

Determinação da Capacitância de uma LT utilizando o Método de Elementos Finitos

C. R. Gomes, L. A. Gomes Jr, UFPA, S. M. Côrrea, UFPA e P. Vieira Jr, UFPA

Resumo – O método tradicional para o cálculo da capacitância de linhas de transmissão (LTs) não leva em consideração o efeito da torre. Tais descon siderações podem resultar em valores de capacitância diferente dos reais e causar problemas de condições de isolamento como sobretensão ao se energizar a linha pela primeira vez. Este artigo apresenta um método para a determinação da capacitância de modo a obter valores mais confiáveis. Este artigo é dividido em duas partes. A primeira desenvolve um modelo matemático para determinação da capacitância utilizando o método tradicional. Na segunda parte é feita a simulação através do Método de Elementos Finitos (MEF). Os cálculos teóricos da capacitância são para um trecho de uma LT pertencente ao sistema de transmissão das Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE. Para validar os resultados da simulação foi realizado ensaio de tensão aplicada em um isolador.

Palavras-chave — Capacitância, Condições de Isolamento, Método de elementos finitos, Linhas de transmissão, Isolador.

I. INTRODUÇÃO

A capacitância de uma LT obtida pelo método tradicional considera como fatores relevantes a disposição dos condutores e a geometria das torres. Esta abordagem não considera o efeito do solo, da torre e da cadeia de isoladores; fatores estes que contribui, consideravelmente, na alteração do valor da capacitância [1]. Desta forma a determinação da capacitância torna-se imprecisa. Um valor preciso da capacitância permite obter, teoricamente, resultados de rendimento e condições de operações uma de forma mais precisa.

O presente artigo introduz uma metodologia usando a técnica de elementos finitos [2] [3] como subsídio para a determinação da capacitância e conseqüente condição de isolamento de uma LT e a distribuição de potencial elétrico em isoladores e ao longo de cadeia de isoladores, permitindo assim obter valores mais precisos da capacitância. Esta capacitância determinada numericamente é comprovada, experimentalmente, através de ensaios de tensão aplicada em isolador e dados obtidos de empresas de transmissão de energia elétrica.

II. DETERMINAÇÃO TEÓRICA DA CAPACITÂNCIA

Para a determinação da capacitância pelo modelo tradicional escolheu-se um trecho de LT típico. O trecho escolhido foi o trecho denominado Guamá – Utinga, pertencente ao sistema de transmissão das Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE.

Neste trecho escolhido foram encontradas 50 torres, com distância média de 374,36 m, sendo que a torre mais comum e a do tipo SOD. O percurso total deste trecho é 19.049,68 m o qual não possui linhas transpostas.

Este trecho de LT é uma linha trifásica a circuito duplo, esta linha é composta de dois circuitos que operam em paralelo suportados na mesma estrutura, além disso, possui

cabos pára-raios e ambos os circuitos em paralelo são idênticos, de tal maneira que cada um transporta metade da potência total (cada condutor transporta metade da corrente de cada fase). Com isso, tem-se, através do método tradicional [2], as seguintes equações para o cálculo da capacitância:

$$C_{seq} = \frac{0,04824 \times 10^{-6}}{\log \frac{D_m \times D_{II}}{r \times D_I}} \quad F/km \text{ (por fase)} \quad (1)$$

$$C_{seq} = C_{sI} + C_{sII} \quad F/km \text{ (por fase)} \quad (2)$$

Sendo D_I , distância média geométrica entre condutores que conduzem as correntes de mesma fase, D_{II} distância média geométrica entre condutores que conduzem correntes de fases diferentes, D_m distância média geométrica entre os condutores e r o raio externo ou o raio R_c do condutor múltiplo.

Portanto, para o trecho em estudo a capacitância calculada foi de 83,09 nF.

III. OBTENÇÃO DA CAPACITÂNCIA ATRAVÉS DE MÉTODOS DE ELEMENTO FINITOS

Neste trabalho foi utilizado o método matricial de Gallerkin que se baseia no método variacional de Ritz.

A equação de interesse neste trabalho tem a seguinte forma:

$$\nabla^2 \Phi = f \quad (3)$$

Na equação (3) Φ é o potencial desconhecido e f é a função de excitação.

Utilizando a formulação variacional de RITZ para resolver a equação (3) equivale a encontrar Φ tal que seja mínimo o seguinte funcional:

$$F(\Phi) = \frac{1}{2} \langle \Delta \Phi, \Phi \rangle - \frac{1}{2} \langle \Phi, f \rangle + \frac{1}{2} \langle f, \Phi \rangle \quad (4)$$

Na equação acima $\langle u, v \rangle = \int uv^* dS$ é o produto interno.

Para minimizar o funcional, da equação (4), faz-se uso de métodos variacionais [4].

