

## Estudo comparativo entre linhas de transmissão aéreas convencionais e compactas com vistas à faixa de segurança e capacidade de transmissão

L. E. B. Andreato \* I. J. S. Lopes \*\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, (e-mail: andreato.luis@gmail.com).

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, (e-mail: ivan@cpdee.ufmg.br)

**Abstract:** Nowadays the construction of conventional overhead power lines has faced several constraints, with the increasing need of reducing right-of-way limits, especially in urban areas, and increasing power flow within the same right-of-way of existing lines. In this context of restrictions, transmission lines compaction has become a possible option. This work investigates how new compact overhead power line technologies influence its electrical parameters, particularly, those which influence the right-of-way width calculation, such as surface gradient, electric field, audible noise, and radio interference, as well as those related to power flow capacity, that is, surge impedance and surge impedance loading (SIL). The results show that it is possible to reduce right-of-way width using compact configuration with reduced distances between phases, as well as improve power capacity.

**Resumo:** Atualmente, a construção de linhas de transmissão convencionais tem enfrentado restrições, com a necessidade de se reduzir os limites das faixas de segurança, principalmente nos meios urbanos, e aumentar a capacidade de transmissão dentro de corredores já existentes. Nesse contexto de restrições, a compactação de linhas tornou-se uma opção a ser considerada. Este trabalho investiga como novas tecnologias de linhas de transmissão compactas influenciam nos seus parâmetros elétricos. Particularmente, são analisados aqueles parâmetros que influenciam na determinação da largura da faixa de segurança, como campo elétrico, superficial e lateral, rádio interferência e ruído audível, além dos parâmetros relacionados à capacidade de transmissão, como impedância de surto e potência natural. Os resultados obtidos indicam que é possível reduzir a largura de faixa com a utilização de topologias compactas cujas distâncias entre fases são menores, além de aumentar significativamente a potência natural.

**Keywords:** conventional overhead transmission lines; overhead compact transmission lines; electric field; right-of-way; power flow capacity.

**Palavras-chaves:** linhas de transmissão aéreas convencionais; linhas de transmissão aéreas compactas; campo elétrico; faixa de segurança; capacidade de transmissão.

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a construção de linhas de transmissão aéreas convencionais tem enfrentado diversos desafios relacionados às restrições quanto ao uso da terra, com a necessidade de se reduzir os limites das faixas de servidão, principalmente nos meios urbanos. Além disso, busca-se recorrentemente o aumento da capacidade de transmissão dentro de corredores já existentes, o que exige técnicas específicas de compactação. Existe também uma preocupação cada vez mais crescente de se avaliar os impactos visuais causados pela construção de linhas com grandes estruturas metálicas treliçadas, que tem impacto direto na aceitação do público. Nesse contexto de restrições, a compactação de linhas de transmissão pode ser uma alternativa viável. De acordo com CIGRE (2020a), linhas de transmissão aéreas compactas são aquelas nas quais as distâncias entre fases são consideravelmente menores do que aquelas utilizadas em topologias convencionais.

Existem várias maneiras de se compactar linhas aéreas, as quais atuam no sentido de reduzir a faixa de segurança ou aumentar o Surge Impedance Loading (SIL). Assim, pode-se substituir cadeias de isoladores tradicionais por arranjos que limitam a movimentação causada pelo vento, como os arranjos em V, ou que reduzem o espaço necessário para sua implementação, como no caso das torres com mísulas isolantes Composite Insulated Cross-Arms - CICA, mostradas em CIGRE (2020b). O uso de vãos mais curtos e conseqüentemente o aumento do número de estruturas também é uma forma de compactação. A utilização de configurações de fase diferentes, como as verticais e triangulares, em substituição à configuração horizontal e o encurtamento da distância entre elas reduz o tamanho das torres e a largura de faixa necessária.

Além de aspectos mecânicos e de geometria, a compactação das linhas de transmissão aéreas exige a avaliação de parâmetros elétricos. Nesse sentido, é importante observar

os limites relacionados ao efeito corona, sobretudo de ruído audível e rádio interferência. Além disso, os valores do campo elétrico e magnético ao nível do solo nos limites da faixa de servidão devem ser analisados. Por fim, o desempenho frente a descargas atmosféricas em linhas compactas com vãos mais curtos, arranjos de isoladores rígidos e com espaçadores entre fases, é outra questão importante ao se avaliar o efeito da compactação, conforme destaca Chisholm et al. (2009).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo investigar de que forma estas novas tecnologias de linhas de transmissão compactas influenciam nos seus parâmetros elétricos. Particularmente, são analisados aqueles parâmetros que influenciam na determinação da largura da faixa de segurança, como o campo elétrico, ruído audível e a rádio interferência e os parâmetros relacionados à capacidade de potência transmitida como a impedância de surto e o SIL.

