reativa, sendo a última dominante sobre o processo. Para fins deste trabalho a componente capacitiva é identificada por i_{C0} e a componente resistiva por i_{R0} . A forma adotada para a representação das grandezas representativas das correntes e tensões será a instantânea visto a necessidade do reconhecimento das formas de onda das mesmas.

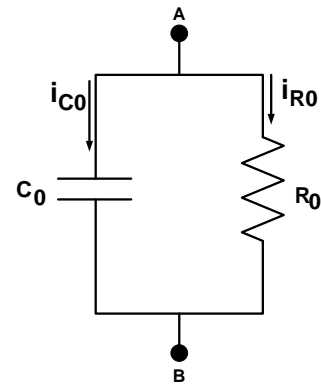


Fig. 3 - Circuito equivalente simplificado para o trecho de um cabo isolado não degradado.

Partindo do pressuposto que um determinado cabo apresente regiões degradadas e outras sãs, como indicado simbolicamente na Fig. 4, o modelo a ser estabelecido deverá compreender estas duas.

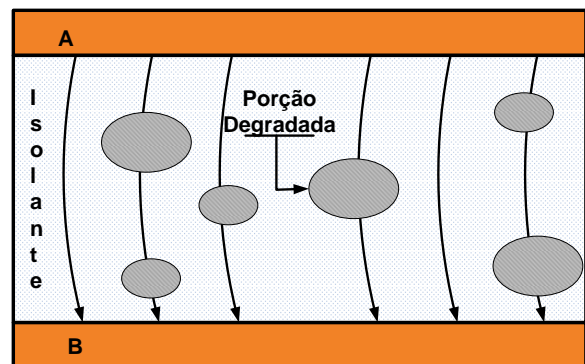


Fig. 4 - Interpretação física para a manifestação de regiões degradadas em cabos isolados.

Para as porções não degradadas o modelo equivalente consiste na combinação RC anteriormente referida, em que pese os valores a serem atribuídos a tais parâmetros, já que nem toda a superfície se encontra sob condições normais de operação. No que tange às seções que evidenciam os problemas aqui contemplados, há de se reconhecer que as mesmas se apresentam com características não lineares, como ressaltado em algumas publicações sobre a matéria [1-2]. Diante desta conjuntura, a adoção de parâmetros lineares já não consiste numa medida adequada para a representação dos trechos degradados, fato este que orienta para outras estratégias. Por motivos compreensíveis, a busca de modelos que atendam aos requisitos impostos pela relação não linear entre a tensão e a corrente nos terminais das partes danificadas passa, necessariamente, pela utilização de dispositivos compatíveis com tais exigências, como seria o caso de resistores não lineares, supressores de surto, semicondutores de potência, etc. A título de ilustração a Fig. 5 representa a relação tensão versus corrente esperada para um componente não linear, a qual, para os objetivos deste trabalho, poderia ser utilizada para a representação da região degradada de um determinado cabo. Vale observar que, tanto mais linear seria a relação entre as grandezas quanto menos degradado se apresentar o cabo. A tensão indicada seria aquela associado

com a de suprimento do cabo enquanto que a corrente seria indicativa de sua correspondente fuga.

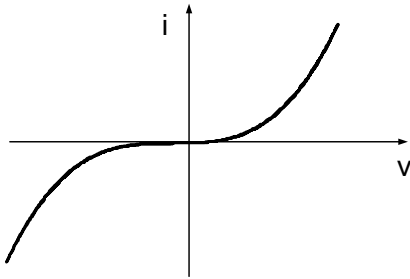


Fig.5 – Estratégia concebida para a modelagem das regiões degradadas dos cabos isolados – relação não linear.

Diante do exposto fica, pois evidenciado que a modelagem de um trecho de cabo, que se apresenta com regiões normais e deterioradas, pode ser idealizada através da combinação de circuitos equivalentes compostos por componentes lineares e não lineares. A Fig. 6 mostra a concepção física em pauta e permite constatar dois circuitos distintos e complementares, um destinado a representação das partes sãs (vários conjuntos RC em paralelo), e outra, composta pela combinação série de um arranjo resistivo não-linear e outro do trecho destinado a modelar as áreas sãs da região onde se localiza as arborescências. Naturalmente, os valores atribuídos a tais parâmetros ditará os níveis de degradação envolvidos para cada situação sob análise.

