

O ESTADO DA ARTE NA APLICAÇÃO DE CONDUTORES COMPACTOS EM PROJETOS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO – ASPECTOS MECÂNICOS E ELÉTRICOS PARA O NOVO MODELO DESENVOLVIDO NO BRASIL

Gláássio Costa de Miranda*
Bruno Jardim França Rodrigues
Gustavo Luiz Prates de Oliveira

Edino Barbosa Giudice Filho * **Sidnei M. Ueda**
Carlos Alexandre Meireles Nascimento.....
Giovani Eduardo Braga

UFMG / CEFET-MG

CEMIG

NEXANS

RESUMO

A crescente demanda de carregamento elétrico das linhas aéreas, restrições ambientais e econômicas motivaram o estudo para desenvolvimento de um condutor 100% nacional de alta performance a custos otimizados. Desta forma, este trabalho apresenta uma importante contribuição para a continuação do desenvolvimento e estudos sobre condutores especiais, motivando uma análise mais detalhada do comportamento elétrico e mecânico desses condutores. Este trabalho está baseado em dois aspectos: aproximação do método de cálculo térmico para condutores compactos e detalhamento do estudo dos gradientes de potenciais na superfície destes condutores, com seus respectivos ganhos.

PALAVRAS-CHAVE

Condutor Compacto, Comportamento Térmico, Método de Morgan, Efeito Corona, Gradiente Elétrico Superficial.

1.0 - INTRODUÇÃO

Este trabalho representa os esforços para a otimização do desenvolvimento e otimização dos cabos condutores compactos no Brasil, estudando o comportamento do perfil térmico desses condutores e analisando o efeito corona, minimizando os efeitos do campo elétrico na superfície destes condutores.

Com a crescente demanda de energia elétrica, existe hoje uma necessidade de otimizar o carregamento das linhas aéreas de transmissão, através de uma metodologia de maior precisão, conhecendo melhor o comportamento mecânico e elétrico dos condutores compactos desenvolvidos no Brasil

O aumento constante da demanda de energia elétrica pode provocar a sobrecarga das linhas aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica (LTs), ocasionando muitas vezes o aumento da temperatura dos condutores além do seu limite térmico, causando perda de resistência e flechas com valores acima das distâncias de segurança. Neste sentido, temos investido nas pesquisas com cabos condutores compactos nacionais para melhorar o desempenho dessas LTs.

A necessidade do aproveitamento otimizado das faixas de servidão associado à crescente demanda de carregamento elétrico das Linhas Aéreas de Transmissão e Distribuição tem motivado este trabalho, tendo como base o estudo e desenvolvimento de condutores compactos (1).

Um dos objetivos desse trabalho foi procurar adaptar o modelo de cálculo térmico de condutores tradicionais (2), para os condutores compactos e, além disso, mostrar que por mais sofisticado que sejam os métodos para o cálculo de RIV (Radio Interference Voltage) , com tempo computacional e complexidade considerados, esses podem se tornar pouco eficazes caso não contornamos os pontos de projeto de difícil ponderação (3) e também não considerarmos a geometria externa de cada tipo de condutor.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

2.1 Cálculo térmico de condutores aéreos tradicionais – Método de Morgan

Quando um condutor é exposto em qualquer ambiente e está submetido a uma determinada corrente elétrica, a temperatura da sua superfície tende a se equilibrar com a temperatura distribuída ao longo da seção transversal, desde que as fontes de calor permaneçam constantes ao longo do tempo. A Figura 1 ilustra um condutor típico com suas respectivas fontes de calor.

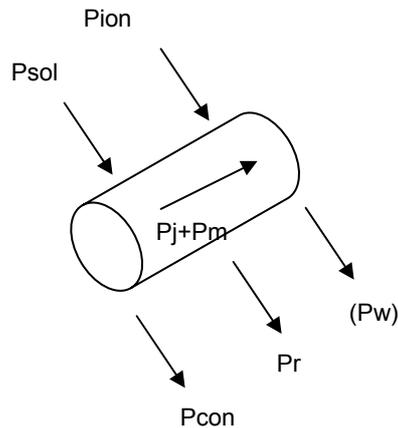


FIGURA 1 - Fontes de calor em um condutor sujeito a uma corrente elétrica.

Nota: P_{con} = perda por convecção; P_R = perda por radiação; P_W = perda de calor por evaporação; P_J = ganho por efeito Joule; P_{sol} = ganho por radiação solar; P_{ion} = ganho por ionização (corona); P_M = ganho por efeito ferromagnético.

