



**XXIV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GLT/26

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

**FEIXES COMPACTOS E OTIMIZADOS PARA REDUÇÃO DOS CAMPOS ELÉTRICOS SUPERFICIAIS, DO
RÚIDO AUDÍVEL E DA RÁDIO INTERFERÊNCIA EM LINHAS AÉREAS**

**O. RegisJunior(*)
CHESF**

**L.A.M.C. Domingues
CEPEL**

RESUMO

Este IT analisa possibilidades de utilizar técnicas de otimização de forma a dimensionar feixes não convencionais com a característica principal de gerar baixo ruído - ruído audível e interferências eletromagnéticas. Soluções para linhas de transmissão com baixo ruído tendem a ser cada vez mais bem recebidas, por conta de demandas das comunidades e restrições ambientais mais severas. Neste contexto, o desenvolvimento de alternativas de configurações de baixo ruído é importante de forma a preparar as equipes de projeto com recursos para atender aquelas exigências.

PALAVRAS-CHAVE

Ruído Audível, Linhas de Transmissão, Campo Elétrico.

1.0 - INTRODUÇÃO

Por várias décadas os projetos de linhas de transmissão de alta e extra alta tensão tinham, como pressuposto imutável, a formação de feixes de condutores com 18 polegadas de espaçamento entre cabos (0,457 m), usualmente conhecidos como feixes convencionais. Nos anos 90, trabalhos realizados por Chesf e Cepel, com a participação de professores da Universidade de São Petersburgo [1], mostraram a viabilidade de projetar linhas com feixes de dimensões diferentes daquele padrão. Modelos de cálculo, ensaios de laboratório e, finalmente, linhas reais em operação permitiram demonstrar amplamente a viabilidade das novas soluções e levaram à quebra daquele paradigma.

Inicialmente o objetivo dos novos feixes era o desenvolvimento de linhas de alta capacidade de transmissão, aumentando a Potência Natural {também chamada de SIL, do inglês Surge Impedance Loading}, criando as Linhas de Potência Natural Elevada - LPNE e de Feixe Expandido – FEX, ou ainda as “High SIL”. Estas alternativas se comprovaram como solução excelente para várias situações de expansão e repotencialização do sistema de transmissão, em especial nos casos de linhas longas, interligando usinas situadas a grandes distâncias dos centros de carga.

Neste trabalho explora-se a possibilidade de utilizar os conceitos de otimização, não apenas para aumentar a potência natural, mas para outros objetivos que se julgem importantes, notadamente o desenvolvimento de linhas mais silenciosas.

2.0 - RUÍDO PRODUZIDO POR LINHAS DE TRANSMISSÃO

Tanto o ruído audível quanto as interferências eletromagnéticas produzidos por linhas de transmissão de alta e extra alta tensão são bem conhecidos dos engenheiros e técnicos que trabalham no projeto, construção e operação de LTs. O zumbido característico nas proximidades destas linhas é uma característica relativamente familiar. Geralmente estes fenômenos são tanto mais intensos quanto maior o nível de tensão (345 - 500 - 750 kV).

Tanto o ruído audível quanto as interferências são efeitos decorrentes do fenômeno corona, processo de descargas e ionização do ar, que ocorre na vizinhança próxima da superfície do condutor, gerado pelo campo elétrico superficial. No projeto de uma linha de transmissão toma-se o cuidado de manter o campo elétrico superficial nos condutores abaixo do limiar de corona generalizado, a partir do qual ocorreria corona permanentemente em toda a linha.

No entanto, devido a irregularidades na superfície dos cabos - o próprio encordoamento, danos devidos ao lançamento, depósito de partículas, sujeira, insetos, etc. - há formação de pontos de corona ao longo dos condutores. Um projeto cuidadoso trata de manter os efeitos de corona controlados, dentro de limites aceitáveis, porém é consenso que é economicamente inviável projetar e construir uma linha, de tensão elevada, totalmente livre de corona.

3.0 - ANÁLISE DE CONFIGURAÇÕES TÍPICAS

O conceito de otimização visando redução de ruído é ilustrado neste trabalho para uma série de configurações de 500 kV que representam os principais projetos estruturais em utilização no sistema de transmissão brasileiro. Os conceitos e métodos aplicados neste trabalho valem para linhas em alta, extra alta e ultra alta tensão, porém, pela representatividade dessa classe no sistema, a análise foi focada em configurações em 500 kV. As figuras a seguir apresentam as silhuetas das linhas estudadas neste IT.

