



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GLT/32
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

AVALIAÇÃO DE PERDAS CORONA EM ISOLADORES E CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

**Reinaldo C. Leite (*)
Ricardo da C. Bezerra (*)
ELETRONORTE**

RESUMO

As perdas corona ocorrem quando o gradiente de tensão na vizinhança da superfície dos condutores ou isoladores de um linha de transmissão excede a tensão de ruptura do ar, gerando calor, luz, ruído audível e radiointerferência. Estes efeitos são manifestações de liberação de energia que deve ser suprida pelas plantas geração de energia. Neste trabalho procura-se através de simulação numérica usando o método dos elementos finitos e as metodologias de cálculo de perdas corona disponíveis na literatura, estimar as perdas corona existentes em uma linha de transmissão piloto da Eletrobrás Eletronorte.

PALAVRAS-CHAVE

Perdas corona, linha de transmissão, simulação numérica.

1.0 - INTRODUÇÃO (3)

A edição da Medida Provisória MP nº 579/2012 e do Decreto nº 7805/2012 irá impactar diretamente no negócio de Transmissão da Eletrobrás Eletronorte, uma vez que 90% dos seus ativos poderão ter sua concessão prorrogada. Sob este novo cenário, surge um grande desafio para a empresa, pois a renovação das concessões sob a égide destas novas regulamentações acarretará na redução de receita. Cria-se então a necessidade nas concessionárias de energia elétrica de desenvolver e buscar novas tecnologias para redução de perdas, de maneira a aumentar a eficiência do transporte de energia elétrica buscando a redução dos custos atuais para se compatibilizarem com a nova realidade de redução de receitas.

As perdas corona ocorrem quando o gradiente de tensão na vizinhança da superfície dos condutores ou isoladores de um linha de transmissão excede a tensão de ruptura do ar, gerando calor, luz, ruído audível e radiointerferência (1). Estes efeitos são manifestações de liberação de energia que deve ser suprida pelas plantas geração de energia. Neste trabalho procura-se através de simulação numérica usando o método dos elementos finitos e as metodologias de cálculo de perdas corona disponíveis na literatura, estimar as perdas corona existentes em uma linha de transmissão piloto da Eletrobrás Eletronorte. Serão feitas estimativas de perdas corona a partir de

(*) Centro de Tecnologia da Eletrobrás Eletronorte – LACEN rodovia Artur Bernardes s/n Telegrafo sem Fio CEP 66115-000 Belem PA - Brasil – Brasil
Tel: (+55 91) 3257-1966 – Fax: (+55 91) 3257-4376 – Email: jacques@eln.gov.br

valores medidos obtidos de medição corona executada com câmera de ultra-violeta (Daycor) realizada em inspeções de linhas feita pela grupo de linhas de transmissão do processo de ensaios com alta tensão do Centro de Tecnologia da Eletrobras Eletronorte.

Na parte de simulação numérica serão simulados isoladores poliméricos e condutores das linhas através do método dos elementos finitos para obtenção das distribuições de campo elétrico em condições de tempo seco e úmido, bem como serão simuladas situações de defeitos nos isoladores e condutores e presença de poluição salina e industrial nos isoladores. A partir dos dados obtidos na simulação, pretende-se através dos métodos encontrados na literatura estimar as perdas corona em isoladores e condutores tanto em condições de bom tempo como em condições de mau tempo.

Atualmente a equipe de linhas de transmissão do Laboratório de Alta Tensão da Eletrobras Eletronorte vem utilizando uma câmera de duplo espectro para detecção de efeito corona durante o dia. Um filtro permite a passagem de ondas eletromagnéticas entre 240 e 280nm e bloqueia completamente comprimentos de onda maiores. O sistema eletrônico combina as duas imagens e mostrando a localização e uma análise quantitativa da intensidade do efeito corona.

Em uma segunda parte do trabalho, serão utilizados os resultados encontrados durante inspeção instrumental e visual em linhas de transmissão e subestações para estimar as perdas corona em isoladores. Pretende-se assim ter-se uma ideia de valor para as perdas corona por unidade de comprimento da linha (km) e desta forma ter-se uma estimativa atual das perdas por efeito corona nas linhas que compõe o sistema de transmissão da Eletrobras Eletronorte.

