



GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS ELETROMAGNÉTICOS E AMBIENTAIS NA OTIMIZAÇÃO DA FAIXA DE PASSAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

JOÃO CLAVIO SALARI FILHO(1); ARTHUR LINHARES ESTEVES DOS REIS(1); LUIZ FELIPPE ESTRELLA JUNIOR(1)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL(1)

RESUMO

Abordam-se neste informe técnico várias configurações de linhas aéreas de transmissão (LT) e o seu impacto na otimização da faixa de passagem, incluindo o reposicionamento, adição de cabos condutores por fase e a otimização da geometria dos feixes de condutores das fases. Essas alternativas podem ser utilizadas para o projeto de LT novas ou existentes, e são importantes para o processo de maximização da energia transportada por área ocupada pela faixa de passagem. Consideram-se condicionamentos e limites estabelecidos na revisão da NBR 5422 pelo Comitê de Estudo ABNT/CE-003:011.001 (Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica) e na RN-ANEEL nº 915.

PALAVRAS-CHAVE

Faixa de passagem, Linha de transmissão, LPNE, Otimização

1.0 - INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão de energia elétrica (LT), em corrente alternada (CA) ou em corrente contínua (CC), são elementos essenciais para a nossa vida, transmitindo grandes blocos de energia desde as unidades geradoras até os consumidores. Contudo, no caso das LT aéreas, ao longo do percurso da linha, em função de diversos condicionamentos técnicos requer-se estabelecer uma faixa contínua de passagem da linha. Tal faixa é caracterizada como um local com várias restrições de uso e ocupação, e, obviamente, faz parte do custo da linha.

Além disso, nas áreas urbanas há impactos socioeconômicos decorrentes da desapropriação e do uso do solo, que são maiores do que nas áreas rurais. Outra restrição forte se dá para a linha que atravessa regiões de preservação ambiental, nas quais a desapropriação deve ser mínima. Em função destes e de outros condicionamentos, em vários países, e no Brasil, há dificuldades para a liberação de novos corredores para a passagem de LT.

A determinação da faixa de passagem adequada é função de: parâmetros ambientais (densidade relativa do ar, velocidade do vento, temperatura ambiente, orografia, resistividade elétrica do solo etc); tipo de região e de obstáculo que a linha atravessa; quantidade e disposição espacial dos subcondutores em cada fase (ou polo, no caso de LT em CC); distâncias de isolamento entre fases e entre fase e terra; posicionamento das fases (em repouso e balanço); e corrente elétrica circulante e tensão elétrica em cada condutor da linha. Estes aspectos são retratados, em regime de operação normal da linha, pelo balanço dos condutores e pelos níveis de campo elétrico, campo magnético, rádio interferência, interferência em TV, ruído audível e corrente iônica (no caso de LT em CC) na vizinhança da linha. Há ainda os aspectos associados a situações transitórias ou temporárias, como quando da incidência de descargas atmosféricas, de manobras, de curtos-circuitos e de demais contingências programadas ou não na LT.

Não menos importante, no caso de LT existentes, em função do crescimento do aumento da demanda de energia (que pode ser acima das taxas de crescimento previstas), de eventuais indefinições de entrada de unidades geradoras e de outras linhas, da pressão pública para minimizar o uso de novas faixas de passagem, e da escassez de recursos e de prazos para execução dos serviços, sejam de manutenção, reforma ou construção, as empresas concessionárias são forçadas a utilizar a capacidade máxima dos sistemas existentes na sua área de concessão. Em decorrência, dentro da faixa de passagem existente, pode ocorrer a geração do campo eletromagnético e interferências associadas junto ao solo acima dos níveis máximos estabelecidos quando do projeto original da linha ou por alguma lei ou determinação que passe a ser vigente.

Portanto, no presente informe técnico, enfocando-se os itens acima, e tendo como diretriz pontos abordados no âmbito da comissão técnica de revisão da Norma Brasileira CE-003:011.001 (antiga NBR 5422 (1)) - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - e condicionamentos preconizados na Resolução Normativa ANEEL nº 915 (2), comentam-se e exemplificam-se configurações de LT que podem resultar na otimização da faixa de passagem de LT. Consideram-se alternativas de reposicionamento dos condutores da linha, adição de cabos condutores, otimização da geometria dos feixes de condutores das fases, entre outras. Essas alternativas podem ser utilizadas tanto para o projeto de novas LT como para as existentes, e são importantes para o processo de maximização da energia transportada por área ocupada pela faixa de passagem, tema bastante relevante na atualidade.

2.0 - CÁLCULO DA FAIXA DE PASSAGEM

A faixa de passagem de uma LT é a faixa de terra ao longo do eixo da LT, podendo ser de domínio ou de servidão e cuja largura deve ser no mínimo igual à largura da faixa de segurança da LT, que, por sua vez, deve considerar o maior valor obtido entre os calculados segundo os critérios limitantes de:

- rádio interferência (RI)
- ruído audível (RA)
- campo elétrico (CE)
- corrente iônica (CI) (no caso de LT em CC)
- campo magnético (CM)
- distância de segurança para balanço de cabos (BA)

Cada um destes valores pode ser calculado por métodos tridimensionais (3D) ou bidimensionais (2D). Os métodos 3D são naturalmente mais precisos, apesar de requerem grande esforço computacional e introdução de dados laboriosa, e por isso são geralmente empregados em análises específicas, como, p.ex.: para o estudo dos efeitos das cargas e correntes elétricas presentes nos elementos metálicos das torres, com impacto mais importante no campo superficial dos condutores e no campo eletromagnético no solo na região próxima da torre; para a análise detalhada do efeito da catenária dos cabos; para a consideração do efeito de obstáculos, construções, pessoas, animais, etc, na região do corredor ocupado pela LT ou imediatamente após o corredor; ou, no caso das LT em CC, para a consideração do efeito do vento em conjunto com as cargas elétricas nos cabos e no seu entorno. Uma vantagem adicional de uma modelagem 3D junto à torre é a maior precisão no cálculo das distâncias de isolamento, do balanço dos cabos e do deslocamento das cadeias de isoladores e jumpers, além de se incorporar adequadamente nesta região os efeitos de início da catenária dos cabos e do posicionamento dos estais.