Importante lembrar [1] [3] que a impedância de sequência positiva de uma LT, chamada de Z_1 , pode ser dada por: $Z_1 = Z_p - Z_m$, onde Z_p é a impedância própria e Z_m é a impedância mútua. E a Potência Natural (SIL) é inversamente proporcional a Z_1 , ou seja: quanto menor Z_1 , menor consumo de reativo e menor queda de tensão, resultando em maior SIL, e que permite transportar mais potência sem ter problemas sistêmicos de estabilidade e afundamentos de tensão.

A Torre Raquete (Figura1) tem a concepção em suportes auto-portantes, com feixes de 18 polegadas (0,457m) considerados feixes convencionais. A distância entre fases é bastante reduzida (maior Z_m), em arranjo triangular, chamado de torre compacta [2], o que propicia o SIL maior através desta compactação.

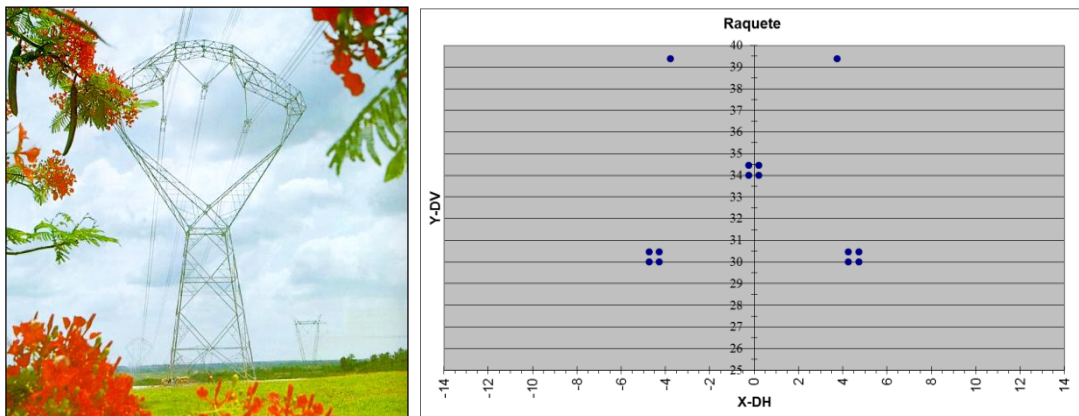


Figura 1 - Torre Raquete e disposição dos cabos condutores e para-raios

A Torre Cross-Rope ou Chainette (Figura 2) tem a concepção suportada por dois mastros estaiados, com as fases colocadas entre eles. Os feixes são convencionais de 0,457 metros, com arranjo de fases praticamente plano, com distância entre fases bastante reduzida, o que propicia o SIL maior através desta compactação.

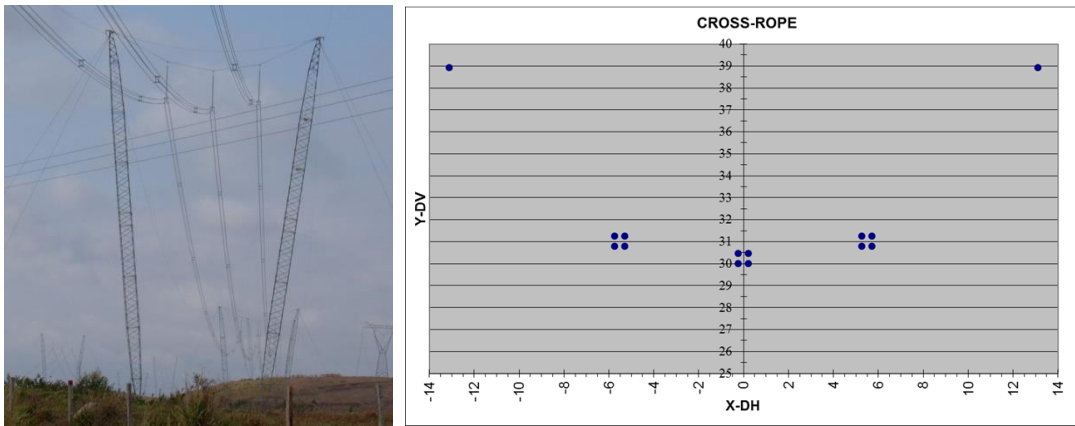


Figura 2 - Torre Cross-Rope (Chainette) e disposição dos cabos condutores e para-raios