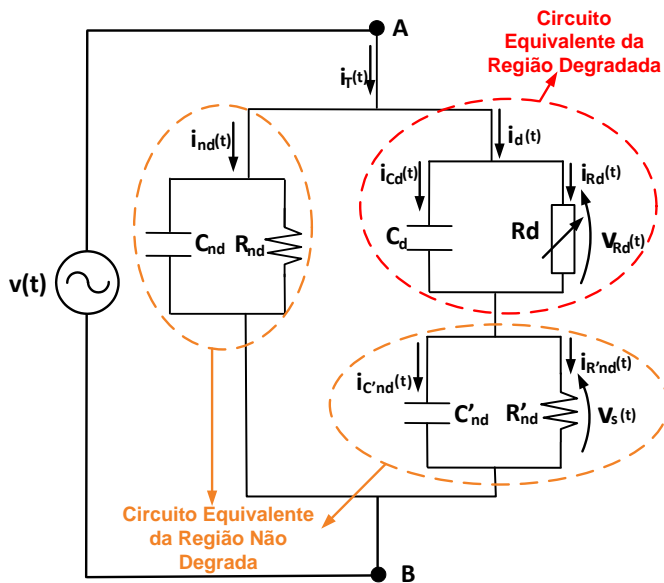


Fig.6 - Circuito equivalente para uma dada extensão de cabo compreendendo partes sãs e outras degradadas.

Na figura anterior:

- C_{nd} – Capacitância equivalente do trecho não degradado da extensão longitudinal do cabo;
- R_{nd} – Resistência equivalente do trecho não degradado da extensão do cabo;
- C_d - Capacitância Equivalente da extensão de cabo degradada

- R_d - Resistência não linear representativa da região danificada do trecho degradado do cabo;
- C'_{nd} - Capacitância equivalente à região não danificada da seção transversal do trecho degradado do cabo;
- R'_{nd} - Resistência equivalente à região não danificada da seção transversal do trecho degradado do cabo.

III. INDICADORES DE DESEMPENHO DO ESTADO DE DEGRADAÇÃO DE CABOS ISOLADOS

Cabos que apresentam níveis variados de degradação têm como particularidade das formas de onda de corrente uma terceira harmônica como efeito dominante, bem como um pequeno nível de corrente contínua [5]. Partindo-se destas premissas os trabalhos realizados no âmbito da presente pesquisa compreenderam o emprego de indicadores de estado tradicionalmente utilizados [14] e novos parâmetros de desempenho, fundamentados na já mencionada não-linearidade, foram inseridos. Os processos de análise empregados são resumidos na sequência.

A. Indicadores Convencionais

- Potência dissipada no dielétrico – A potência dissipada (P) é um indicador de estado que está diretamente associado o grau de perdas encontrado para o isolamento do cabo e pode ser empregado para a estimativa da densidade da deterioração [1];
- Fator de perdas dielétrica – O fator de perda dielétrica ($\text{tg}(\delta)$) que correlacionado os valores relativos das reatâncias capacitivas equivalentes do isolamento com os respectivos valores das resistências de fuga, portanto, reconhecendo-se que, com o aumento da degradação o efeito resistivo torna-se mais preponderante, haverá um impacto direto sobre este indicador.

B. Indicadores não Convencionais

- Distorção harmônica total da corrente de fuga (DHTI) – Este indicador apresenta valores crescentes à medida que o grau da deterioração aumenta [1];
- Componente harmônica individual da corrente de fuga (I_3) – A magnitude da componente de corrente harmônica de ordem 3 presente na corrente de fuga, em consonância com [5] tende a crescer a medida que a degradação aumenta. O comportamento deste indicador é similar ao do DHTI, todavia, o mesmo se apresenta como uma alternativa para contornar a dispersão que pode ocorrer na análise, visto que a componente em pauta se apresenta dominante;
- Ângulo de fase da componente de terceira harmônica (θ_3) – Trata-se de um indicador de estado que tende ao mesmo ângulo de fase da componente fundamental da corrente de fuga a medida que o grau de deterioração da camada isolante [1];
- Parâmetros equivalentes – tais indicadores expressam diretamente as grandezas equivalentes e representativas das

resistências e capacitâncias de fuga dos cabos. Por motivos óbvios, a redução, por exemplo, da resistência originalmente atribuída é um elemento que aponta para o estado de degradação do componente em pauta;