2.0 - ESTIMAÇÃO DAS PERDAS CORONA VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.(4)

2.1. Método dos Elementos Finitos (MEF)

O MEF teve seu desenvolvimento iniciado nos anos 50 e tinha por objetivo resolver problemas de natureza mecânica, tais como: análise tensorial em estruturas, difusão de calor, escoamento de fluídos etc. Na década de 1970 Silvester e Chari incluíram na sua formulação a solução de problemas não lineares e propuseram sua aplicação para solução de problemas de natureza eletromagnética [2,3]. Este método propõe a divisão do domínio de análise em pequenas sub-regiões denominadas “elementos finitos” que podem ser de diversos tamanhos e formas. Esta particularidade propicia uma grande maneabilidade ao método, pois em regiões como cantos, p.ex., onde é sabido existir grande concentração de linhas de campo, pode-se aumentar a densidade de elementos, e em regiões de pouco interesse, podem-se usar menos elementos. Esta flexibilidade permite uma otimização entre a precisão e a agilidade computacional. Cada elemento só pode conter um tipo de meio o que torna obrigatoriamente a fronteira entre dois meios a fronteira entre dois elementos [2]. Define-se nó como o encontro de duas arestas e elemento a área contida nos diferentes triângulos, conforme pode ser visto na figura 1. Ao conjunto de elementos, dá-se o nome de malha.

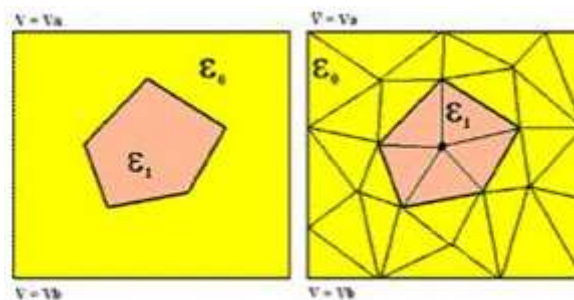


Figura 1. Exemplo da divisão de um domínio de análise com meios dielétricos diferentes em elementos finitos.

Para um elemento triangular, pode-se considerar que o potencial V varia linearmente no seu interior conforme a expressão mostrada na Equação 1.

$$V(x, y) = a + bx + cy \quad (1)$$

A Figura 2 mostra um elemento genérico de malha formado pelos nós i,j,k. A partir deste elemento pode-se, usando a Equação 1, montar um sistema de equações lineares como o mostrado nas Equações

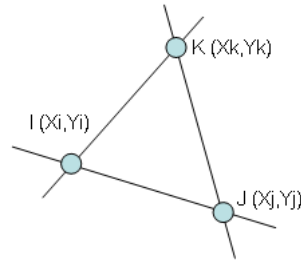


Figura 2. Elemento genérico de malha com os nós i,j,k.

$$\begin{aligned} V_i &= a + bx_i + cy_i \\ V_j &= a + bx_j + cy_j \\ V_k &= a + bx_k + cy_k \end{aligned} \quad (2)$$

A solução do sistema de equações (2) permite que se determinem os coeficientes a, b e c em função das coordenadas dos pontos i, j, k. De posse dos valores dos coeficientes pode-se determinar o valor do potencial e a partir deste o valor do campo elétrico conforme a equação (3).

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3)$$

A solução da equação (3) permitirá conhecer a distribuição do campo elétrico ao longo do isolador em situação normal, sem defeito e como esta mesma distribuição se comporta no caso da ocorrência de defeitos no isolador.

2.3 Modelagem do problema

Um isolador polimérico é composto por: encaixes metálicos, revestimento polimérico com as aletas e bastão de fibra de vidro, conforme está exemplificado na Figura 3 [4]. Esta composição se deve à necessidade de atender aos requisitos mecânicos e elétricos envolvidos na separação entre os condutores da linha de transmissão e a estrutura aterrada da torre. O bastão de fibra de vidro provê resistência mecânica ao conjunto e o revestimento polimérico, por possuir maior permissividade dielétrica, provê o isolamento elétrico do sistema. Portanto um isolador polimérico, devido a sua constituição, pode ser tratado como um domínio de estudo no qual existem três meios dielétricos com diferentes permissividades, a saber: Ar, Revestimento polimérico, que no caso estudado é de borracha de silicone [6], e fibra de vidro. O campo elétrico ao qual o isolador está submetido é numericamente igual ao gradiente de tensão aplicado a ele, conforme a Equação 3 [2,5].