A Torre VX-Assimétrico (Figura3) tem a concepção em suportes “V” estaiados, com as fases no mesmo plano e mastros entre elas, o que impede a compactação. Para a obtenção de um SIL maior utiliza feixes expandidos (menor Z_p), com uma assimetria fruto de otimização dos campos superficiais e condicionantes de projeto.

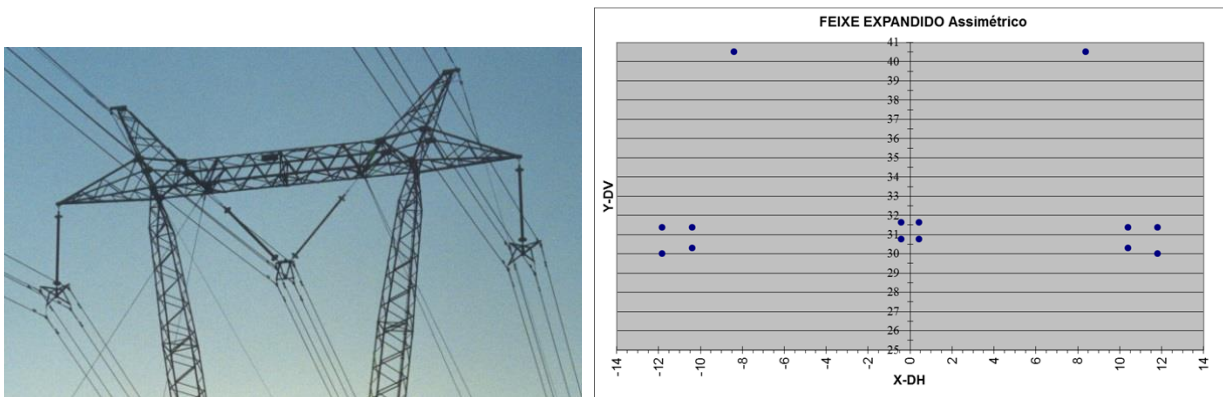


Figura 3 - Torre V Feixe Expandido Assimétrico (VX-Assimétrico) e disposição dos cabos condutores e para-raios

A Torre VX-Simétrico (Figura4) também tem a concepção em suportes “V” estaiados, com as fases no mesmo plano e mastros entre elas, o que impede a sua compactação. Para se obter um SIL maior utilizou-se feixes regulares expandidos (menor Z_p), na forma de um quadrado de lado de 1,20m, o que propiciou uma padronização nas suas ferragens, em relação à torre anterior. Por outro lado, como já foi mostrado em outros artigos, o campo elétrico em alguns sub-condutores são mais elevados.

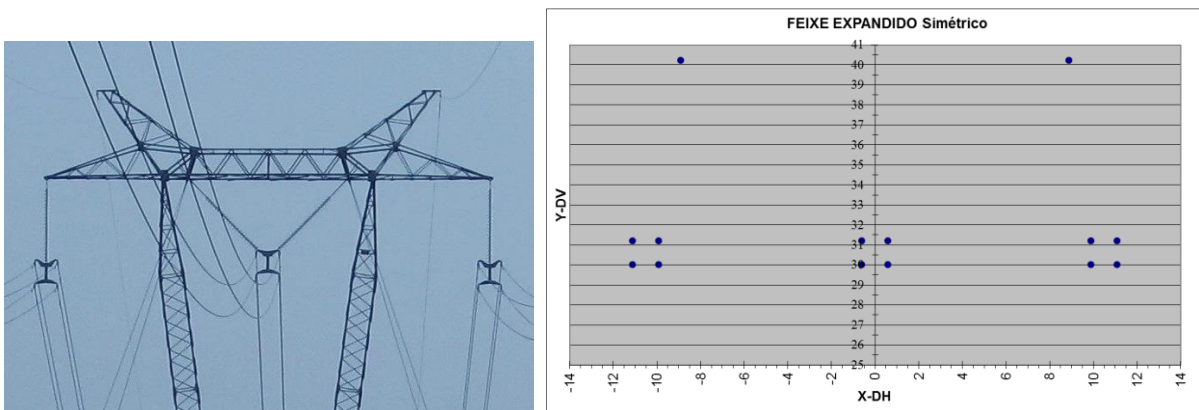


Figura 4 - Torre V Feixe Expandido Simétrico (VX-Simétrico) e disposição dos cabos condutores e para-raios