Indicador de linearidade da relação $V \times I$ – Trata-se de um indicador que relaciona os valores instantâneos das tensões aplicadas ao cabo e suas respectivas correntes de fuga, obtendo-se, deste modo, correlações que expressão uma maior ou menor linearidade da relação. Diante do exposto neste artigo esta estratégia se mostra promissora para os fins aqui delineados. À luz destes fatos, para os propósitos da caracterização de nível de não linearidade presente nas medições utiliza-se o denominado Coeficiente de Pearson tratado em [15]. Este indicativo compreende um campo de varredura entre -1 e 1 e quanto maior a linearidade da relação $V \times I$ mais próximo de 1 será tal coeficiente. Para maior clareza dos indicadores numéricos para esta estratégia será utilizada uma grandeza que expressa a divergência porcentual entre o valor encontrado em relação a referência unitária ($\Delta CP \%$).

IV. ESTUDOS DE CASOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os estudos aqui realizados e reportados compreendem uma síntese de um grande número de medições e análises conduzidas em campo e em ambiente laboratorial. Das distintas situações contempladas nos trabalhos optou-se pela apresentação de dois cabos representativos do assunto em pauta. Os dois casos estudados compreenderam medições em uma instalação real. Uma primeira avaliação foi conduzida para um trecho de cabo aqui denominado por amostra 1, representando um cabo com bitola de 400mm^2 , com extensão aproximada de 145 metros e classe de tensão de 8,7/15 KV, com isolamento XLPE. Quanto a amostra 2, esta representa um outro cabo, de 400mm^2 , com extensão de aproximadamente 60 metros e classe de tensão 8,7/15KV, com isolamento XLPE. Adicionado às diferenças mencionadas para os dois cabos ressalta-se ainda que os mesmos se apresentam com tempos de uso bastante distintos. A amostra 1 encontra-se instalada há menos de 6 meses, enquanto a amostra 2 está em uso a mais de 25 anos, na planta da concessionária local.

Utilizando de um equipamento apropriado aos registros das tensões e correntes, com um correspondente aplicativo computacional destinado às análises nos termos anteriormente descritos, conforme [12-13] as Figs. 07 e 08 representam as formas de onda de corrente de fuga e a tensão extraídas dos experimentos em campo.

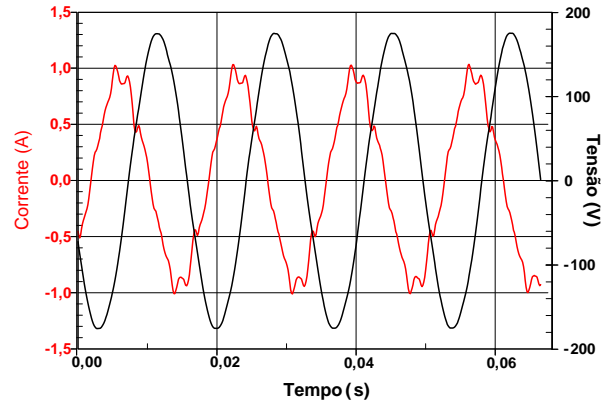


Fig. 7. Amostra de Cabo 1: Formas de onda da corrente de fuga e da tensão aplicada

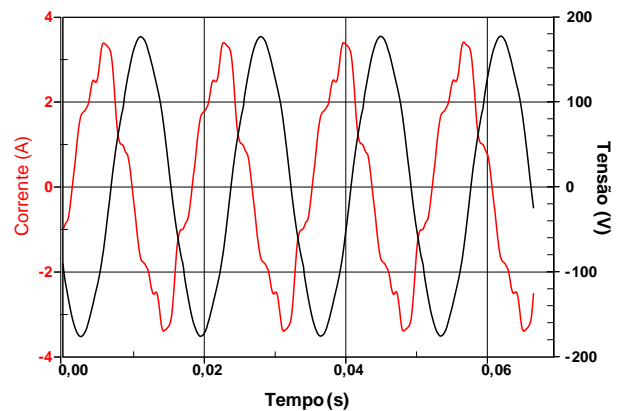


Fig. 8 - Amostra de Cabo 2: Formas de onda da corrente de fuga e tensão aplicada

A partir das grandezas registradas e em consonância com as metodologias apresentadas para a obtenção de indicadores de desempenho do estado de degradação de cabos isolados, procede-se, na sequência, aos cálculos correspondentes e destinados ao conhecimento das grandezas representativas das condições operacionais com que se encontram os cabos utilizados para a ilustração do processo de diagnóstico aqui focado. Como mencionado, utilizar-se-á de procedimentos clássicos, e outros, aqui propostos para os fins almejados.