A faixa de segurança corresponde à área na qual a linha de transmissão está instalada, onde há restrições de uso e atividades que podem ser desenvolvidas. De acordo com a norma ABNT (1985) NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão, a largura da faixa de segurança para uma linha de transmissão aérea deve ser calculada considerando o balanço dos cabos devido à ação do vento e os efeitos eletromagnéticos (campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência).

O campo elétrico é um dos parâmetros elétricos mais importantes no que diz respeito a uma linha de transmissão aérea. Sob esta perspectiva, sua elevada intensidade devido à distribuição não uniforme na superfície dos condutores e isoladores determina a ocorrência do efeito corona, o qual tem impacto direto não só na longevidade dos equipamentos, mas também nos efeitos de ruído audível e rádio interferência, conforme aponta Belico (2017). Assim, a aproximação entre as fases, típica de um sistema compacto, pode levar ao aumento do campo elétrico superficial e, conseqüentemente, pode determinar a necessidade de uma faixa de segurança maior.

Outro aspecto de grande relevância de uma linha de transmissão diz respeito à sua capacidade de transmissão, a qual possui relação inversa com a impedância característica da linha, através do parâmetro de Surge Impedance Loading (SIL). Ampliar o fluxo de potência por meio do aumento do valor do SIL é essencial para a otimização dos corredores já existentes e para a construção de linhas cada vez mais eficientes.

## 2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é avaliar de que forma as linhas de transmissão aéreas compactas impactam nos parâmetros elétricos típicos de uma linha, notadamente o campo elétrico, o ruído audível e a rádio interferência, e a impedância característica, e como esses parâmetros influenciam na largura da faixa de segurança e na capacidade de transmissão, respectivamente. Para alcançar este objetivo, compara-se o perfil lateral desses três efeitos eletromagnéticos para duas linhas de transmissão aéreas convencionais e uma linha compacta, assim como o SIL apresentado por cada uma delas.

Diversos trabalhos presentes na literatura, como Regis-Junior and Domingues (2017), Melo et al. (1999), Zhu et al. (2017), investigam de que forma a modificação da geometria típica das torres e do feixe de condutores exerce influência sobre parâmetros como gradiente superficial, campo elétrico lateral, ruído audível e rádio interferência.

Outros trabalhos abordam o cálculo da largura de faixa de segurança de linhas de transmissão aéreas. Segundo Souza (2012), o ruído audível, rádio interferência e o balanço dos condutores são os critérios que mais influenciam nessa largura para linhas de transmissão de 138 kV, 230 kV e 345 kV.

A literatura apresenta ainda estudos que mostram como a alteração de características físicas das linhas de transmissão aéreas permitem a obtenção de uma largura de faixa menor comparado a linhas de transmissão convencionais, tema abordado por Sousa et al. (2018) e Vasconcelos et al. (2017), ou ainda promovem o aumento da capacidade de transmissão, o que pode ser visto em Acosta and Tavares (2017), Villa et al. (2002), Vilela (2019) e Buryanina et al. (2020).

As vantagens espaciais de linhas de transmissão compactas são notórias, tendo em vista os inúmeros exemplos de soluções já implementadas ao redor do mundo, conforme mostrado em CIGRE (2020a) e em Goffinet et al. (2017). Sua viabilidade econômica também é uma realidade dependendo da tecnologia e estratégia de compactação adotada. No que diz respeito ao desempenho em relação aos parâmetros elétricos, é necessário investigar cada situação de forma específica e avaliar se a influência da compactação é positiva ou negativa. Nesse contexto, o trabalho permite analisar essa viabilidade relacionada aos parâmetros que determinam a largura da faixa de segurança, a qual é aspecto central na preferência de linhas compactas em detrimento das convencionais, bem como os parâmetros que influenciam na sua capacidade de transmissão.

## 3. METODOLOGIA

A avaliação dos parâmetros elétricos de uma linha de transmissão, notadamente o campo elétrico gerado pelos condutores em sua superfície e no limite da faixa, o ruído audível, a rádio interferência e a impedância de surto, é essencial durante o projeto da linha para determinação de sua faixa de segurança e potência natural. Os parâmetros citados são de especial interesse sobretudo devido ao impacto que sofrem de diferentes estratégias de compactação. A seguir são descritas as metodologias e ferramentas empregadas na literatura para cálculo desses parâmetros, as quais são utilizadas posteriormente para análise de um estudo de caso, que consiste em uma comparação entre linhas de transmissão convencionais e uma linha correspondente compacta.

### 3.1 Campo Elétrico

Conforme descreve Souza (2012), o campo elétrico em cada ponto na vizinhança da linha de transmissão é a soma vetorial dos campos nas direções  $x$  e  $y$  gerados por todos os condutores de cada fase. De acordo com Souza (2012), CIGRE (2015) e LaForest (1982), o cálculo é feito através da carga elétrica superficial dos cabos

condutores, considerando aspectos da geometria da linha como altura, distâncias entre os condutores e diâmetro dos cabos utilizados, através da expressão 1:

$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad (1)$$

em que  $[V]$  é o vetor coluna da tensão de operação da linha de transmissão, e  $[P]$  é a matriz de Potencial de Maxwell.