A Torre Cara de Gato (Figura5) tem a concepção em suportes auto-portantes, com parte estrutural entre as fases, o que limita a sua compactação. Para se obter um SIL maior utilizou-se feixes regulares expandidos (menor Z_p), na forma de um quadrado de lado de 1,20m. As fases são dispostas em arranjo triangular, o que propiciou uma distribuição de campos elétricos nos sub-condutores mais equalizada.

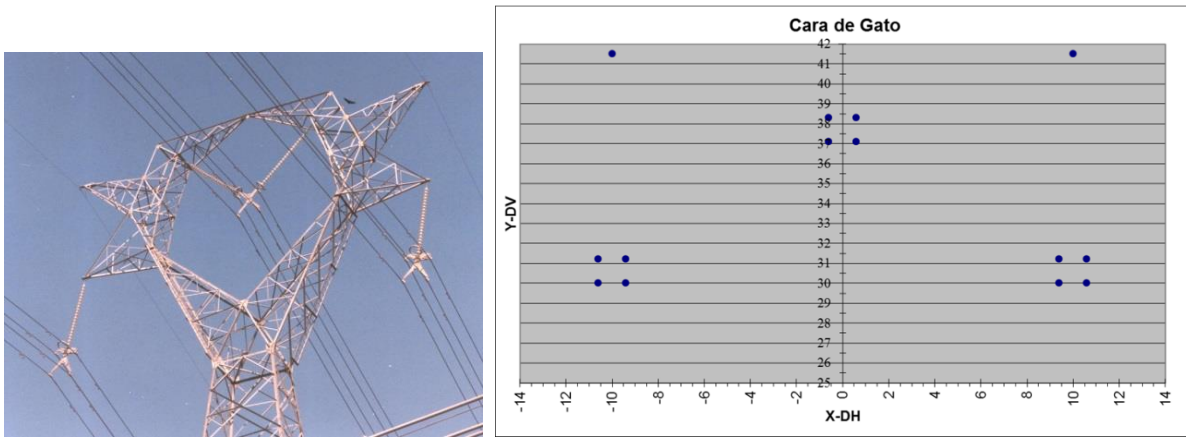


Figura 5 - Torre Cara de Gato e disposição dos cabos condutores e para-raios

A Torre Monomastro, referência [4], (Figura 6) tem a concepção em suportes estaiados, de mastro único, com parte estrutural entre as fases. Mesmo assim, se conseguiu uma pequena redução da distância entre as fases, as quais são dispostas em triângulo. Para complementar o ganho no SIL para 1200 MW, usou-se um feixe expandido na forma de quadrado com 0,90m de lado. Ou seja, nesta concepção, o ganho no SIL se deveu a uma combinação de uma pequena compactação (maior Z_m) e o uso de um feixe "semi-expandido" (menor Z_p).