As Fig. 9 e 10 apresentam as relações entre as tensões e correntes advindas das medições realizadas.

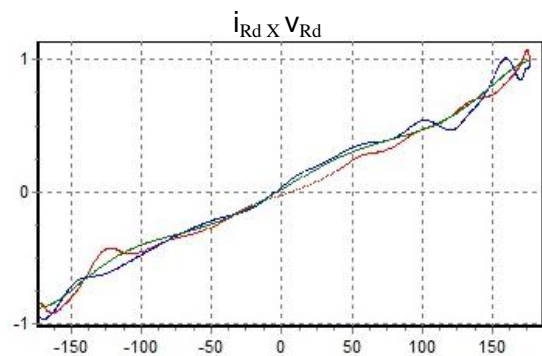


Fig. 09 – Relação Corrente x Tensão – Amostra 1.

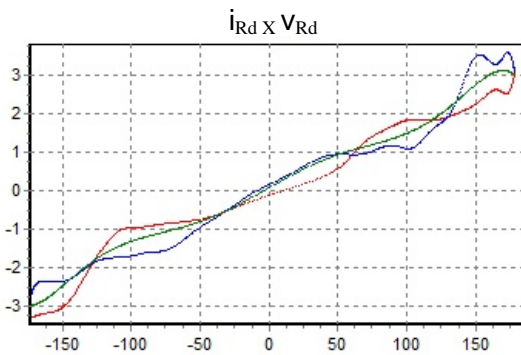


Fig. 10 – Relação Corrente x Tensão – Amostra 2.

Os registros feitos conduzem aos resultados para os indicadores de desempenho, nos termos anteriormente descritos. A Tabela I sintetiza os principais valores encontrados.

TABELA I
SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Indicadores de desempenhos	Amostra 1	Amostra 2
P (w)	1.740,03	6.504,38
tan δ	0,35	0,42
THDI (%)	9,58	15,99
I3(%)	0,0287	0,2362
θ_3 (°)	46,62	7,02
Δ CP %	1	5

Não obstante o fato que os valores constantes da tabela anterior expressem os resultados obtidos para as distintas grandezas empregadas para os estudos de diagnóstico das condições operativas com que se encontram as amostras de cabos testados, verifica-se que todos os indicadores da amostra 2 apresentam valores que evidenciam uma maior degradação do cabo se comparado com a amostra 1. O indicador apresentado como Coeficiente de Pearson da amostra 2, apresenta 4% de variação se comparado a amostra 1, representando que o indicador de não linearidade se mostra consistente com a teoria. Há de se reconhecer, para o presente momento, a inexistência de um banco de dados que possa ser utilizando como referência comparativa e que venha a permitir uma avaliação crítica e conclusiva sobre o tema.

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho foi dedicado à avaliação de desempenho dos procedimentos atualmente estabelecidos para o diagnóstico das condições operacionais com que se encontram os cabos isolados, assim como, contribuir para o processo de análise através da proposição de um procedimento alternativo fundamentado na relação entre as tensões aplicadas e as respectivas correntes de fuga. Empregando-se um registrador para as medições em campo, o qual foi desenvolvido pelos autores, foram realizados diversos testes em distintas amostras de cabos comerciais. Os resultados selecionados para apresentação e discussões neste trabalho correspondem a duas investigações conduzidas em campo em uma instalação da concessionária de distribuição local. Os

indicativos obtidos mostraram que a proposta feita é consistente com os propósitos definidos, e ainda, que o software de análise se apresenta com indicadores de desempenho que, à princípio, revelam a situação física com que se encontram as os cabos testados. Por fim, vale ressaltar que muito embora os resultados atingidos sejam encorajadores, os autores reconhecem que trabalhos adicionais devam ainda ser conduzidos até a consolidação da metodologia destinada a estimação do estado dos isolamentos dos cabos.