Os métodos 2D clássicos são os mais utilizados e nos quais se representam apenas os cabos da linha, com “comprimento infinito” e paralelos ao solo, suposto plano; requerem pouco esforço computacional (exceto para o cálculo do CE e da CI em LT em CC quando são consideradas as cargas espaciais) e obviamente não permitem incorporar os efeitos das torres e sistemas de aterramento, embora estes efeitos sejam mais importantes nas regiões próximas das torres. Nesse caso, é típico considerar os cabos em uma das seguintes três “alturas”: máxima (junto à torre), média, ou mínima (a meio do vão para torres adjacentes com mesma altura). Do ponto de vista das soluções de engenharia, tais métodos 2D em geral têm precisão suficiente para vários estudos de projetos de LT, sobretudo porque ao longo da extensão da LT vários parâmetros utilizados no cálculo não são constantes e ainda variam no tempo, i.e., têm imprecisão intrínseca. Porém, deve-se ficar atento a qual “altura” utilizada para os cabos proporcionará resultados mais próximos daqueles obtidos da modelagem 3D para o cálculo em pauta. A título de exemplificação, empregando-se o programa computacional FDETP (3) obteve-se o efeito das torres e da catenária dos cabos no cálculo do CE máximo na superfície dos cabos de uma linha típica em 138 kV com torres autoportantes, 1 condutor por fase e vão de 300 m apresentado na Figura 1; e, na Figura 2, o CE a 1,5 m do solo para uma LT típica em 765 kV com torres estaiadas, 4 subcondutores por fase e vão de 450 m.

Note-se da Figura 1 que a modelagem alternativa e prática designada por “2D modificada” (3), que é uma extensão muito simples da modelagem 2D clássica, na qual apenas se varia a altura do cabo ao longo do vão, proporciona (para pontos distantes das torres) ao menos incorporar razoavelmente o efeito da catenária dos cabos; e, da Figura 2, o erro cometido ao se utilizar a modelagem 2D clássica, com os cabos na altura mínima (H_{\min}) e na altura média (H_{med}), respectivamente, sendo que adotando-se a modelagem 2D com H_{\min} conseguiu-se obter o perfil transversal do CE a meio do vão com margem de erro mínima.

No caso do CE nos cabos e junto à torre, como alternativa nessas soluções 2D para se levar em conta a eventual elevação do CE nos cabos junto à torre, que variará numa ou noutra fase da LT, que depende se há elementos metálicos da torre entre as fases, que depende de várias outras questões geométricas e da existência de dispositivos de proteção e de blindagem instalados junto às cadeias de isoladores, e que ainda é função das flutuações típicas de aumento da tensão nos condutores ao longo do tempo e ao longo da LT, pode-se utilizar um fator de segurança (f_s) um pouco maior do que 1 (um), cujo valor será obtido a partir da modelagem 3D mais rebuscada. Para o exemplo da Figura 1 este efeito da torre poderia ser representado por f_s da ordem de 1,05.

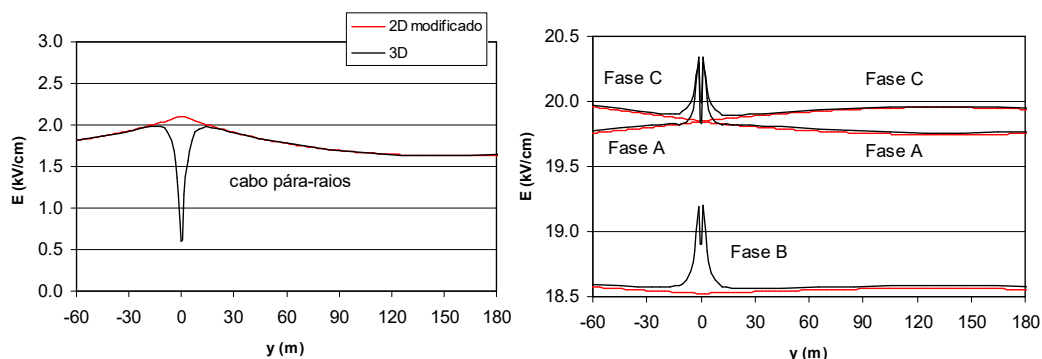


FIGURA 1 – Variação do campo elétrico superficial máximo nos cabos ao longo do comprimento da linha em 138 kV

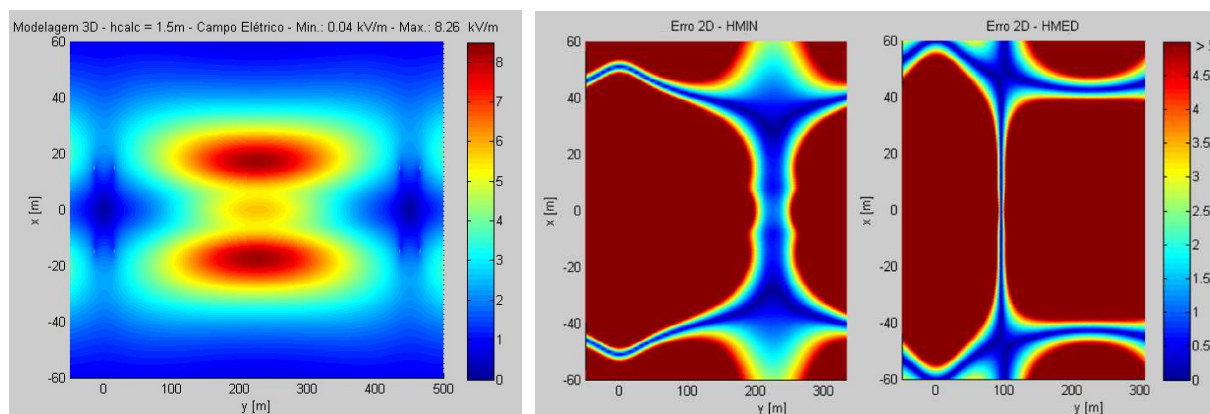


FIGURA 2 – Variação do campo elétrico a 1,5 m do solo para uma LT em 765 kV – esquerda: modelagem 3D; direita: erros ao se usar a modelagem 2D clássica com os cabos na altura mínima (Hmin) e altura média (Hmed)

2.1 - Balanço dos Cabos

A largura da faixa de passagem da LT é condicionada pelo balanço dos cabos condutores (BA) causado pela ação do vento nos cabos e nas cadeias de isoladores. Tão mais intensa é a velocidade do vento, tão maior será a largura de faixa BA. O vento também é um dos elementos mais impactantes no custo de instalação de uma LT.

O cálculo desta largura de faixa envolve as projeções horizontais das distâncias entre as fases, as projeções horizontais dos balanços dos cabos (com as suas flechas) e da cadeia de isoladores (se esta for móvel) e uma parcela de espaçamento em ar que é função da tensão ou de sobretensão na LT. Deve-se também considerar o ângulo de deflexão da LT. A metodologia de cálculo da NBR 5422 (1) ainda é bastante empregada nos projetos de LT, considerando-se usualmente a velocidade do vento com tempo de retorno de 50 anos e tempo de integração de 30 s corrigida para a altura dos cabos. Porém, especialmente para a inclusão da efetividade do vento nos cabos ao longo do vão da LT, no âmbito da revisão da NBR 5422 tem-se atuado na proposição de uma modelagem mais precisa.