A formulação de Ritz é aplicada a uma solução analítica (exata) de Φ para uma certa suposição de sua forma funcional (polinômios, soma de co-senos, etc).

A discretização do domínio é essencial para a realização do método dos elementos finitos. Esta discretização do domínio em elementos corresponde à passagem do meio contínuo para sua representação discreta. Isto resulta na divisão do domínio em um conjunto de subdomínio, respeitando as fronteiras e as interfaces do domínio inicial.

O domínio Ω em estudo é dividido em subdomínios Ω_e interconectados em pontos denominados nós, cujas dimensões são finitas, porém muito pequenas quando comparadas a Ω . Neste trabalho foram usados elementos triangulares que permitem a utilização de funções interpoladoras simples, como polinômios lineares, na aproximação da solução. Esses polinômios são definidos para cada elemento e considerados nulos fora dele.

A figura 1 mostra um elemento triangular e , de nós 1, 2 e 3, pertencente à malha de discretização da região onde o valor do potencial é procurado.

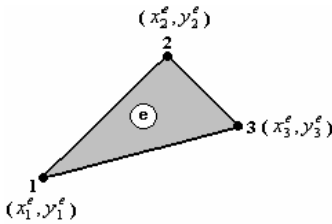


Figura 1. Elemento triangular e cujos nós são 1, 2 e 3.

O valor do potencial Φ sobre a região elementar e pode ser estimado como:

$$\Phi^e(x, y) = \sum_{j=1}^3 N_j^e(x, y) \Phi_j^e \quad (5)$$

sendo $N_j^e(x, y)$ é uma função base.

Assumido uma variação linear de Φ sobre a região, obtém-se:

$$\Phi^e(x, y) = a^e + b^e x + c^e y \quad (6)$$

O valor da função base é:

$$N_j^e(x, y) = \frac{1}{2\mathcal{A}^e} (a_j^e + b_j^e x + c_j^e y); \quad j = 1, 2, 3 \quad (7)$$

sendo:

$$\begin{aligned} a_1^e &= x_2^e y_3^e - y_2^e x_3^e & b_1^e &= y_2^e - y_3^e & c_1^e &= x_3^e - x_2^e \\ a_2^e &= x_3^e y_1^e - y_3^e x_1^e & b_2^e &= y_3^e - y_1^e & c_2^e &= x_1^e - x_3^e \\ a_3^e &= x_1^e y_2^e - y_1^e x_2^e & b_3^e &= y_1^e - y_2^e & c_3^e &= x_2^e - x_1^e \end{aligned} \quad (8)$$

e \mathcal{A}^e é a área do triângulo e .

A equação (3) pode ser escrita na forma matricial em cada elemento:

$$\Phi_e = N^t U \quad (9)$$

Nesta equação tem-se que:

$$N^t = (N_1, N_2, N_3) \quad (10)$$

$$U^t = (\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3) \quad (11)$$

Portanto, a equação matricial global é dada por:

$$[G][\Phi] = [S] \quad (12)$$

Esta matriz é simétrica, esparsa, bandada e com a diagonal dominante. Sua dimensão é igual ao número de nós do domínio discretizado. O vetor $[\Phi]$ é construído com

os valores procurados $\Phi(x, y)$, um em cada nó. O vetor $[S]$ traz as informações sobre as fontes.

A malha triangular para o isolador é exibida na figura 2, a malha é suficientemente grande nas fronteiras para minimizar erros de reflexão. A malha apresentada possui 4436 nós e 8812 elementos. Observa-se que a malha é mais densa perto das descontinuidades, com o objetivo de melhorar a aproximação. Esta malha foi obtida usando-se o programa AUTOCAD, este programa permite o desenho dos contornos da região de interesse de maneira precisa e, também, a geração automática da malha, esta pode ser composta de elementos triangulares ou quadriláteros.

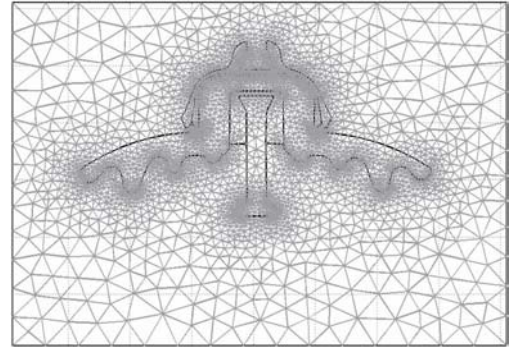


Figura 2 – Malha triangular para o isolador poluído.

Após a geração da malha, as coordenadas de cada nó e elemento, as propriedades de cada material e as condições de contorno são armazenados em um arquivo. Os dados deste arquivo são lidos por um programa desenvolvido em MATLAB responsável pelo pós-processamento dos dados. A distribuição do potencial elétrico é mostrado na figura 3.