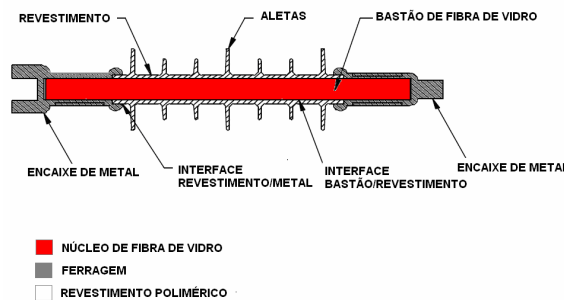


Figura 3. Componentes de um isolador polimérico.

Considerando potenciais impostos nas ferragens do isolador (encaixes de metal) e carga nula no interior do isolador ($\rho=0$).

como:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (4)$$

e $\rho = 0$, então substituindo (3) em (4)

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= 0 & \nabla \cdot (-\nabla V) &= 0 \\ \text{mas } \vec{D} &= \epsilon \vec{E} & -\epsilon \nabla \cdot \nabla V &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

A Equação 5 é a equação de Laplace, que expandida para o problema em duas dimensões, devido a simetria axial do isolador, assume a forma Equação 6.

$$\epsilon \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \epsilon \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

No problema em questão a fonte do campo elétrico será a diferença de potencial imposta nas fronteiras do domínio (ferragens do isolador no lado da fase e do terra). A equação 6 será resolvida pelo MEF para obter a distribuição de potencial ao longo do isolador e a partir desta usado a Equação 3, obter a distribuição de campo elétrico [6].

2.4 Estimação das perdas corona em isoladores e cabos usando métodos numéricos(6).

As descargas corona surgem na superfície dos componentes de uma linha de transmissão quando a intensidade do campo elétrico na superfície deste ultrapassa a rigidez dielétrica do ar [1,7]. Nesta situação o campo elétrico é capaz de acelerar elétrons livres, originados por processos tais como: foto ionização, raios cósmicos, raios X, ionização térmica entre outros [8], que se chocam com outros elétrons presos em outros átomos, dando origem a novos íons, dando origem a uma avalanche que forma a descarga corona. O valor de campo elétrico a partir do qual se dá o início das descargas corona pode ser determinado pela fórmula de Miller, Eq (7) [1,7,8].

$$E_{crv} = 18,11 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{\delta \cdot r_{eq}}} \right) \quad (7)$$

Onde

E_{crv} - Gradiente (campo) crítico visual;

r_{eq} - Diâmetro equivalente do feixe de condutores;

δ - pressão atmosférica relativa dada pela Equação (8).

$$\delta = \frac{0,386(760 - 0,08h)}{273 + t} \quad (8)$$

h - altura em relação ao nível do mar;

t - temperatura média anual.

A energia dissipada nestas descargas provem do campo elétrico da linha, que por sua vez é suprido pelo sistema de geração do qual a linha faz parte, originando então as perdas por efeito corona [7]. Qualquer irregularidade na superfície de um isolador ou condutor produz um aumento no gradiente de potencial (campo elétrico), que facilitará a formação de descargas corona. Gotas de água, poluentes na superfície de isoladores e condutores ou deformações dos condutores são exemplos de irregularidades na superfície do condutor. As perdas por efeito corona são provocadas pela necessidade de energia para sustentação da avalanche de elétrons que origina o efeito luminosa deste tipo de descarga. Esta perda pode ser calculada para tempo bom através da Equação (9) [1,7].

$$P = \frac{0,00002094 f \cdot U^2 \cdot \Phi}{\log\left(\frac{D_m}{r}\right)} \quad [kW / km] \quad (9)$$

f - frequência do sistema (hz);

U - tensão eficaz do entre fase - neutro do sistema (kV);

r - raio externo do condutor (cm);

Dm - distância média geométrica entre as fases;

ϕ - fator experimental que depende da relação E/E_{crv}.

O objetivo desta seção é demonstrar uma forma de estimar as perdas corona em condutores de linhas de transmissão e isoladores partindo dos resultados de simulação numérica a partir do MEF explicado na seção anterior e das equações mostradas anteriormente. A partir dos modelos descritos na Seção 2.3, calcula-se o campo elétrico na superfície do condutor e aplicando o resultado às fórmulas (8 - 9). A figura 4 mostra a distribuição de campo elétrico em um feixe de condutores de uma linha de transmissão de 500 kV localizada em uma região de altura 4m acima do nível do mar.