Observe-se que na região junto à torre e no caso de torres estaiadas haverá uma faixa de passagem mínima limitada pelos pontos de ancoragem dos estais junto ao solo.

Portanto, do ponto de vista de BA, a despeito da necessidade dos vários cheques que deverão ser feitos em sequência, a redução da largura da faixa pode ser obtida por:

- Uso de cadeias de isoladores em V ao invés de cadeias em I
- Uso de vãos com comprimentos menores
- Uso de fases dispostas verticalmente
- Redução da distância entre fases (compactação)
- Uso de torres autoportantes

2.2 - Campo Elétrico, Campo Magnético, Rádio interferência, Ruído Audível e Corrente Iônica

Para cada um destes cinco parâmetros, a respectiva faixa de passagem deverá ser tal que não se ultrapasse o valor limite ou nível de referência recomendado em norma, lei ou documento técnico específico.

Para os exemplos de LT analisados neste informe técnico consideraram-se soluções 2D comentadas no início deste item 2 e os limites de CE e CM estabelecidos na RN ANEEL nº 915 para CC e CA 60 Hz, sendo (2):

No limite da faixa de passagem:

- CE_{lim} – CA: 4,17 kV/m; CC: 5 kV/m
- CM_{lim} – CA: 200 μ T; CC: 118.000 μ T (cabeça e tronco)

No interior da faixa de passagem:

- CE_{slim} – CA: 8,33 kV/m; CC: 20 kV/m (com cargas espaciais)
- CM_{slim} – CA: 1000 μ T; CC: 353.000 μ T (cabeça e tronco)

Ainda conforme a RN ANEEL nº 915, esses cálculos devem ser feitos com:

- a) tensão nominal
- b) temperatura máxima admissível de projeto
- c) carregamento máximo do condutor para os regimes de operação e emergência
- d) a distância mínima do condutor ao solo
- e) configuração típica dos circuitos e sequência de fases associadas
- f) 1,5 m de altura do nível do solo para a população em geral

Vale registrar que para o caso das LT em CC a prática das medições de CE é realizá-las ao nível do solo, com a sonda e o plano aterrado sobre a superfície do solo. E, do ponto de vista da maior solicitação, o CE deveria ser calculado para a tensão máxima.

Para os valores de RI e RA no limite da faixa de passagem, os valores dispostos mais recentemente nos textos dos leilões de LT da ANEEL, e nos requisitos do ONS para LT (4), considerando o cálculo para a tensão máxima, são:

- RI_{lim} – CA, CC: 42 dB/1 μ V/m (sinal/ruído 24 dB/1 μ V/m; 50 % das condições climáticas durante o ano; 1 MHz)
- RA_{lim} – CA: 58 dB(A) (condutor molhado); CC: 42 dB(A) (tempo bom)

Por outro lado, também no âmbito da revisão da NBR 5422 tem-se discutido o emprego dos limites para interferência eletromagnética preconizados na Portaria ANATEL 50637/2015 (5), a qual indica utilizar a Norma CISPR 18-2 (6). Nesse caso, no limite da faixa ter-se-ia o limite de RI_{lim} (0,5 a 1,7 MHz) para CA e CC de 28 dB/1 μ V/m (relação sinal/ruído 26 dB/1 μ V/m).

Para a corrente iônica em LT em CC, têm-se sugerido em publicações técnicas limites da ordem de 5 e 100 nA/m² (7) sobre a superfície do solo e no limite e no interior da faixa de passagem, respectivamente, e com a modelagem por cargas espaciais na condição atmosférica mais desfavorável (verão úmido) em 95% da probabilidade de não ser excedida.

3.0 - ALTERNATIVAS PARA A OTIMIZAÇÃO DA FAIXA DE PASSAGEM

Em princípio, há diversas alternativas construtivas e operacionais que culminarão na otimização da largura necessária da faixa de passagem de um LT. Várias destas alternativas estão associadas com soluções para aumento da capacidade de transmissão da LT (8, 9, 10).

Algumas dessas alternativas estão abordadas sumariamente nos itens a seguir, considerando LT novas ou existentes. Embora aqui apenas alguns condicionamentos técnicos de cada alternativa sejam mencionados, é importante citar que a implementação prática de cada alternativa exige uma gama grande de avaliações, que devem incluir o exame das distâncias mínimas entre condutores e entre condutores e partes aterradas, e aspectos de segurança, confiabilidade, estética, ambiente, custo, operação e manutenção da LT.

Outras alternativas também poderiam ser empregadas para a análise em pauta, mas cuja descrição foge do escopo simplista deste informe técnico. Estas alternativas envolvem p.ex. blindagens dos campos elétrico e magnético gerados pela linha, o emprego de cabos com elevado fator de estado da superfície, o uso de coberturas isolantes nos cabos, o uso de cabos com outras características especiais etc.

Considerando distâncias entre fases (ou polos) típicas, número de cabos por feixe típicos, e feixes de cabos circulares com espaçamentos convencionais (18") ou expandidos (> 18"), a Tabela 1 resume a influência típica de algumas destas alternativas em: campo elétrico máximo na superfície dos cabos (CE_c); nível de $CE_{máx}$ máximo junto ao solo; níveis de CE_f , CM_f , RI_f e AN_f junto ao solo e na faixa; comprimento da faixa por balanço de cabos (BA). Para feixes com espaçamentos inferiores pode ocorrer influência inversa de alguma alternativa nalguns parâmetros.

TABELA 1 – Influência típica das alternativas (↑: aumento; ↓: decréscimo; ↗: leve aumento; ↘: leve decréscimo)

Alternativa		CE_c	$CE_{máx}$	CE_f	CM_f	RI_f	RA_f	BA
Tensão	↓	↓	↓	↓	↗	↓	↓	↘
Altura cabo-solo	↑	~	↓	↘	↘	↘ ↗	↘	~
Seção transversal total dos cabos (S_T)	↑	↓	↗	↗	=	↘	↘	↘ ↗
Nº de cabos por feixe (mesma S_T)	↑	↓	↑	↑	=	↓	↓	↘ ↗
Distância entre fases (ou polos)	↓	↗	↘	↘	↘	↗	↗	↓
Espaçamento entre cabos	↑	↑	↘	↗	↘	↗	↗	↗

3.1 - Redução da tensão

A redução da tensão de operação da linha reduz proporcionalmente as cargas elétricas em todos os cabos da LT, e, consequentemente, o CE_c na superfície dos cabos. Portanto, os níveis de CE, RI e RA junto ao solo serão também reduzidos, e, consequentemente, as faixas de passagem associadas a cada um destes parâmetros. De fato, similarmente aos itens 3.4 e 3.5, qualquer alteração na linha que resulte na redução do CE_c tende a reduzir os níveis de RI e RA junto ao solo, embora nalguns casos possa elevar um pouco o nível de CE junto ao solo.