Tal condição é conhecida como regime permanente, e a corrente correspondente a uma determinada condição de contorno, isto é, condições ambientais e temperatura da superfície do cabo, definem o que chamamos de regime térmico do condutor em regime permanente.

Estudar a capacidade térmica dos condutores aéreos é extremamente importante, uma vez que a temperatura do condutor é o parâmetro fundamental na operação de uma linha aérea de transmissão. Essa temperatura depende da corrente elétrica, das características elétricas do condutor e de parâmetros climatológicos tais como a velocidade do vento e intensidade da radiação solar.

2.2 Equação básica de equilíbrio térmico

A equação básica de equilíbrio térmico para regime permanente é dada da seguinte maneira (2):

$$P_J + P_M + P_{Sol} + (k_i P_i) = P_{CON} + P_R + (P_W) \quad (1)$$

As transferências de calor devido ao efeito corona e a evaporação ocorrem esporadicamente e, portanto, só devem ser consideradas em uma base probabilística. O aquecimento por efeito ferromagnético produz um pequeno acréscimo na resistência quando se tem um número par de camadas com fios de alumínio (2).

Sendo assim, desconsiderando-se os efeitos menos relevantes, a equação se reduz a:

$$P_J + P_{Sol} = P_{CON} + P_R \quad (2)$$

O ganho de calor por efeito Joule é diretamente proporcional à corrente na qual o condutor está submetido. Sendo assim, a partir da equação do balanço térmico e do ganho de calor por efeito Joule, determina-se a corrente (I) que leva o cabo condutor a uma temperatura média (T_{av}):

$$P_j = k_J \times R_0 \times [1 + \alpha_0 \times (T_{av} - 20)] \times I^2 \quad (3)$$

$$I = \left[\frac{P_c + P_r - P_{Sol}}{R_0 \times [1 + \alpha_0 \times (T_{av} - 20)]} \right]^{0,5} \quad (4)$$

onde: R_0 = resistência ôhmica à corrente contínua por unidade de comprimento na temperatura de 20°C;

α_0 = coeficiente de variação da resistência com a temperatura;

k_J = fator que considera o aumento da resistência com o efeito da superfície do condutor e com efeitos de proximidade;

2.3 Adaptação do método de Morgan para o cálculo térmico de condutores compactos

É extremamente importante que se faça a escolha correta dos parâmetros envolvidos no método de Morgan, de modo a obter resultados mais precisos. Porém, essa escolha não é trivial, uma vez que os parâmetros são específicos de cada condutor e de cada região onde ele está instalado.

Alguns parâmetros exercem maior influência nos cálculos e necessitam de maior atenção ao serem determinados, tais como os coeficientes de absorção e emissividade da superfície do condutor, o seu diâmetro, a radiação solar, a velocidade do vento, etc.

O diâmetro do cabo condutor influencia diretamente o cálculo da capacidade térmica alterando a parcela de calor recebida por radiação solar e a parcela perdida por convecção. Dessa forma, optou-se por um ajuste diametral na formulação, relacionando características específicas dos condutores. A Figura 2 mostra o aspecto construtivo de um condutor tradicional e de um condutor compacto.

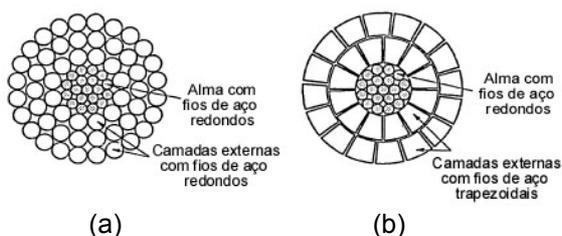


FIGURA 2 – (a) condutor tradicional; (b) condutor compacto

Todas as considerações e aproximações foram feitas para o cabo condutor Linnet, que foi desenvolvido na forma compacta com o mesmo diâmetro da sua forma tradicional. Alguns dados característicos encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos condutores tradicional e compacto.