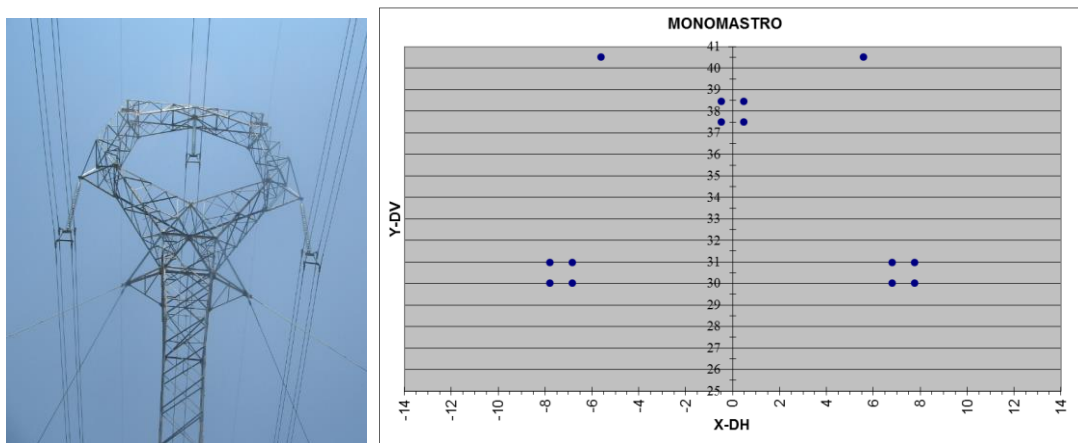


Figura 6 - Torre Monomastro e disposição dos cabos condutores e para-raios

3.1 Metodologia utilizada

Ao modificar a geometria de uma configuração de LT o ruído audível (RA) e a interferência eletromagnética (RI) se alteram, de forma um pouco diferente. Variando a geometria altera-se o campo elétrico superficial nos condutores, que tem influência direta na geração de corona. Porém aqueles dois efeitos dependem também da posição relativa dos condutores e distância ao ponto de medição e de parâmetros eletromagnéticos de propagação em alta frequência, de modo que a resposta de RA e RI não acompanha de modo exato a otimização de campo elétrico.

De qualquer modo o campo elétrico é a principal grandeza que afeta o corona e seus efeitos. A dependência dos efeitos do corona com o campo elétrico segue funções exponenciais. Por este motivo decidiu-se, neste trabalho, realizar a otimização visando à minimização do campo elétrico superficial e, no final analisa-se o ruído (RA e RI) nas configurações inicial e otimizada.