Condicionamentos técnicos da alternativa: Apesar de não exigir o desligamento da linha, necessita estudo da viabilidade sistêmica da operação da linha com a nova tensão. Note-se que emprego de uma tensão inferior reduzirá a capacidade de transmissão da LT, e, para a mesma potência de transmissão, aumentarão as perdas elétricas por efeito Joule nos cabos da linha, e seus consequentes custos ao longo da vida útil da LT.

3.7 - Elevação das torres

Elevando-se a altura das torres da linha, e, com isto, aumentando-se as distâncias cabo-solo, reduz-se o campo eletromagnético junto ao solo. Apesar desta redução ser mais efetiva na região do centro da linha, pode-se conseguir redução importante das faixas de passagem da linha associadas aos níveis de CE, CM, RI, RA e CI, caracterizando-se assim como uma alternativa interessante para vãos críticos da linha. Esta também pode ser a melhor solução nos casos em que se depara com regiões de preservação ambiental, onde altear substancialmente as torres pode ser economicamente mais atrativo do que desviar substancialmente o traçado da LT.

Condicionamentos técnicos da alternativa: i) Necessita desligamento da linha; ii) necessita reavaliação de esforços na torre e é mais funcional para alguns tipos de torres, como, e.g., para torres autoportantes, onde um módulo adicional prismático junto à cintura da torre pode ser instalado.

3.2 - Retracionamento dos cabos

Consiste no aumento da tração de trabalho dos cabos condutores e dos cabos para-raios, ocasionando também o aumento das distâncias cabo-solo. Consequentemente, reduz-se o nível do campo eletromagnético junto ao solo e a largura da faixa de passagem em geral.

Condicionamentos técnicos da alternativa: i) A tração dos cabos deve ficar dentro do limite de operação física dos cabos (alguns percentuais da carga de ruptura dos cabos); ii) exige a verificação do maior carregamento longitudinal nas torres; iii) pode exigir o emprego de amortecedores nos cabos.

3.3 - Raspagem do solo

Consiste na raspagem do solo, provocando-se a elevação da altura cabo-solo “efetiva”, e, com isso, a redução do nível do campo eletromagnético junto ao solo nesta região. Pode-se ainda substituir as cadeias de suspensão por cadeias de ancoragens “móveis” ou “falsas”.

Condicionamentos técnicos da alternativa: i) Não necessita obrigatoriamente o desligamento da linha; ii) pressupõe que não há problemas ambientais ou travessias; iii) deve-se verificar se há variações importantes na carga de tração dos cabos ao se usar as cadeias de ancoragens “móveis”.

3.4 - Substituição dos cabos condutores

Consiste em substituir o cabo condutor por outro de bitola maior, o que proporcionará a redução de CE_c na superfície dos cabos, e, consequentemente, a redução das faixas de passagem associadas a RI e RA. Também pode ser viável fazer esta substituição por um cabo especial, que opere com menor flecha, conseguindo-se um efeito semelhante ao do item 3.2.

Condicionamentos técnicos da alternativa: i) Necessita desligamento da linha; ii) preferencialmente, deve-se utilizar um novo cabo com aproximadamente mesmos peso e diâmetro do original para minimizar: o aumento de carregamento da torre (vertical e transversal), o reforço físico da mesma e de sua fundação, o aumento da flecha do cabo, o aumento de vibração do cabo, e a redução da capacidade de ancoragem das cadeias de isoladores.

3.5 - Aumento do número de cabos condutores por feixe

Entre várias possibilidades, citam-se aqui duas, respectivamente:

a) No caso de haver apenas um cabo condutor por feixe, sem retirar este cabo, pode-se formar um feixe de dois cabos condutores. Ou seja, lança-se mais um cabo condutor, se possível com bitola menor (para não aumentar substancialmente os esforços na torre), por exemplo na vertical e grampeado embaixo do cabo original.

b) No caso de haver um ou mais cabos por feixe, retirando-se estes cabos, instala-se um número maior de cabos. Também para se minimizar o aumento de esforços na torre, deve-se procurar usar cabos condutores com bitola menor à bitola do cabo original, tal que, para o novo feixe, as somas de bitolas e de pesos sejam da ordem de grandeza dos respectivos valores do cabo ou feixe original.

Nessas duas situações, além de efeitos claros de melhoria do limite térmico da linha, e, no caso de linhas em CA, da melhoria da potência característica da linha (P_c), consegue-se reduzir o CE_c na superfície dos cabos. Assim também se consegue reduzir os níveis de RI e RA junto ao solo, embora o nível de CE junto ao solo possa aumentar um pouco.

Além disso, é natural que a alteração ou inclusão de feixes de cabos na linha demande custo de implementação relativamente elevado, embora nestes casos esta alternativa possa ser aplicada apenas em alguns vão da linha em que realmente seja necessário reduzir os níveis de RI e RA junto ao solo.

Condicionamentos técnicos da alternativa: i) Necessita desligamento da linha; ii) deve-se checar se o CE e a temperatura na superfície dos cabos dos novos feixes encontram-se dentro dos limites aceitáveis, a alteração das distâncias de isolamento entre fases, e a necessidade de se elevar os feixes para que se atendam as distâncias cabo-solo mínimas; iii) deve-se avaliar a vida útil dos componentes da linha que serão reaproveitados, e considerar-se a eventual troca de todos estes componentes para minimização de custo a longo prazo.

3.6 - Redução das distâncias entre fases ou reposicionamento das fases

O posicionamento das fases (ou polos) de uma LT tem uma influência muito forte no nível do campo eletromagnético junto ao solo. No caso de LT em CA, a alternativa de redução das distâncias entre fases, ou compactação da linha, teve sua motivação inicial nas décadas anteriores, com os estudos de melhoria do espaço físico ocupado pela linha e da capacidade de transmissão da linha. Nesse ensejo, além de haver várias opções de torres, há o uso combinado de isoladores entre fases e do uso de mísulas isolantes, onde os cabos são fixados diretamente na mísula. Assim se pode reduzir substancialmente as distâncias entre cabos e partes aterradas, e o que pode ter efeito na otimização da faixa de passagem da LT.

Porém a substituição de uma torre por outra requer uma série de estudos elétricos, mecânicos e econômicos, além de aspectos de manutenção e sistêmicos, e verificar se a estratégia pode ser utilizada pela maioria das torres que constituem a “família” de torres utilizada em determinada LT. Por exemplo, uma torre estaiada que se apresenta muito atrativa do ponto de vista da compactação de fases e que tenha custo de instalação reduzido, mas que pode ser apenas utilizada em alinhamento ou quase em alinhamento da LT e que pode ter manutenção difícil.