	Diâmetro Nominal (mm)	Área de Alumínio (mm ²)	Área de Aço (mm ²)	Área Nominal (mm ²)
Linnet Tradicional	18,31	170,32	27,71	263,302
Linnet Compacto	18,31	205,22	27,71	263,302

Nota-se que o espaço vazio (gap) existente no condutor compacto é bastante inferior ao que existe no condutor tradicional. A diferença entre a área nominal e a soma das áreas de alumínio e aço do condutor Linnet tradicional resulta em uma área de 65,30 mm² e do condutor compacto em 30,37 mm², que são as respectivas áreas transversais dos espaços vazios. Dessa forma, para cada tipo de condutor existe uma relação entre a área líquida (aço + alumínio) e a área do espaço vazio. Nesse caso, temos:

$$\left(\frac{A_{liq}}{A_{gap}} \right)_{Linnet(Tradicional)} = 3,03 \qquad \left(\frac{A_{liq}}{A_{gap}} \right)_{Linnet(Compacto)} = 7,67$$

Propõe-se então uma relação de áreas transversais que envolvem o diâmetro nominal associado ao valor 3,03 e um diâmetro equivalente associado ao valor 7,67 para o condutor compacto. Assim, temos:

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\pi \times D_{nominal}^2}{4} = 3,03 \\ \frac{\pi \times D_{equivalente}^2}{4} = 7,67 \end{array} \right]$$

onde: $D_{equivalente} = 1,6 \times D_{nominal}$

Dessa forma, ao se aplicar o método de Morgan para cálculo do perfil térmico de condutores compactos, utiliza-se o valor do diâmetro equivalente ao invés de se utilizar o valor do diâmetro nominal. Essa aproximação foi simulada para o cabo Linnet compacto e comparada com valores experimentais medidos em laboratório.

2.4 Análise do gradiente elétrico e dos métodos para o cálculo de Radio Interferência - RI

Após efetuar uma revisão dos métodos existentes para o cálculo do campo elétrico na vizinhança dos condutores de linhas de transmissão (3), uma adequação dos modelos comparativos existentes para predeterminação dos níveis de RIV (Radio Interference Voltage) (4) foi desenvolvida.

A seleção de condutores é um das mais importantes decisões a serem tomadas nos projetos de linhas de transmissão, principalmente quando próximo das grandes cidades, onde as dimensões dos condutores são na maioria das vezes estabelecidas pela performance do corona do que pela capacidade de carregamento e do próprio balanço do condutor.

O cálculo do gradiente de tensão (5), em todos os pontos ao redor do condutor não é uma tarefa simples em virtude da não uniformidade da superfície, que resulta do encordoamento dos condutores tradicionais (6).

Neste sentido, esse trabalho foi desenvolvido, visando otimizar a aplicação dos condutores compactos nacionais, a mitigação e o processo de cálculo do gradiente na superfície destes condutores, que se apresentam mais polidas e com ligeira redução na curvatura externa dos fios que compõem o condutor.

Uma das contribuições deste estudo é permitir que a geometria real da camada mais externa do condutor seja considerada no cálculo do gradiente de potencial para efeito de avaliação das faixas de segurança de linhas de transmissão em 138 kV que utilizarem esse condutor.

2.5 Análises com simulações das metodologias utilizadas para o estudo de RIV

Através dos programas BELA (7) e CDEGS (8), foi feita avaliações e comparações do comportamento do gradiente de potencial na superfície dos condutores tradicionais e compactos de mesmo diâmetro. Na Figura 3(a), é mostrado a aplicação do programa CDGES para o estudo do gradiente de potencial na superfície dos condutores para uma disposição real nas estruturas. Na Figura 3(b), é mostrada a análise com elementos finitos aplicada para um condutor ideal do diâmetro do Linnet ; na Figura 3(c), é

analisado o condutor real com geometria da última camada, desenhada conforme a formação para fios redondos; e na Figura 3(d) é mostrado a representação geométrica da camada mais externa do condutor compacto com a curvatura dos fios mais plana.

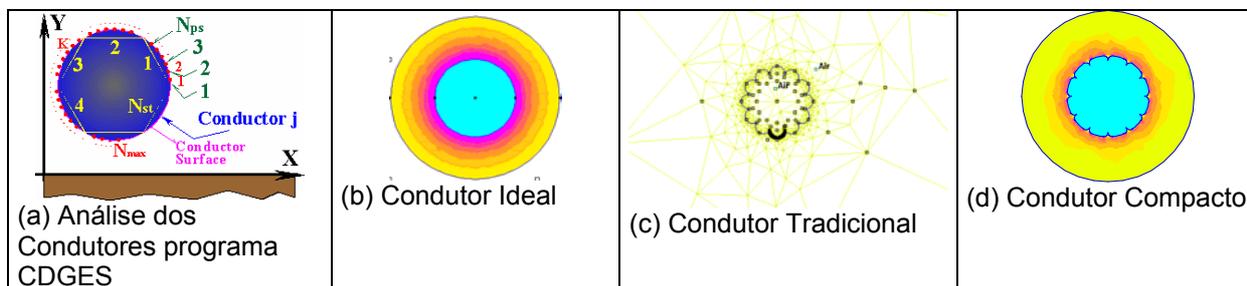


FIGURA 3– Análise do Gradiente de Potencial na superfície dos condutores, ideal, real e compacto.