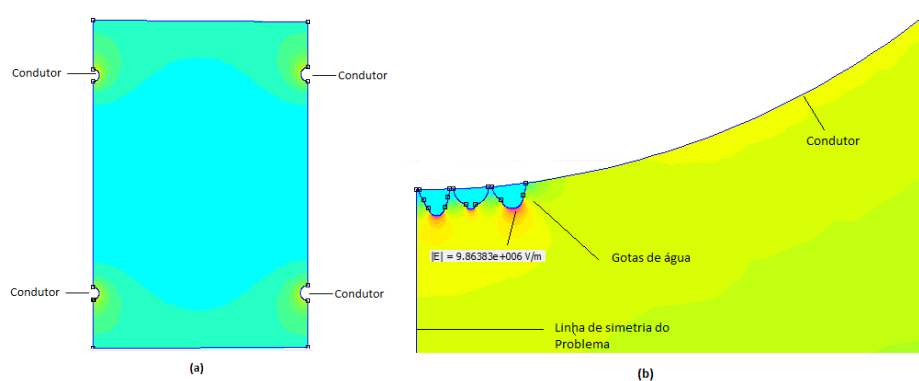


Figura 4 - (a) Distribuição de campo elétrico em um feixe de condutores de um LT de 500 kV. (b) Detalhe do distribuição de campo elétrico em gotas de água formadas na superfície do condutor .

Nesta figura observa-se que a distribuição de campo no interior do feixe é praticamente uniforme, porém no detalhe mostrado na figura 4b pode-se ver que a formação de gotículas de água sob o condutor provoca um aumento considerável do valor do campo elétrico. Ao calcular-se pela Eq. 7 o valor de E_{crv} chega-se a um valor de 22,37 kV/cm comparando com o valor calculado pelo MEF verifica-se que o campo provocado pela gota de chuva ($E = 98,64 \text{ kV/cm}$) é superior ao campo crítico de corona visual, logo, nestas condições, ocorrerá o efeito corona. Uma vez calculado o valor do campo elétrico na região onde ocorre o corona, parte-se para o cálculo das perdas usando a Equação (9) o que leva para esta situação a um valor de $P = 6,871 \text{ kW/km}$. Esta perda deve-se somente ao ponto em questão, pois na Figura 4 existem outras gotas que também apresentam campo elétrico elevado ocasionando mais perdas.

O mesmo processo de cálculo pode ser usado em isoladores. Na Figura 5 tem-se um isolador polimérico de uma linha de transmissão de 138 kV localizada no Estado do Amapá. Nesta figura observa-se que o ponto de maior estresse de campo elétrico é na região da interface ar-ferragem-polímero. O campo calculado pelo MEF é da ordem de 48,1 kV/cm, valor acima do valor crítico para descargas, que neste caso pode ser considerado 30 kV/cm possibilitando então a formação de efeito corona. Neste caso o corona também é indesejável pois além das perdas este efeito contribui para o desgaste do isolador, pois um dos subprodutos do efeito corona é o ozônio que propicia a formação de ácido nítrico que por sua vez ataca o revestimento do isolador. A literatura técnica não relata fórmulas para cálculo das perdas corona em isoladores, o que inviabiliza o cálculo destas via esta abordagem. As perdas em isoladores podem ser estimadas através de outra técnica, a saber, através da inspeção de linhas com câmera de duplo espectro, também conhecida como inspeção corona.