appendixes, if needed, appear before the acknowledgment.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos a CNPq pela bolsa de doutorado no programa de Pós-Graduação da FEELT-UFU, a CEMIG através de seu programa de P&D pelo projeto de pesquisa e desenvolvimento D368 e outros apoios financeiros que viabilizaram a pesquisa.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] A. T. Bulinski, E. So, S. S. Bamji, "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, 2000.
- [2] T. Furuhashi, K. Tohyama, T. Imai, Y. Murata, "Dissipation Current Waveform of Water Tree Deteriorated Low Density Polyethylene Sheet". Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on, Oct. 15-18, pp 529-532, 2006.
- [3] A. Nakajima, N. Kashiwagi, T. Murata, S. Takashi, O. Fukuda, S. Kital, K. Tokumaru, and K. Hirotau "Development of a hot-line diagnostic method for XLPE cables and the measurement results," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, No. 2, April, pp. 857-862, 1989.
- [4] S. Yamaguchi, S. Soda, N. Takada, "Development of a New Type Insulation Diagnostic Method for Hot-Line XLPE Cables", IEEE Transactions on Power Delivery, July, vol. 4 no. 3, pp. 1513-1520, 1989.
- [5] T. Tsujimoto, M. Nakade, Y. Yagi, K. Adachi, H. Tanaka, Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa, Yawata-kaigandori, Ichihara, Chiba, Higashi-shinagawa, Shinagawa-ku, "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, Nagoya, pp 73-76, 2003.
- [6] T. Hashizume, C. Shinoda, T. Tani, and T. Taniguti, "A consideration on Life of XLPE cable by dry-curing process", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, pp. 27-34, 1989.
- [7] Wei. Zhang, Yutao Zhou, Baitun Yang, Yaonan Liu, "A Study on DC Component Method for Hot-Line XLPE Cable Diagnosis," IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh – PA USA, June 5-8, pp 95-98, 1994.
- [8] T. Ozaki, N. Ito, I. Sengoku, J. Kawai, and S. Nakamura, "Changes of capacitance and dielectric dissipation factor of water-treed XLPE with voltage," Electrical Insulating Material, 2001. (ISEIM 2001). Proceedings of 2001 International Symposium ,Himeje, Japan, pp. 459-462, 2001.
- [9] Wei. Zhang, Yutao Zhou, Baitun Yang, Yaonan Liu, "A Study on DC Component Method of On-Line Diagnosis for XLPE Cables," Proceedings of the 4th International Conference on

- Properties and Applications Dielectrics Materials, July 3-8, Brisbane Australia, vol.1 pp 375-378, 1994.
- [10] F. N. Lima, "A contribution to the insulated cable operational performance estimation due to water tree phenomenon", PhD. Thesis – Federal University of Uberlandia – Brazil, september 2008 – *in portuguese*.
- [11] F. N. Lima, J. C. Oliveira, D. A. Andrade, et. all, "Modeling Water Tree Phenomenon for Insulated Cable Loss Current Estimation", In: IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp. 1-6, 2008.
- [12] L. N. Velasco, J. C. Oliveira, L. C. G. Freitas, A. Andrade, F.N. Lima, A.P. Finazzi "A strategy towards the degradation estimation of insulated cables through performance indicator measurements" in Proc. of IX Induscon – 9th IEEE/IAS International Conference on Industry, November 2010
- [13] L. N. Velasco, T.V. Silva, J. C. Oliveira, L. C. G. Freitas, F. P. Santilio, F.N. Lima, A.P. Finazzi, H. C. Martins, W. J. Araujo, J. M. Borges, "An Approach to Improve Power Supply Continuity throughout the Estimation of Insulated Power Cable Life Expectance Indexes" in Proc. of XI COBEP- Brazilian Conference on Power Electronics, September 2011
- [14] Y. Yukihiro., T. Hideo and K. Hitoshi. "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, 1998.
- [15] S. A. Lira, "Correlation Analysis: Theoretical Approach and Construction of Coefficients with Applications", Ms.C. Dissertation, Federal University of Parana, Curitiba, 2004.