O programa de cálculo utilizando Elementos Finitos fornece o valor de gradiente na superfície dos condutores com todos os fatores geométricos já levados em consideração. Assim, a expressão da tensão de início de corona pode ser obtida fazendo-se a correção da tensão de ionização do ar para as condições atmosféricas.

Apesar do Efeito Corona ser um fenômeno caracteristicamente não linear utilizamos o gradiente na superfície do condutor como um valor básico para o início do fenômeno. O fator de correção da densidade do ar foi calculado considerando uma temperatura de 25°C (77°F) e a pressão atmosférica de 675mmHg (26,75 inches de Hg), obtendo-se um fator de correção $\delta=0,8873$.

3.0 - RESULTADOS

3.1 Comportamento Mecânico – Análise Térmica

A Figura 4(a) mostra os valores de temperatura obtidos em laboratório para os dois tipos de condutores. A Figura 4 (b) mostra os valores de temperatura obtidos por simulação e por medição para o condutor Linnet tradicional.

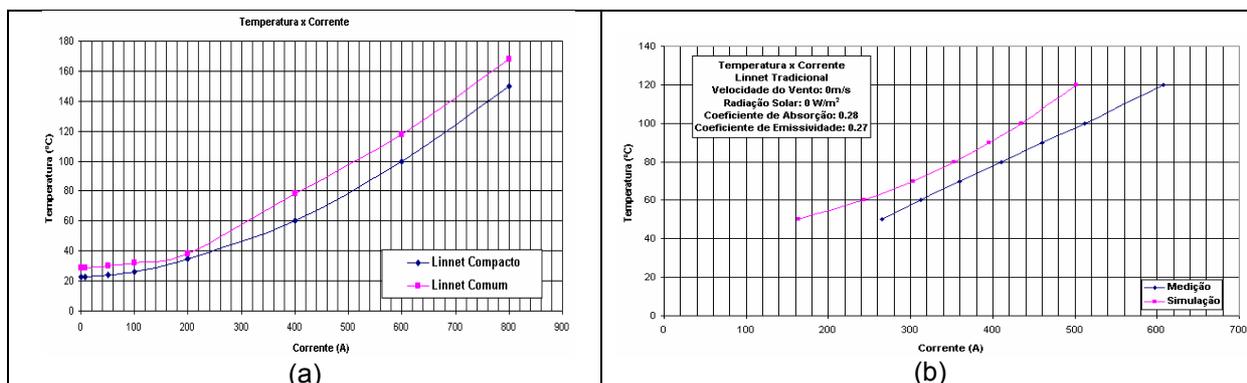


FIGURA 4 – (a) Medição de temperatura e corrente dos condutores; (b) Simulação do condutor Linnet tradicional.

Observa-se na Figura 4(a) que os ensaios foram realizados sob temperaturas ambientes distintas, o que poderia levar a uma interpretação equivocada dos resultados. Porém, sabe-se que a partir de um determinado valor de corrente, o efeito Joule passa a predominar e exerce maior influência no valor da temperatura do condutor. Sendo assim, a temperatura ambiente passa a ter influência mínima quando se ultrapassa um determinado valor de corrente e, portanto, apesar de estarem submetidos a temperaturas ambientes distintas, pode-se fazer a comparação térmica entre os dois condutores. Nesse caso específico, a predominância do efeito Joule ocorre a partir de 200A.

É fácil notar que o condutor compacto tem melhor comportamento térmico se comparado ao condutor tradicional. Nesse estudo, foram medidos valores de temperatura até 30% superiores aos valores medidos para o condutor tradicional.

A Figura 4(b) indica que a simulação do cálculo da corrente do condutor Linnet tradicional mostrou-se bastante conservativa para as condições de contorno utilizadas, indicando incoerência na determinação dessas condições, uma vez que a temperatura calculada deve possuir um valor próximo da temperatura medida.