Em síntese, tão mais compacta é a linha e tão mais simétrica espacialmente é a disposição das fases da linha, tão mais equilibradas tendem a ser correntes nas fases da linha, e em princípio menores são os níveis de CE e CM junto ao solo. Esse efeito ocorre em função da melhor distribuição das cargas e correntes nas fases da linha. No caso da

linha ser constituída por circuitos múltiplos, ou de haver linhas em paralelo, há ainda o efeito benéfico da adoção adequada dos ângulos de fase para cada circuito por forma a se reduzir p.ex. o CE junto ao solo.

Contudo, a compactação das fases pode provocar um aumento substancial do CE_c na superfície nos cabos, com isso elevar os níveis das interferências junto ao solo, e, conseqüentemente, das faixas de passagem associadas.

Condicionamentos técnicos da alternativa: i) Necessita desligamento da linha; ii) deve-se respeitar os limites da compactação tendo em vista a viabilidade das distâncias de isolamento resultantes entre cabos (de fases ou polos diferentes) e entre cabos e terra para a tensão de operação da linha, para as sobretensões existentes na linha, e para as necessidades de manutenção da linha viva; iii) por condicionamentos de isolamento, a redução das distâncias entre fases pode necessitar um número maior de cadeias de isoladores e pode exigir a redução do comprimento dos vãos da linha, e, conseqüentemente, um número maior de torres, o que aumentará o custo de instalação da LT; iv) deve-se checar o surgimento de oscilações de sub-vão e efeitos de "galloping" nas fases.

3.8 - Otimização da geometria dos feixes de cabos das fases

Para LT em CA, a despeito das facilidades comentadas nos itens 3.4 a 3.6, as alternativas usuais do aumento do número de cabos por feixe (mantendo-se o tradicional feixe circular) ou de compactação da linha não exploram todo o potencial destas técnicas. Porém, pode-se combinar estes procedimentos com a otimização da geometria dos feixes (11, 12), explorando-se ao máximo o limite de CE_c na superfície dos cabos, respeitando-se as distâncias de isolamento e os limites do campo eletromagnético junto ao solo (12), e investigando-se o impacto no custo da LT (13). Apesar desta alternativa ter sido proposta inicialmente para aumento da capacidade da LT por intermédio do aumento da potência característica (P_c) da LT, ela também pode ser empregada para o melhor aproveitamento do espaço físico requerido pelo corredor de transmissão, como vem sendo utilizado no Brasil. Por outro lado, pela sua natureza (ainda) de inovação do feixe de cabos, no caso de linhas existentes, esta alternativa requer análise técnica-econômica pormenorizada, e seja para LT novas ou existentes, deve-se sempre fazer o confronto desta solução com a alternativa tradicional de se incluir compensação reativa na LT.

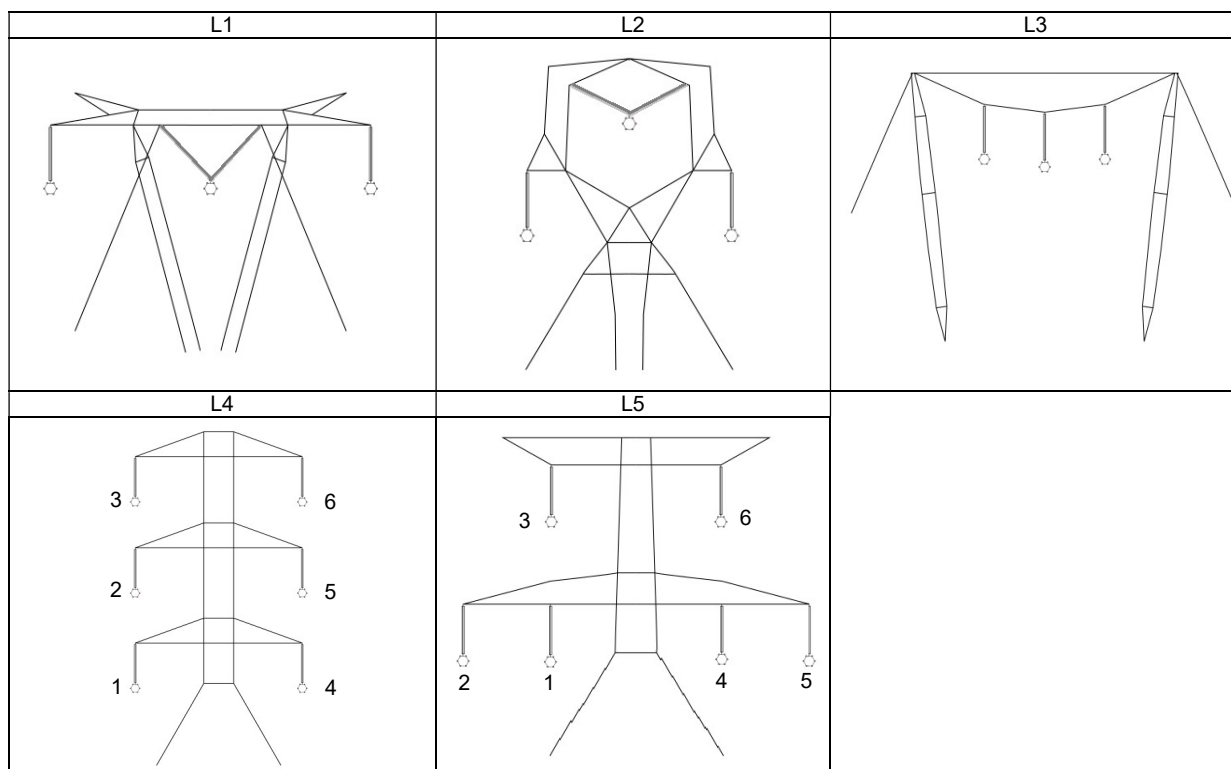
Além disso, a otimização dos feixes, por exemplo na sua forma mais simples que é a de expandir as dimensões dos feixes, pode provocar a elevação do nível das interferências junto ao solo, aumentando este impacto ambiental. Portanto, em situações com maiores restrições desta natureza uma sub-otimização dos feixes da LT pode ser a melhor alternativa.

Condicionamentos técnicos da alternativa: São basicamente os mesmos dos itens 3.4 a 3.6, além da eventual necessidade de desenvolvimento e fabricação de ferragens especiais, embora já existam no Brasil muitas LT com feixes não convencionais de cabos, especialmente circulares e quase circulares expandidos.