Há mais de uma medida para quantificar o campo elétrico superficial dos condutores, com vistas a avaliar o fenômeno corona; as principais são a média dos gradientes máximos em cada subcondutor (método EdF [5]) e maior dos máximos (método GE-EPRI [6]). Neste trabalho adotou-se o maior gradiente do feixe, pela experiência obtida em modelagem, cálculos e medições em laboratório e no campo, que mostraram ser este indicador mais ajustado aos fenômenos físicos.

3.2 Minimização de campo elétrico

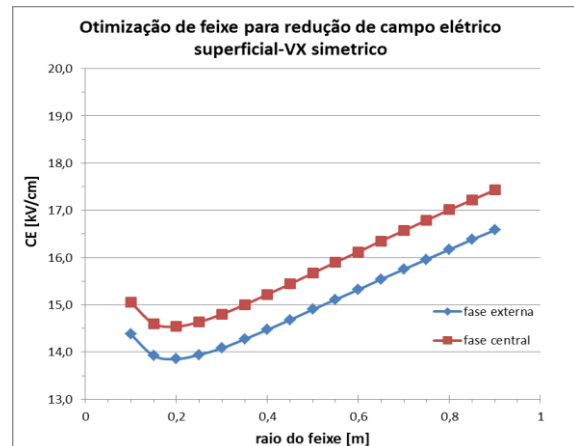
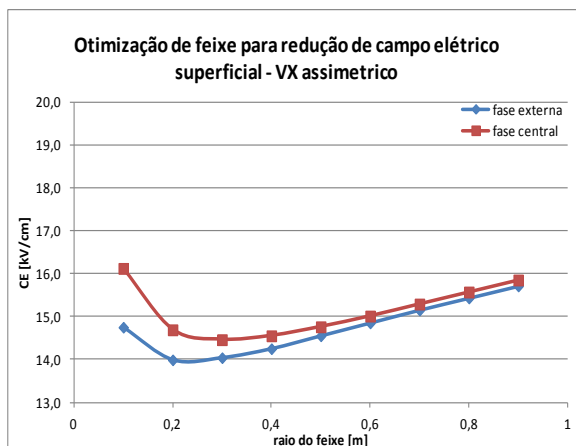
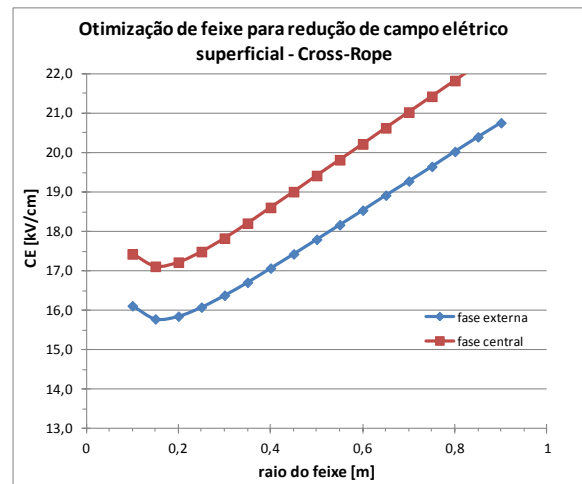
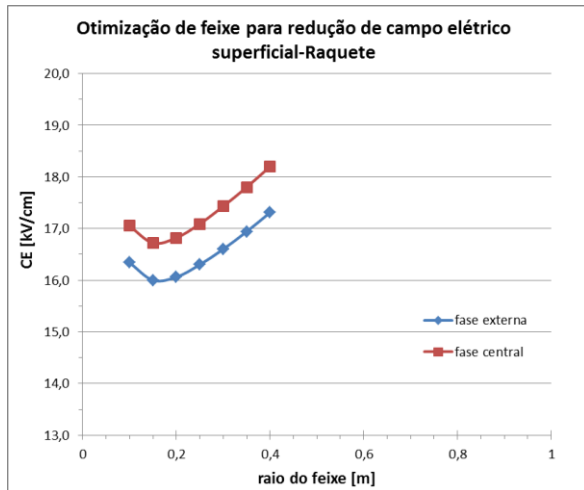
O processo de minimização de campo elétrico superficial foi efetuado utilizando o programa MMLIN do Cepel, de alta capacidade e precisão, baseado no método da série harmônica. Este método foi avaliado no Survey IEEE de métodos de cálculo de gradientes superficiais como um dos 3 métodos de precisão superior. Esta escolha revelou-se acertada pois, sobretudo ao comprimir os feixes, os requisitos de precisão tornam-se mais rigorosos,