Os parâmetros de entrada para a simulação do cálculo da corrente foram pré-determinados na tentativa de representar da melhor forma possível a condição real do ensaio, ou seja, os cálculos foram feitos para um condutor novo, localizado em ambiente que não existe radiação solar e sem a presença de vento. Essa seria a condição de um laboratório fechado, ambiente no qual os ensaios foram realizados. Porém, o valor da corrente medida para a temperatura de 50°C, por exemplo, foi 61% superior ao valor calculado, indicando que houve falha na primeira escolha das condições de contorno do método de cálculo.

A hipótese é que considerar a velocidade do vento igual a 0 m/s seria uma estimativa muito conservativa, já que é praticamente impossível a existência de um ambiente com ar 100% estacionário. A Figura 5 mostra os resultados obtidos após a simulação do condutor Linnet Tradicional para alguns valores de velocidade do vento.

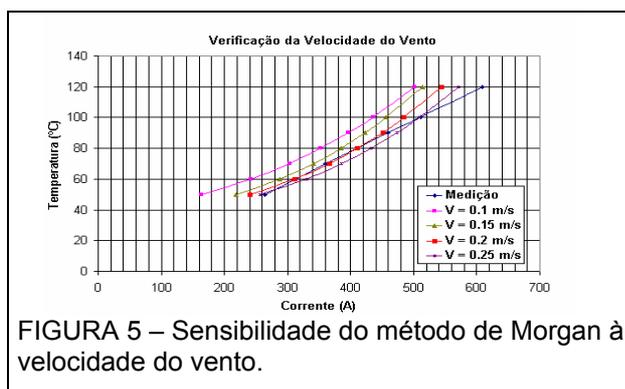


FIGURA 5 – Sensibilidade do método de Morgan à velocidade do vento.

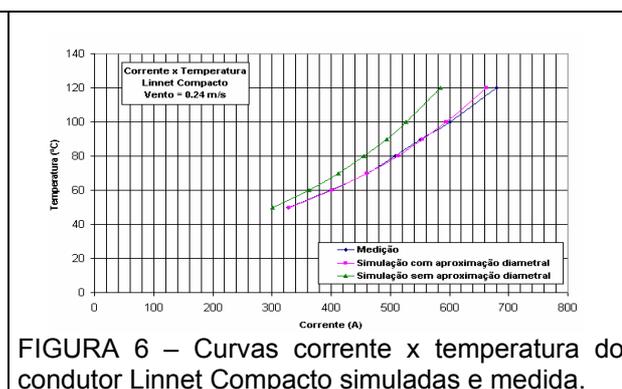


FIGURA 6 – Curvas corrente x temperatura do condutor Linnet Compacto simuladas e medida.

Esse resultado mostra que a velocidade do vento deve ter o valor mínimo de 0,2 m/s para o ambiente estudado. Apesar de ser um valor baixo, nota-se que uma pequena variação no valor da velocidade proporciona um ganho considerável no valor da corrente calculada. Para a simulação com velocidade do vento de 0,2 m/s, a menor diferença em relação ao valor medido foi de 0,2 % na temperatura de 80°C e a maior foi de 10% na temperatura de 120°C.

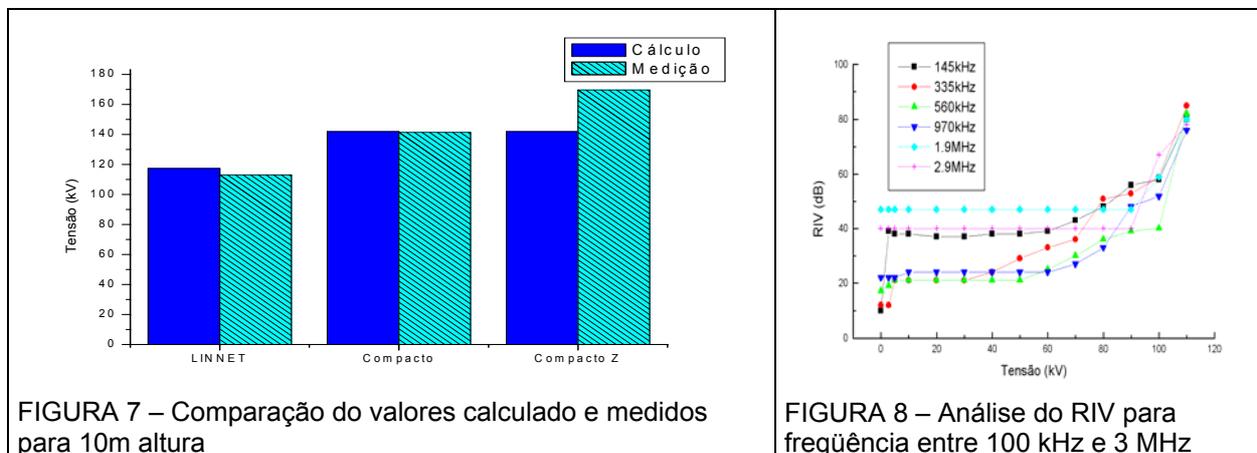
Uma vez que as condições de contorno foram definidas corretamente para o ambiente estudado, foi possível simular o condutor Linnet Compacto com a formulação original sem aproximação e, em seguida, simulou-se com a aproximação diametral. Os resultados encontram-se na Figura 6.