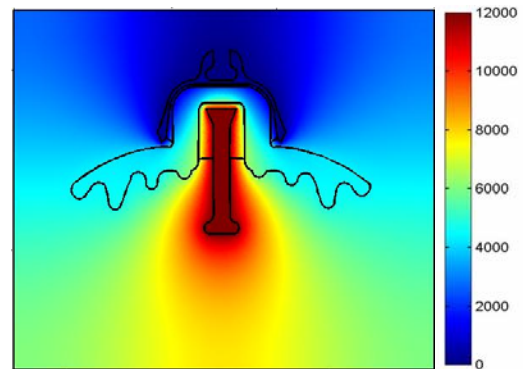


Figura 3 - Distribuição do potencial elétrico no isolador.

O valor da capacitância para um isolador obtido pela simulação é 52,6 pF, segundo (13), de acordo com [5].

$$C = \frac{2W_e}{V^2} \quad (13)$$

Sendo W_e a energia elétrica, V a tensão aplicada.

Os valores do potencial elétrico estão apresentados nas figuras 4 e 5.

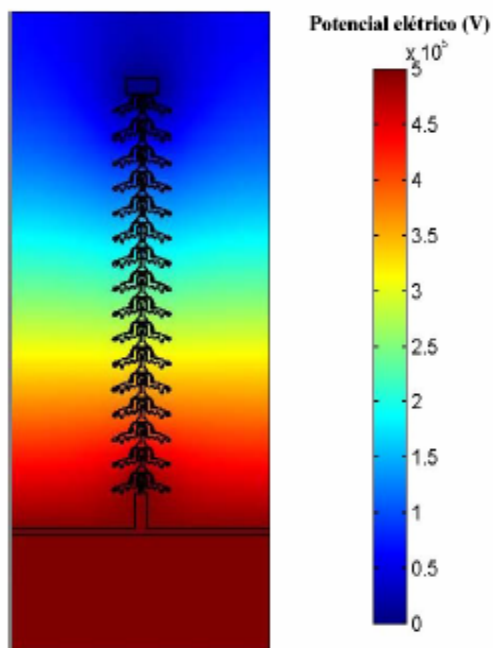


Figura 4. Distribuição do potencial elétrico na cadeia de isoladores.

O valor calculado da capacitância para a cadeia de isoladores foi 11,6 pF.

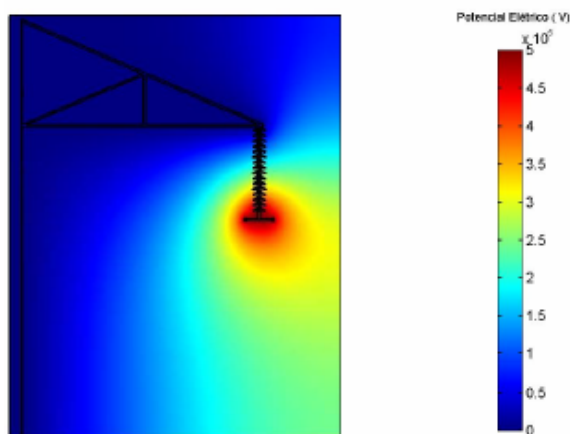


Figura 5. Distribuição do potencial elétrico em uma cadeia de isoladores próxima à torre da linha de transmissão.

O valor obtido da capacitância da cadeia de isoladores devido a presença da torre foi de 28,6 pF.

IV. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CAPACITÂNCIA

4.1. Descrição do ensaio

As medidas foram feitas com um medidor de fator de potência e capacitância Double 85 Walnut Street Type M2H. Este equipamento utiliza o método da tensão aplicada para determinar a capacitância da amostra em estudo, um isolador de suspensão.

O medidor determina a capacitância através do equilíbrio de uma ponte de capacitâncias embutida no mesmo. A confiabilidade das medidas feita com este equipamento é assegurada pela calibragem periódica a que o mesmo é submetido nos laboratórios da ELETRONORTE em Belém

– PA.

Para aplicar a alta tensão no isolador usou-se uma fonte de alta tensão Type M2H Transformer Case, esta fonte consiste de um transformador elevador variável que pode fornecer uma tensão de saída na faixa de 0 a 10 kV. Esta fonte também fornece a alimentação do medidor de fator de potência e capacitância.

O medidor e a fonte de alimentação formam um único equipamento, sendo que o medidor é montado sobre a fonte.

Nos ensaios foram utilizados dois isoladores de suspensão, estes isoladores estavam contaminados com uma fina camada de limo, este fato foi aproveitado para comparar as medidas em duas situações diferentes: com os isoladores contaminados e com os isoladores limpos.

Na figura 6 tem-se o detalhe do isolador quando o mesmo estava pronto para o ensaio.