4.0 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Como exemplos de aplicação de algumas das estratégias listadas no item 3, consideraram-se os cinco casos de LT em 500 kV CA ilustrados na Tabela 2, com os tipos convencional C1 e com otimização simples O1, O2 e O3 com feixes com o formato circular simétrico, conforme os casos da Tabela 4. Todas as análises foram executadas com o Sistema Computacional ELEKTRA (11).

TABELA 2 – Casos base estudados



Numa primeira etapa, para o Caso L1 e tipo C1, analisou-se o impacto de dois parâmetros ambientais com forte influência nas dimensões da torre e, portanto, na faixa de passagem da LT, ou seja:

- Nível de poluição: sem poluição, leve, média e alto
- Velocidade do vento (50 anos; 30 s): 80, 108, 115 e 125 km/h

Considerando os limites de CE, CM, RI e RA citados no item 2.2, obtiveram-se os resultados da Tabela 3, sendo:

- h_{min} : altura mínima cabo-solo a meio do vão, para atendimento dos critérios de máximos CE e CM (m)
- f_B : faixa de segurança devido ao balanço dos cabos (m)
- f_F : faixa de segurança final, resultado do maior valor entre f_B e as faixas devidas aos critérios limitantes de CE, CM, RI e RA (m)
- RI_f , RA_f , CE_f , CM_f : valores de RI (dB/1 μ V/m), RA (dB(A)), CE (kV/m) e CM (μ T) no limite de f_F , respectivamente

Pode-se observar claramente o impacto do aumento do nível de poluição e da velocidade do vento no aumento da faixa de passagem da LT. Note-se que nesta análise utilizaram-se os mesmos isoladores, ocorrendo o aumento do comprimento da cadeia e consequentemente da distância entre fases com o aumento do nível de poluição. Um outro tipo de enfoque seria utilizando-se isoladores com maior capacidade anti-poluição, onde este impacto na faixa de passagem seria menor porém com diferente influência no custo de instalação da LT.

TABELA 3 – Influência do nível de poluição e da velocidade do vento na faixa de passagem (caso L1 C1; 4 x Rail; 18")

Poluição	h_{min}	f_B	f_F	RI_f	RA_f	CE_f	CM_f	Vento	h_{min}	f_B	f_F	RI_f	RA_f	CE_f	CM_f
sem	12,9	48,2	48,2	38	46	3,4	7,6	90	12,9	43,7	43,7	40	46	4	8,7
leve	13,0	49,9	49,9	37	45	3,2	7,5	108	13,0	49,9	49,9	37	45	3,2	7,5
médio	13,1	51,7	51,7	36	44	3,1	7,4	115	13,1	54,2	54,2	36	44	2,8	6,7
alto	13,3	54,0	54,0	36	43	3,0	7,2	125	13,2	58,8	58,8	34	44	2,40	6,0

Em seguida, analisaram-se todos os casos constantes na Tabela 4, sendo:

- Dados básicos:

- Tensão de operação nominal/máxima: 500/550 kV
- ns: número de subcondutores por feixe
- Potência transmitida por circuito: 1200 MW (ns = 4) e 1600 MW (ns = 6)
- Fator de potência: 0,95
- Sobretensões manobra fase-terra (base fase-terra pico): $\mu = 1,9$ pu; $\sigma = 10\%$
- Sobretensões manobra fase-fase (base fase-fase pico): $\mu = 3,3$ pu; $\sigma = 10\%$
- Nível de poluição: leve
- Isoladores: diâmetro = 0,255 m, altura = 0,146 m, distância de escoamento = 0,320 m, peso = 4 kgf

- Distância mínima para manutenção em linha viva: 3,5 m
- Relação limite entre o campo elétrico superficial máximo entre todos os cabos de fase (CE_c) e o campo elétrico superficial crítico: 0,95
- Coeficiente de rugosidade da superfície dos cabos: 0,8
- Vão médio: 450 m; Vão de peso / vão de vento: 0,7
- Velocidades do vento: baseadas em 108 km/h (50 anos; 30 s)
- Temperaturas: 29 °C (média das máximas); 22 °C (média); 17 °C (média das mínimas)
- Densidade relativa do ar: 0,92
- Cálculo do balanço de cabos (f_B): metodologia de (1)
- Cálculo de RI e RA: metodologia de (14)
- Seleção econômica dos cabos de fase:
 - Fases: cabos CAA, com bitolas variando de 41 a 2515 MCM; Para-raios: 3/8" AER
 - Fator de perdas: 0,4
 - Metodologia para a estimativa do custo de instalação das LT (C_{inst}): processo e banco de preços da ANEEL para 03/2021 (15, 16). Para todos os casos das LT em circuitos simples (L1, L2, L3), com torres estaiadas, considerou-se fatores de aumento de materiais (isoladores, torres, fundação e ferragens) entre 5 e 10% para levar em conta a participação de torres autoportantes. Para o caso das LT em circuito duplo (L4, L5) considerou-se 100% de torres autoportantes. Considerou-se o terreno plano e o mesmo vão médio para todos os casos.
 - Custos de aquisição de ferragens, espaçadores e amortecedores para feixes não convencionais: com aproximações a partir de valores de feixes convencionais
 - Custo das perdas de energia: 187,46 R\$/MWh
 - Vida econômica da LT: 30 anos
 - Taxa econômica: 8% a.a.

E sendo os demais parâmetros investigados:

- Cabo: código do cabo CAA
- d_H : projeção horizontal da distância entre centros de fases (m)
- d_V : projeção vertical da distância entre centros de fases (m)
- s_e, s_i : espaçamento entre subcondutores para as fases externas e para a fase interna, respectivamente (m)
- P_c : potência característica - SIL (MW)
- CE_c : campo elétrico superficial máximo entre todos os cabos de fase (kV/cm)
- P_c/f_F : fator de eficiência dado pela relação entre P_c e f_F (MW/m)
- P_c/C_{inst} : fator de eficiência dado pela relação entre P_c e C_{inst} (MW/(1000 R\$/km))

Os cabos que constam para cada exemplo são aqueles que resultaram no menor custo de instalação da LT adicionada do custo das perdas elétricas Joule e corona nos cabos (ou com custo muito próximo deste mínimo). Considerando o teor didático dos dados que foram empregados, pôde-se estabelecer as seguintes conclusões básicas:

- LT com circuito simples (L1, L2, L3):
 - Altura mínima cabo-solo: para todos os casos foi determinada em função do limite do campo elétrico máximo junto ao solo (CE_{slim}) igual a 8,33 kV/m.
 - Faixa de passagem: como esperado, para este nível de tensão em 500 kV, para a maioria dos casos com feixes convencionais o critério limitante foi por balanço de cabos, e para os casos com alguma ou maior otimização foi o critério de RI.
 - Expansão dos feixes: a simples expansão dos feixes provoca o esperado aumento na P_c , porém também eleva o CE junto ao solo, provocando a torre ser um pouco mais alta, e mais custosa, e eleva os níveis RI e RA junto ao solo, provocando a faixa ser um pouco maior. Mesmo assim os fatores de eficiência P_c/f_F e P_c/C_{inst} se mantêm elevados.
 - Tipo de torre: em relação a torre tradicional com fases horizontais (L1), as torres cara de gato (L2) e cross-rope (L3) apresentaram os maiores fatores de eficiência P_c/f_F e P_c/C_{inst} , com vantagem da torre cross-rope para o número mais elevados de cabos por feixe. Porém, a facilidade de construção da torre cara de gato (L2) nas suas versões estaiada e autoportante melhora a sua competitividade, sobretudo para uma quantidade menor de cabos por feixe, quando a faixa de passagem se mostrou menor.
- LT com circuito duplo (L4, L5):
 - Altura mínima cabo-solo: para todos os casos foi determinada em função do limite CE_{slim} igual a 8,33 kV/m.
 - Faseamento: Para a torre tradicional com fases verticais (L4), em relação ao faseamento ABC-ABC o faseamento de uso mais comum ABC-CBA conduz a um leve aumento do nível de CM junto ao solo, a uma sensível redução do CE nos cabos para-raios e, como esperado, ao menor nível de CE junto ao solo, o que permite a torre ficar mais baixa (cerca de 1,5 m) e menos custosa, posto que o CE junto ao solo foi o critério limitante para a altura mínima cabo-solo nestes exemplos em 500 kV. A faixa de passagem sofreu alteração mínima. O faseamento ABC-BCA (ou ABC-CAB) conduz a resultados apenas um pouco melhores do que os do ABC-ABC, mas ainda assim inferiores aos do ABC-CBA. Para a torre danúbio (L5) obtiveram-se essas mesmas conclusões obtidas para a torre com fases verticais; sendo, portanto, também recomendado o faseamento ABC-CBA.
 - Faixa de passagem: semelhante à conclusão para circuito simples, mas com maior dominância do critério de RI.

- Expansão dos feixes: a simples expansão dos feixes dos feixes provoca o esperado aumento na P_c , porém também eleva o CE junto ao solo, provocando a torre ser um pouco mais alta, e eleva os níveis RI_f e RA_f junto ao solo, provocando a faixa ser um pouco maior. Porém, no caso da torre tradicional com fases verticais (L4), o fator de eficiência P_c/f_F decresce muito, mas para a torre danúbio (L5) este fator P_c/f_F se mantém elevado. Em ambos os modelos de torre o fator de eficiência P_c/C_{inst} se mantém, com vantagem da torre danúbio.
- Tipo de torre: em relação à torre danúbio (L5), a torre tradicional com fases verticais (L4) tende a ter a altura mínima h_{min} um pouco mais elevada e a ter a faixa de passagem menor. Como esses dois aspectos influenciam opostamente no custo C_{inst} , mas o primeiro é mais impactante, para a torre danúbio (L5) o fator de eficiência P_c/C_{inst} é um pouco maior, mas o fator de eficiência P_c/f_F é menor.

TABELA 4 – Resultados principais para os casos base estudados

Nº	Torre	Tipo	n_s	Cabo	d_H	d_V	s_e	s_i	P_c	h_{min}	CE_c	f_B	f_F	RI_f	RA_f	CE_f	CM_f	P_c/f_F	P_c/C_{inst}
1	L1	C1	4	Rail	10,4	1,0	18"	18"	1018	13,0	16,3	49,9	49,9	37	45	3,2	7,5	20,4	0,60
2		C1(*)	4	Bluejay	10,2	1,0	18"	18"	1027	13,0	15,3	48,5	48,5	36	44	3,4	7,7	21,2	0,55
3		O1	4	Rail	11,2	0,7	0,9	0,9	1141	14,0	17,4	52,3	52,3	40	48	3,5	7,2	21,8	0,66
4		O2	4	Rail	11,9	0,4	1,4	1,2	1218	14,7	18,1	54,5	55,6	42	50	3,6	6,7	21,9	0,70
5	L2	C1	4	Rail	7,4	7,3	18"	18"	1043	12,6	16,5	43,9	43,9	39	46	2,9	6,5	23,8	0,61
6		C1(*)	4	Bluejay	7,2	7,2	18"	18"	1053	12,6	15,5	42,4	42,4	38	45	3,1	6,7	24,8	0,56
7		O1	4	Rail	8,0	7,7	0,9	0,9	1172	13,7	17,7	45,8	45,8	41	49	3,3	6,3	25,6	0,67
8		O2	6	Tern	7,9	7,5	18"	18"	1172	13,7	14,0	46,7	46,7	27	38	3,1	8,1	25,1	0,57
9	L3	O3	6	Tern	9,0	8,1	0,9	0,9	1346	15,0	15,5	49,7	49,7	31	42	3,5	7,8	27,1	0,63
10		C1	4	Bluejay	5,7	0,9	18"	18"	1194	10,4	18,4	39,2	48,3	42	52	1,9	4,3	24,7	0,64
11		O1	4	lapwing	6,7	1,1	1,2	1,2	1448	11,7	18,0	39,6	58,8	42	54	1,8	3,4	24,6	0,62
12		O2	6	Tern	6,3	1,0	0,6	0,6	1450	11,5	17,7	43,4	43,4	39	50	3,1	7,1	33,4	0,73
13	L4	O3	6	Tern	6,8	0,5	1,2	0,5	1592	14,0	18,9	45,7	45,7	40	52	3,6	6,5	34,8	0,79
14		C1(1)	4	Rail	7,4	9,4	18"	18"	1046	15,7	16,5	46,4	46,4	40	47	1,8	8,6	22,5	0,31
15		C1(2)	4	Rail	7,4	9,4	18"	18"	1046	12,1	16,5	46,0	46,0	41	50	1,6	4,8	22,7	0,32
16		C1(3)	4	Rail	7,4	9,4	18"	18"	1046	12,7	17,1	46,1	50,5	42	50	1,1	5,9	20,7	0,32
17		O1(2)	4	Rail	7,6	9,6	0,6	0,6	1097	12,4	16,9	46,6	46,6	41	51	1,7	4,7	23,5	0,33
18		O1(2)*)	4	Ortolan	7,5	9,6	0,6	0,6	1100	12,5	16,4	45,9	45,9	41	50	1,7	4,8	19,5	0,35
19		O2(2)	4	Rail	7,9	10,0	0,9	0,9	1179	13,0	17,8	47,8	60,5	42	52	0,7	3,0	19,5	0,35
20		O2(2)*)	4	Bunting	7,7	10,0	0,9	0,9	1189	13,1	16,3	45,5	45,5	42	51	2,1	4,9	26,1	0,31
21	L5	O3(2)	4	Rail	8,1	10,3	1,1	1,1	1222	13,3	18,4	48,6	70,5	42	53	0,4	2,2	17,3	0,36
22		C1(1)	4	Rail	5,7	11,5	18"	18"	1109	12,6	18,3	55,3	67,4	42	52	1,2	4,9	16,5	0,37
23		C1(2)	4	Rail	5,7	11,5	18"	18"	1109	11,1	18,4	55,1	66,3	42	53	1,1	3,6	16,7	0,37
24		C1(3)**)	4	Rail	5,7	11,5	18"	18"	1109	11,6	19,0	55,1	63,9	42	53	1,7	5,2	17,4	-
25		O1(2)	4	Ortolan	5,9	11,7	0,6	0,6	1168	11,5	18,3	55,3	68,0	42	53	1,1	3,5	17,2	0,37
26	L5	O2(2)	4	Bunting	6,3	12,3	0,9	0,9	1263	12,1	18,3	55,9	71,7	42	54	1,2	3,3	17,6	0,36
27		O3(2)	4	Bittern	6,6	12,7	1,1	1,1	1313	12,4	18,4	56,6	74,7	42	54	1,2	3,1	17,6	0,36