Como era esperado, o método de Morgan sem aproximação diametral não pode ser utilizado para o cálculo da capacidade térmica do condutor Linnet compacto, pois esse apresenta características construtivas que diferem substancialmente dos condutores considerados por Morgan em seu método original. Os valores calculados pelo método sem aproximação foram até 13% superiores aos valores medidos. Por outro lado, pode-se observar que o método de Morgan com aproximação diametral apresentou resultados bastante satisfatórios para o cálculo térmico do condutor Linnet compacto. A maior diferença entre o valor calculado e o valor medido foi de 2,5% para a temperatura de 120°C, e a menor diferença foi de 0,2% para a temperatura de 50°C.

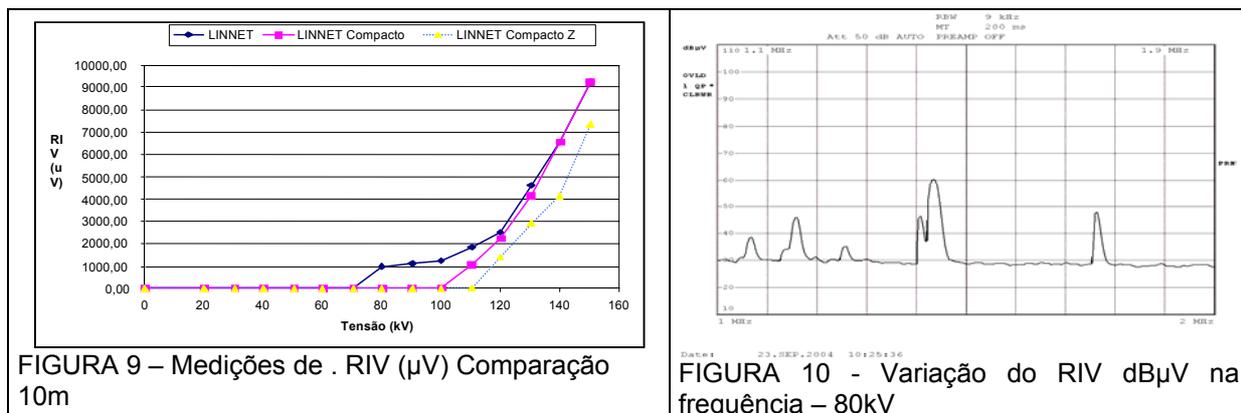
3.2 Comportamento Elétrico – Análise de RIV

3.2.1 Resultado e estudos de laboratório

No laboratório, para o prosseguimento dos estudos, foi obtido o gráfico da Figura 7 que mostra uma comparação entre os valores calculados e medidos para a tensão de início de corona. A Figura 8 mostra os valores obtidos para algumas medições de RIV com os condutores nas frequências entre 100 kHz e 3 MHz.



A Figura 9 apresenta a comparação das medições do RIV (μV) para os três condutores a 10m de altura. A Figura 10 (tensão de 80kV), observou-se que um nível de ruído acrescentado ao sistema de aproximadamente 30dB, mas que não se somou aos níveis de ruído ambiente mais elevados e que foram utilizados para a implementação do fator de correção para o ajuste do modelo do cálculo de RIV aplicado ao condutor compacto.



3.2.2 Otimização da metodologia de cálculo aplicado para condutores compactos

Diante da dificuldade de medição precisa do gradiente de potencial na superfície dos condutores, qualquer que seja o processo de cálculo (somente poderá ser avaliado de forma indireta), para se conseguir inserir nos estudos e projetos de linhas de transmissão os ganhos verificados com os resultados comparativos das medições de RI entre o condutor compacto e o condutor tradicional houve a necessidade de analisar alguns métodos matemáticos de predeterminação de Rádio Ruído e Corona em superfícies de condutores lisos (9) e analisar as pesquisas de Rádio Ruído (10). Foram feitas simulações com os modelos comparativos que os estudos (11) indicaram boa precisão, tendo sido escolhidos os modelos, FG – 400 kV (Alemanha) e Shiobara (Japão), sendo esse último somente indicado para predeterminação em tempo bom.