demandando um número progressivamente maior de termos nas séries, onde os métodos convencionais perdem muito a precisão.

Ao variar a dimensão dos feixes tomou-se, em cada caso, o maior valor de campo elétrico que ocorre em qualquer um dos condutores daquela fase (máximo campo no feixe). Os resultados podem ser visualizados na Figura 7, ressaltando-se que eles foram obtidos considerando o condutor adotado nessas linhas descritas no item 3.0, no caso, o cabo Rail 954 MCM.

As dimensões dos feixes foram variadas no intervalo desde raios em torno de 1,20 m (feixes expandidos), até se passar pelo ponto onde ocorre o menor valor de campo elétrico superficial máximo, que varia de acordo com a configuração, mas se situa, em geral em torno de 20-25 cm.

A única exceção foi a torre raquete, para a qual não se estudou os feixes expandidos, por se entender que já se trata de um arranjo extremamente compacto, não comportando feixes significativamente aumentados. Neste caso, para um feixe convencional com padrão quadrado e espaçamento de 0,457m entre condutores laterais, o raio do feixe é 0,323 m. O maior feixe estudado foi com raio de 0,400 m.



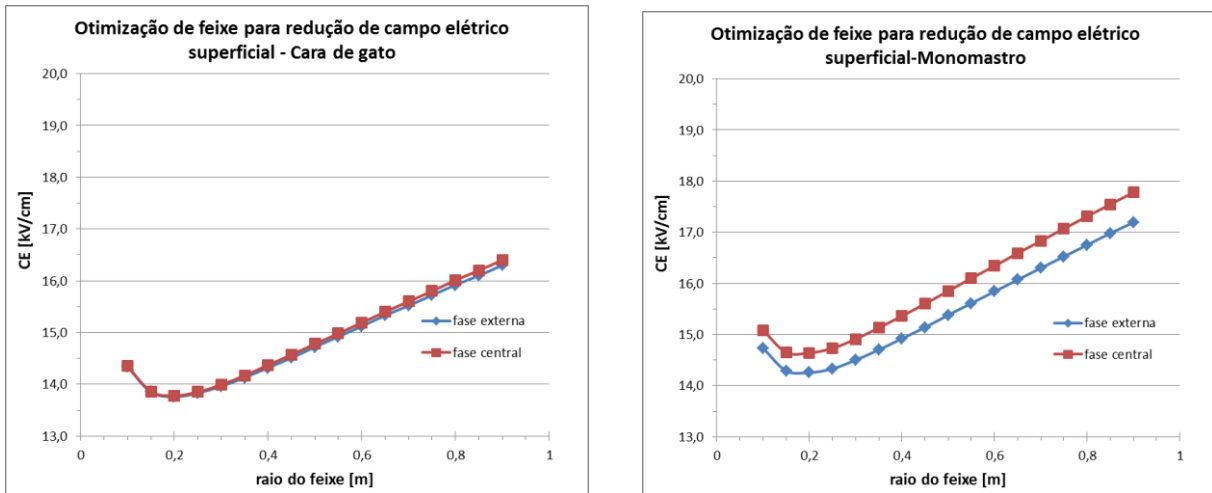


Figura 7 – Otimização de feixe para redução de campo elétrico superficial em diversos tipos de torre

4.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

As possibilidades de redução de campo elétrico superficial obtidas com a mera otimização do feixe são notáveis. Verifica-se que, em todos os casos, se obteve uma redução muito expressiva do campo elétrico máximo mantendo o mesmo cabo condutor.

Pode-se observar que a redução de campo elétrico máximo não ocorre de modo homogêneo nas fases laterais e central, o que permite supor que uma otimização integrada permita resultados ainda melhores.

Uma das principais observações que se pode tirar dos resultados apresentados é que, embora o ponto ótimo dependa da configuração, em todos os casos o feixe que apresenta o menor campo elétrico máximo é menor que o convencional, de 18 polegadas.

Em algumas configurações, como a 'cara-de-gato', os gradientes nas fases laterais e centrais são muito próximos, o que indica que os cabos estão sendo igualmente utilizados e, ao se definir uma configuração ótima, todo o arranjo está igualmente otimizado.

Em contrapartida, em outros arranjos, como a torre 'raquete', há uma diferença grande entre as fases, tendo a fase central níveis de campo elétrico mais elevados. Nestes casos, ao se definir um determinado feixe otimizado, os cabos das fases laterais estariam subutilizados.

Esta característica pode ser melhorada buscando a otimização dos feixes independentemente, o que resultará em fases com feixes de diferentes dimensões, o que já é utilizado em algumas linhas no sistema, após o aprofundamento dos estudos de LPNE.

Por fim, a Figura 8 mostra resultados de cálculos que evidenciam a diminuição de ruído audível para dois tipos de torre, considerando os feixes normais e os feixes otimizados (de dimensão reduzida).

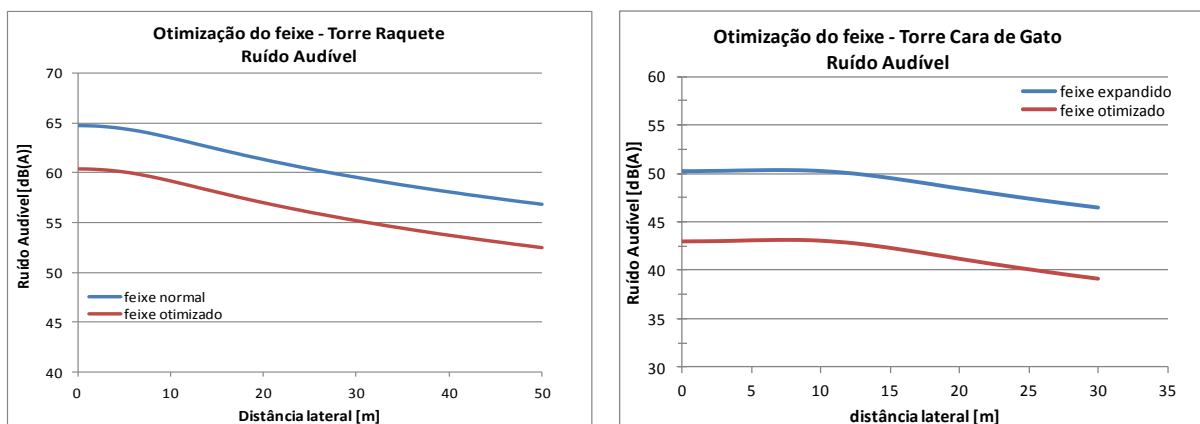


Figura 8 – Otimização de feixe: Perfil de Ruído Audível para a torre Raquete e a torre Cara de Gato

5.0 - ASPECTOS DE SISTEMAS

A redução da dimensão dos feixes traz consigo uma redução da Potência Natural das linhas que pode atingir a ordem de até 25%, e com proporcional aumento da reatância de sequência positiva. Para linhas curtas isso não significa impacto mensurável nos aspectos de load-flow, tais como queda de tensão ou consumo de reativo.