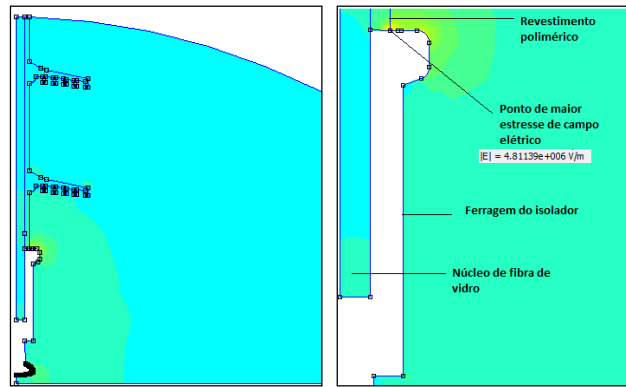


Figura 5 - Distribuição de campo elétrico em um isolador polimérico

3.0 – ESTIMAÇÃO DE PERDAS CORONA VIA INSPEÇÃO COM CÂMERA DE ULTRAVIOLETA

Inspeções com instrumentos, sejam aéreas ou terrestres, são feitas em locais específicos tais como em áreas sujeitas a poluição marinha ou industrial ou mesmo em linhas de transmissão com histórico de desligamentos não programados. As câmeras de ultravioleta vem sendo cada vez mais adotadas para realização de tais inspeções por um número crescente de empresas de energia elétrica. Câmeras de ultravioleta (UV) são equipamentos capazes de detectar atividade corona ou descargas superficiais que emitam radiação luminosa transformando esta atividade em imagens [8]. A atividade corona em equipamentos elétrica irradia energia na forma de luz principalmente na banda ultravioleta do espectro eletromagnético 300-400 nm [9]. A câmera corona explora as ondas ultravioleta na faixa de 240 nm a 280 nm. A energia liberada por um fóton pode ser calculada a partir da Equação (10).

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (10)$$

$h = 6,6252 \times 10^{-34}$ Js - Constante de Planck;

$c = 3 \times 10^8$ m/s - velocidade da luz;

λ - comprimento de onda (nm).

Portanto, as perdas por corona podem ser estimadas a partir da Equação (10). A partir dela pode-se determinar a energia de um fóton com comprimento de onda na faixa da qual está sendo medida a atividade corona (240 nm a 280 nm). Assim considerando um fóton com comprimento de onda 280 nm, tem-se:

$$E = \frac{6,6252 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{280 \times 10^{-9}} = 7,09 \times 10^{-34} \text{ J}$$

como $1 \text{ J} = 1 \text{ W.s} = 2,7833 \times 10^{-4} \text{ W h}$, um fóton terá uma energia de $1,973 \times 10^{-37} \text{ W h}$. Considerando um resultado de inspeção corona em isoladores como o obtido na fase B da torre 741 da LT7 TCVC C1 de 4200 fótons/min, tem-se em um dia 6.048.000 fótons, o que dará um consumo de $1,193 \times 10^{-30} \text{ Wh}$ por dia por isolador. O que é um valor muito baixo se comparado com as perdas por efeito joule, mesmo considerando um grande número de isoladores.

4.0 - CONCLUSÃO

No artigo foi demonstrada uma técnica para estimação de perdas corona em condutores a partir de simulações numéricas e uso de fórmulas consagradas na literatura técnica. Verificou-se que a técnica atende e pode ser muito útil para estudos de novas linhas de transmissão, pois permite modelar diversos arranjos de linhas, inclusive com a inserção de defeitos tais como: tento rompido, "ninho de pássaro", sujeira no condutor, água, etc.

Viu-se também que é possível estimar a energia consumida por defeitos corona em isoladores a partir do resultado da inspeção corona, dado pelo número de fótons por minuto captado pela câmera e a energia de um fóton calculada a partir da equação (10). Os valores de energia dissipada pelo efeito corona em isoladores é insignificante quando comparado às perdas por efeito Joule, proporcionais ao quadrado corrente conduzida pela linha de transmissão.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EPRI - Electric Power Research Institute, "Transmission Line Reference Book - 345 kV and Above", 2nd Edition, 1982.
- (2) J.P.A.Bastos, Eletromagnetismo e Cálculo de Campos, Florianópolis: Editora da UFSC, 1996, pp. 82, 231.
- (3) P.P.Silvester, M.V.K.Chari, "Finite element solution of saturable magnetic field problems," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 7, pp. 1642-1651, Sep. 1970.
- (4) R. C. Bezerra, J. A. Tostes, J. M. T. Teixeira Jr., R. C. Leite, "Estudo para aumento da confiabilidade de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão da Eletronorte," apresentado no III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém, Brasil, 2010.
- (5) M.S.Naidu, V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, McGraw - Hill, 1996, pp. 1-11, 64-90.
- (6) P.P.Silvester, M.V.K.Chari, "Finite element solution of saturable magnetic field problems," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 7, pp. 1642-1651, Sep. 1970.
- (7) Fuchs R. D., "Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas", Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, Rio de Janeiro, 1979.
- (8) Góis N., Wesley R., "Critério de avaliação de isoladores em serviço", CIGRÉ – Brasil, GTB2.03 – Isoladores, 2008.
- (9) Stoper R.; Hart J.; "The design and evaluation of a multi-spectral imaging camera for the inspection of transmission lines and substation equipment", INMR