A predeterminação dos níveis de RI (Ruído de Radiointerferência) através das análises dos métodos comparativos (11), ajustados para medições e comparações feitas para um condutor singular, circuito monofásico utilizando condutores com a geometria tradicional, compacto trapezoidal e compacto tipo Aero “Z”, foram realizadas.

Inicialmente estudos e análises do gradiente de potencial máximo na superfície dos condutores foram feitos conforme a equação (5)

$$G_{m\acute{a}x} = \frac{V}{\gamma \times r \times \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \left[\frac{kV}{cm}\right] \quad (5) \quad F_c = \frac{\frac{1.1V}{\sqrt{3}}}{\delta r \ln\left(\frac{2h}{r}\right) (G_{m\acute{a}x\ CaboTradicional} - \Delta G(C_{Tradicional} - C_{Compacto}))} \left(\frac{h}{h-r}\right)$$

(6)

Com base nos resultados experimentais mostrados na Figura 9, um fator de correção, equação (6), foi aplicado na equação final (7) para o cálculo do gradiente de potencial máximo na superfície do condutor compacto trapezoidal,

$$G_{m\acute{a}x\ CCompacto} = \frac{\frac{1.1V}{\sqrt{3}}}{\delta F_{c2} r \ln\left(\frac{2h}{F_{c2} r}\right)} \left(\frac{h}{h - F_{c2} r}\right) \left[\frac{kV}{cm}\right] \quad (7)$$

onde a densidade do ar é levada em conta através da relação: $\delta = \frac{17,9}{459+T} b$, onde b é a pressão em

polegadas de mercúrio e T é a temperatura dada em Farenheit; h = distância da fase até ao solo (cm); r = raio próprio do condutor (cm); V = tensão fase-terra (kV);

G_{máx} = gradiente máximo na superfície do condutor singelo; F_{c2} = Fator de Correção; G_{máx CaboTradicional} = Gradiente máximo esperado para condutores compactos com geometria trapezoidal; G_{máx CaboTradicional} = Gradiente máximo verificado na superfície do condutor tradicional Linnet e $\Delta G(C_{Tradicional} - C_{Compacto})$ = Diferença entre os gradientes verificados para o condutor tradicional e condutor compact trapezoidal.

Para a predeterminação de RI, o modelo, desenvolvida nas pesquisas realizadas na Alemanha (11) foi estudado e ajustado com base nas diferenças dos valores medidos para a avaliação de RIV, comparando os condutores tradicional e compacto. Um fator de correção deste modelo é indicado na equação (8).

$$F_c = \frac{53,7 \pm 5 + K \times (g_m - 16,95) + 40 \times \log\left(\frac{d}{3,93}\right) + E_n + 20 \times K_D \times \log\left(\frac{20}{D}\right) + E_f + E_{FW}}{E_{mct} - (E_{mct} - E_{mcc})} \quad (8)$$

A fórmula empírica, modificada para o estudo de RI, a ser utilizada e aplicada a projetos de linhas de transmissão com os novos condutores compactos, de geometria trapezoidal, está indicada na equação (9),

$$E_{mcc} = 53,7 \pm 5 + K \times (F_c g_m - 16,95) + 40 \times \log\left(\frac{d}{3,93}\right) + E_n + 20 \times K_D \times \log\left(\frac{20}{D}\right) + E_f + E_{FW} \rightarrow [dB/1\mu V/m] \quad (9)$$

onde: x = Parâmetro que varia de -5 a +5; K = Igual a 3,5 para linhas com limites de gradientes entre 15 e 19 [kV/cm]ef; g_m = Gradiente máximo em [kVef/cm].; d = Diâmetro dos subcondutores. [cm] ; n= Número de subcondutores por feixe; En = Igual a -4dB para condutor simples (n=1), e Em = -6.02 para n>1; Kd = 1,6+-0,1 para faixa de frequência de 0,5 a 1,6 MHz. ;D = Distância radial do condutor à antena de medição. [m];E_{fw} = Fator de correção para condições atmosféricas adversas; 0 para tempo bom e 17+-3 para chuva. ; Ef = Fator de correção para efeito de variação da frequência do ruído; Emct = Nível de Riv medido em condutor tradicional Linnet Tradicional; Emcc = Nível de Riv medido em condutor Compacto Linnet; Fc = Fator de correção para o condutor compacto.