Nas linhas longas essa técnica de redução de ruídos não deve ser aplicada em toda a extensão, mas sim nas regiões mais sensíveis, sujeitas a reclamações, tais como vizinhanças de comunidades ou áreas urbanas e semi-urbanas.

A Potência Natural resultante será uma média ponderada pelos comprimentos utilizados, e, portanto a redução de potencia não deveria ser significativa nos resultados sistêmicos.

Por outro lado, esses trechos de baixo ruído tornariam a linha mais amigável ambientalmente, com efeitos positivos nos índices de sustentabilidade e na negociação de licenciamentos.

6.0 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos em termos de redução dos ruídos das LTs analisadas são extremamente promissores, e podem constituir-se em ferramenta valiosa, sobretudo de baixo custo, na medida em que restrições e reclamações vierem a demandar soluções mais silenciosas.

No momento atual, quando o paradigma do feixe convencional já foi flexibilizado, no caso de feixes aumentados na busca por maior potência natural, sugere-se a possibilidade de andar também no sentido contrário, buscando configurações otimizadas para baixo ruído.

Em projetos, especialmente 500 kV, nos quais a bitola do condutor tenha sido definida por critério de corona - o que é usual em 345 kV e acima - é possível que uma otimização como apresentada neste IT pudesse levar à adoção de condutor de bitola menor, com significativa redução do investimento necessário.

A otimização apresentada, que consistiu em variar os feixes das três fases conjuntamente, pode ser melhorada realizando a otimização conjunta de todo o arranjo, o que deve levar a resultados ainda superiores.

A execução de estudos de otimização visando soluções de baixo ruído requer a aplicação de ferramentas de cálculo de precisão elevada, pois próximo ao ponto de ótimo, os métodos numéricos convencionais perdem precisão.

Agradecimentos- Os autores agradecem a Furnas e Eletronorte pela cessão de alguns dos dados e imagens.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alexandrov, Georgij N., et alii - The Increase of Effectiveness of Transmission Lines and Their Corridor Utilization - Cigre Paper 38-104, Paris 1996.
- [2] Fernandes, José H. et alii – Torres para Linhas Compactas do Segundo Circuito 500 kV da Interligação Norte-Nordeste, no Sistema Eletronorte, 1a. Parte - Estudos Elétricos – VIII Snp tee 1985
- [3] Regis Jr., Oswaldo; Dart, F. C. et alii – Estudo e Aplicação do Feixe Expandido em LT de 500 kV - XIV SnpTEE - 1997
- [4] Machado, Vanderlei G. et alii - LT 500 kV Interligação Norte/Sul III – Trecho 2: Solução Estrutural com Torre Estaiada Monomastro e Feixe Expandido. - XIX SnpTEE – 2007
- [5] Gary, C., Moreau, M., “Léffect de Couronne em Tension Alternative, Editeur Paris, 1978.
- [6] Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above/ Second Edition, EPRI, 1982.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Oswaldo Regis Junior

Nascido em Recife-1956; Graduado pela UFPE-1978; Especialização: Itajubá-MG-EFEI-1982

Atua na Chesf em estudos e otimização de Linhas de Transmissão, onde foi gerente de Divisão e do desenvolvimento do projeto LPNE, e membro da força-tarefa de Ampacidade.

No Cigre Internacional foi convener da HSIL Task Force (2005) e do WG B2-38 (2015), ambos no SC B2 sobre LPNE, com publicações na revista Electra e no CIGRE Science & Engineering (CSE Journal). Atualmente, no TAG B2.04 está constituindo um WG sobre LT de baixo ruído.

Luis Adriano de Melo Cabral Domingues

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1980), especialização em Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela Coordenação de Programas de Pós-graduação em Engenharia(1981) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro(2002). Atualmente é Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Linhas de Transmissão, Subestações e Equipamentos. Atuando principalmente nos seguintes temas: Linhas de transmissão, Modelos matemáticos, Modelagem de equipamentos.