(*) Caso incluído para fins de comparação entre casos; não corresponde ao menor custo total da configuração

(**) Caso com CE_c superior ao valor crítico; (1), (2), (3): Faseamentos 123-456: (1) ABC-ABC; (2) ABC-CBA; (3) ABC-BCA, ABC-CAB

5.0 - CONCLUSÕES

Das análises de configurações de LT efetuadas neste informe técnico, confirmou-se configurações simples de LT que permitem promover a otimização da faixa de passagem, mantendo-se a relação entre a capacidade de transmissão da LT e a faixa, ou a relação entre o custo de instalação da LT e a faixa. Essas alternativas podem ser utilizadas tanto para o projeto de novas linhas como para as existentes, e são importantes para o processo de maximização da energia transportada por área ocupada pela faixa de passagem, tema bastante relevante na atualidade. Apesar do enfoque ter sido em LT em 500 kV, com distâncias entre fases tradicionais e reduzidas, com circuitos simples e duplos, com feixes circulares tradicionais ou expandidos, com número tradicional e elevado de subcondutores por fase, e com diferentes tipos de torres metálicas, grande parte das conclusões aqui estabelecidas podem ser estendidas para LT em outros níveis de tensão.

6.0 - REFERÊNCIAS

- (1) ABNT, Norma Técnica Brasileira NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, 1985.
- (2) ANEEL, Resolução Normativa nº 915, 23 de fevereiro de 2021.
- (3) J. C. Salari, "Comparative analysis of 2- and 3-D methods for computing electric and magnetic fields generated by overhead transmission lines", IEEE Trans. Power Del., v.24, n.1, pp.338-344, Janeiro, 2009.
- (4) ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Submódulo 2.7 – Requisitos mínimos para linhas de transmissão, Revisão nº 12, 2020.
- (5) ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações, Portaria nº 50367, dezembro, 2015.

- (6) IEC, "Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipamento - Part 2: Methods of measurement and procedure for determining limits", CISPR TR 18-2, 2017.
- (7) Cigré, "Impact of HVDC lines on the economics of HVDC projects", Joint Working Group, Technical Brochure nº 388, Agosto, 2009.
- (8) Cigré, "Guidelines for increased utilization of existing overhead transmission lines", Working Group B2.13, Technical Brochure nº 353, 2008.
- (9) Cigré, "Compact DC overhead lines", Working Group B2.62, Technical Brochure nº 831, 2021.
- (10) Cigré, "Compact AC overhead lines", Working Group B2.63, Technical Brochure nº 792, 2020.
- (11) G. N. Aleksandrov, G. V. Podporkin, Y. G. Seleznev, "Shape optimization of overhead transmission line bundled conductors", *Elektrichestvo*, n. 10, pp. 1-14, 1988.
- (12) J. C. Salari, "Otimização da Geometria dos Feixes de Linhas de Transmissão", Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Brasil, 1993.
- (13) J. C. Salari, A. L. E. Reis, L. F. Estrella Jr, "Metodologia sistematizada para a otimização técnico-econômica da geometria dos feixes de condutores de linhas de transmissão aéreas", XVIII ERIAC, Foz do Iguaçu, Brasil, 2019.
- (14) EPRI, "AC Transmission Line Reference Book- 200 kV and Above", Third Edition, 2005.
- (15) ANEEL, "Estabelecimento da Metodologia de Definição do Banco de Preços de Referência ANEEL a ser Utilizado nos Processos de Autorização, Licitação e Revisão Tarifária das Concessionárias de Transmissão de Energia Elétrica", Nota Técnica no. 099-SRT/ANEEL, 2008.
- (16) EPE, "Banco de Preços de Referência da ANEEL: Atualização dos Valores para a Data-Base Março de 2021", Informe Técnico no. EPE-DEE-IT-038/2021, 2021.

DADOS BIOGRÁFICOS



JOÃO CLAVIO SALARI FILHO possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1988), e mestrado (1993) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), com experiência na área de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, especialmente em: cálculo bidimensional e tridimensional de campos e transitórios eletromagnéticos; linhas de transmissão em CA/CC convencionais e não convencionais (LPNE, LNC); subestações de energia elétrica; aterramento elétrico em regime de baixa e alta frequência; análise técnico-econômica de transmissão de energia; propagação de descargas atmosféricas; e ampacidade e efeito corona em condutores.

ARTHUR LINHARES ESTEVES DOS REIS é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), desde 2014, trabalhando na área de otimização de projetos de linhas de transmissão. Possui mestrado em Sistemas de Energia pela Coppe/UFRJ (2018) e graduação em Engenharia Elétrica pela UFJF (2014). Participou de intercâmbio pelo Ciência sem Fronteiras na Universidade de Brunel, Reino Unido (2012/13). Foi bolsista de iniciação científica, dando continuação ao estágio na Universidade de Uppsala, Suécia (2012). Foi bolsista do Programa de Educação Tutorial - PET (2010/12).

LUIZ FELIPPE ESTRELLA JUNIOR possui graduação em Fortificação e Construção Civil pelo Instituto Militar de Engenharia (1984), mestrado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1988) e doutorado em Mécanique des Structures et Stabilité - MSM pela Université de l'Etat a Liège (1993). Atualmente é Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel). Tem experiência na Área de Engenharia Civil, com ênfase em Estruturas, atuando principalmente nos seguintes temas: instabilidade, análise não-linear geométrica, perfis leves de chapa dobrada, flambagem local e dimensionamento de torres de transmissão de energia elétrica.