Figura 6. Isolador em teste.

No arranjo do ensaio a amostra foi suspensa por uma polia até uma altura de 1,5 m do chão. O isolador em teste foi suspenso por um isolador de pino polimérico para evitar o seu contato com a polia. A figura 7 mostra o arranjo experimental montado.

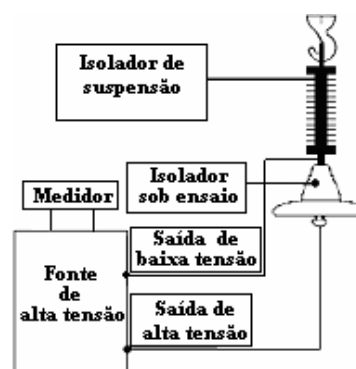


Figura 7. Arranjo experimental.

Na figura 8 encontra-se o arranjo usado, observe que o cabo da saída de alta tensão é denominado de cabo de alta tensão e o cabo da saída de baixa tensão é denominado de cabo de baixa tensão, este cabo encontra-se aterrado, observe também, que o cabo de alta tensão é ligado ao pino do isolador em teste enquanto que o cabo de baixa tensão está conectado à sua concha.



Figura 8. Arranjo experimental para o ensaio da amostra.

Após estabelecer o equilíbrio da ponte de capacitâncias os valores da corrente de condução, no isolador e da capacitância eram então anotados, juntamente com os valores da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar.

As medidas foram realizadas em dia nublado, é importante salientar as condições climáticas, pois as mesmas influenciam na permissividade elétrica do ar que tem importância direta no valor da capacitância medida. Os valores médio da umidade relativa do ar no dia do ensaio era de 70% mR, enquanto que a temperatura média foi de 30°C.

V. MEDIDAS OBTIDAS E COMPARAÇÃO COM A TEORIA

O valor encontrado para a capacitância no ensaio de tensão aplicada para um isolador de vidro foi de $51,4 \text{ pF}$, a corrente de fuga foi de $182 \mu\text{A}$ e a perda foi de $0,101 \text{ W}$. Portanto, o erro percentual é de 2,33% em relação ao determinado pelo MEF, com isso, conclui-se que o resultado da capacitância encontrado com a simulação computacional está de acordo com o valor obtido no ensaio, o que valida o método que utiliza MEF.

A capacitância por fase da LT em estudo, fornecida pela ELETRONORTE é de $78,74 \text{ pF/km}$ enquanto que o determinado pelo método matricial é de $83,09 \text{ nF/km}$. Utilizando o MEF e considerando a influência dos cabos pára-raios, das demais cadeias de isoladores, e o efeito do solo a capacitância por fase da LT é de $85,8 \text{ pF/km}$, o que comprova a eficiência deste método. Os resultados obtidos estão na tabela 1.

TABELA 1
Resultados obtidos através da utilização do MEF e do método tradicional

Dados Reais	Teórico	
	Tradicional	MEF
$78,74 \text{ pF/km}$	$83,09 \text{ nF/km}$	$85,8 \text{ pF/km}$

VI. CONCLUSÃO

A determinação da capacitância é fundamental para confiabilidade e otimização da operação e manutenção

de uma LT. Com o modelo tradicional não se obtém um resultado preciso, pois, como foi evidenciado, o método utilizado para a capacitância não leva em consideração a torre, a cadeia de isoladores e a resistividade do solo, considerando este um condutor perfeito. O método considera apenas o ar, ignorando a capacitância através dos isoladores, considera, também, a média geométrica das distâncias entre os condutores e as suas imagens, portanto é uma aproximação. Isto implica na necessidade de utilização de métodos mais precisos para o cálculo da capacitância da linha de transmissão.

O MEF permite determinar a capacitância do isolador e da cadeia de isoladores considerando, inclusive, o efeito da torre. Outro aspecto importante sobre o MEF é que este pode incorporar a característica da resistividade do solo no cálculo da capacitância.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica*, 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1979. p.375 – 448.
- [2] SILVESTER, P. P. “Finite Elements for Electrical Engineers”. Cambridge University Press. 1991.
- [3] S. M. Correa, “Análise de Elementos Finitos para Determinação da Capacitância em Linhas de Transmissão”, Dissertação de Mestrado, Dept. de Engenharia Elétrica, UFPA, Belém, 2004.
- [4] BUTKOV, E. “Física Matemática”. Guanabara Dois, 1978.
- [5] J. D. Jackson. *Eletrodinâmica Clássica*. Editora Guanabara Dois, 1983.
- [6] A. C. S. Lima, A. B. Fernandes e C. A. Duque, “Otimização dos modelos variantes com a frequência para linhas de transmissão aéreas em programas no domínio do tempo”, apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, Brasil, 2002.