Os modelos Shiobara (Japão) e Westinghouse (USA) (11), também foram analisados e os resultados para o fator de correção, equação (9), permaneceram próximos.

4.0 - CONCLUSÕES

- Os experimentos indicaram que o condutor Linnet compacto apresenta melhor comportamento térmico se comparado ao condutor Linnet tradicional.
- A determinação correta das condições de contorno do método de Morgan tem importância fundamental no cálculo térmico de condutores tradicionais e compactos.
- A velocidade do vento é um dos parâmetros críticos a ser considerado no método, uma vez que pequenas variações desse parâmetro ocasionam grandes alterações na capacidade térmica calculada.
- A aproximação diametral que considera o efeito do gap mostrou-se eficaz para o cálculo térmico do condutor Linnet compacto.
- Com base nos estudos e resultados de ensaios e medições apresentadas, o ajuste do modelo empírico de cálculo existente para RI, quando os projetos de linhas de transmissão utilizarem condutores com a geometria compacta trapezoidal de custo reduzido permitirá a redução das faixas das LTs de 138 kV, com condutores singelos, entre 13 e 20%.
- A redução terá enfoque e poderá ser aplicada, principalmente, quando a LT se aproximar das grandes cidades, onde se tem uma maior aproximação da faixa de segurança e os aspectos elétricos forem predominantes.
- A utilização dos condutores compactos, desenvolvidos no Brasil com custos reduzidos, utilizando as adequações das formulações propostas, considerando os aspectos mecânicos e elétricos, permitirão uma redução dos custos com um melhor aproveitamento dos corredores de 138 kV.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Giudice E. B. ; Nascimento C..A M; Guimarães G E; Braga G. E; Campos O. F; Miranda G.C.; Saldanha J. O. P.; Ueda S. M.. “Desenvolvimento de Condutores Compactos Aplicados a Linhas Aéreas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica”. XVII SNPTEE.
- (2) MORGAN, V. T. The Thermal Rating of Overhead Line Conductors – Part I. The Steady State Thermal Model, *Electric Power Systems Research*, 5, p.119-139, november, 1982.
- (3) Maruvada, P.S., Bacha, R.J., Backer, A.C., Blair, W.E., Bulawka, M.E., Chartier, V.L., Cortins, R., Craine, L.S., Elder, G.R., Gary, C., Hall, J.F., Janischewskyj, W., Kolcio, N., Mcdermot, T.J., Morris, R.M., NigboR, R.J., Zakala, W.E., Paldl, A., Perkins, M.D., Reichman, J., Reilly, J.P., Richeda, R.J., Schlinger, W.R., Sebo, S.A., Tuttle, P.D., Warburron, F.W., WhitneY, B.F., Wong, P.S. “ A surfvey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients “ – IEEE Corona and Field Effects Subcommittee a Report Radio Noise Working Group – Power Apparatus and Systems – Vol. PAS = 93 – Sept./Oct. 1974 pp 1660 – 1668
- (4) Nils H.C.; Kazumitu Y.; Carlos E. O. C. “ Análise dos Métodos de Predeterminação de Interferência em Rádio baseada em Medições de Campo” – VII – SNPTEE
- (5) Termoshok, M. – “Relative Surface Gradients of Grouped Conductors.” AIEE Transactions, Nova Iorque, 1948. Vol. 67. Parte III. Págs. 1 583 -1 591.
- (6) Fuchs R. D. - “ Transmissão de Energia Elétrica : Teoria das Linhas em Regime Permanente – vol. 2”.
- (7) BELA – Finite Element Electrostatics Solver – David Meeker
- (8) CDEGS – Current Distribution, Grounding and Soil Structure Analysis – Safe Engineering Services & technologies ltd
- (9) Miller, C. J. “Mathematical Prediction of Radio Interference and Corona Characteristics of Smooth, Bundled Conductors” – IEE – October 1956
- (10) CIGRE/IEEE – “ Survey on Extra High Voltage Transmission Line Radio Noise – CIGRE Study Committee N° 36 – Working Group N° 1 – IEEE Radio Noise Subcommittees – Working Group N° 1. – IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems – vol. PAS-92, n° 3, maio/junho 1973
- (11) CIGRE/IEEE “ Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results” IEEE Radio Noise Subcommittees Report. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems – vol. PAS-92, n° 3, maio/junho 1973