O campo elétrico é então obtido para uma altura de 1,5 m acima do solo, ao longo de uma direção ortogonal a partir do eixo da linha de transmissão do lado direito e do lado esquerdo.

### 3.2 Ruído Audível

No que diz respeito ao ruído audível, o cálculo é baseado na metodologia descrita em LaForest (1982), conforme propõe Souza (2012). Segundo essas referências, o ruído audível é uma função do gradiente superficial nos condutores e sua propagação ocorre baseada nas leis da acústica. Para o cálculo do ruído audível oriundo do efeito corona na vizinhança de uma linha, é determinada a pressão de som no entorno dos condutores, sob chuva forte ou apenas molhados, levando-se em conta a potência sonora produzida pela linha e os efeitos de propagação. A pressão de som nos cabos, na condição de chuva pesada, para uma linha com três ou mais subcondutores é dada pela expressão 2:

$$P_{rain}(dB) = 20 \log(n) + 44 \log(d) - \frac{665}{E} + [22,9(n-1)\frac{d}{D}] + 67,9 - 10 \log(R) - 0,02R \quad (2)$$

em que  $n$  é o número de subcondutores,  $d$  é o diâmetro do subcondutor em cm,  $E$  é o gradiente da superfície do condutor em kV/cm,  $K_n = 7,5$  para  $n = 1$ ,  $K_n = 2,6$  para  $n = 2$ ,  $K_n = 0$  para  $n \geq 3$ ,  $D$  é o diâmetro do feixe de subcondutores em cm e  $R$  é a distância do ponto de observação até o eixo da linha.

Dessa forma, a soma das  $n$  fontes de uma linha com  $n$  fases é calculada por:

$$P_{total} = \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{P_i}{10}} \quad (3)$$

O cálculo da faixa de segurança, portanto, é obtido plotando-se a pressão de som total dada pela expressão anterior em função da distância do eixo da linha de transmissão, de modo que a largura máxima é determinada pelo valor máximo permitido em norma para o ruído audível a 1 m do nível do solo.

### 3.3 Rádio Interferência

No que diz respeito à rádio interferência, existem inúmeros métodos presentes na literatura que tratam do cálculo desse fenômeno eletromagnético oriundo de linhas de transmissão. Nesse sentido, Souza (2012) propõe a

utilização da metodologia desenvolvida pela WEC (Westinghouse Electric Corporation), a qual é baseada em relações empíricas obtidas de testes feitos em linhas existentes ao longo de vários anos e é fruto de uma força tarefa do CIGRE/IEEE que reuniu e comparou inúmeras metodologias existentes. A expressão 4 proposta por Reichman (1973) para o cálculo da rádio interferência a partir desse estudo é apresentada a seguir:

$$RI = 48 + 3,5(E - 17,5) + 30 \log \frac{d}{3,51} + 20 \log \frac{30,7h}{R^2} + 10(1 - f) \quad (4)$$

em que  $E$  é o gradiente máximo em kVrms/cm,  $d$  é o diâmetro do condutor em cm,  $R$  é a distância do condutor ao ponto de observação em m,  $h$  é a altura do cabo em m e  $f$  é a frequência em MHz. Ressalta-se que a expressão 4 é válida para distâncias de até 60 m a partir do eixo central da linha.

Novamente, a determinação da largura da faixa de segurança é feita a partir do perfil lateral da rádio interferência em uma linha de transmissão, plotando-se em um gráfico o valor desse efeito em função da distância a partir do eixo a 1 m de altura acima do nível do solo.

### 3.4 Surge Impedance Loading

A capacidade de transmissão de uma linha pode ser avaliada por meio do cálculo do parâmetro Surge Impedance Loading, o qual diz respeito à sua potência natural, ou seja, a potência transmitida pela linha a uma carga resistiva igual à sua impedância de surto. Nessa situação, há equilíbrio entre a potência reativa gerada e consumida pela linha, assim apenas potência ativa é entregue à carga, conforme descreve Vilela (2019). O SIL pode ser determinado através da seguinte expressão 5:

$$SIL = \frac{V_L^2}{Z_C} \quad (5)$$

em que  $V_L$  é a tensão de linha e  $Z_C$  é a impedância característica.

A determinação da impedância característica de uma linha de transmissão pode ser feita pela definição dos valores de impedâncias e admitâncias por unidade de comprimento. Este processo, como apresentado por Vilela (2019), pode ser realizado através do software ATP, utilizando a modelagem LCC (Line Constants Cable) e o modelo PI de linha de transmissão.

A impedância característica da linha modelada é então calculada utilizando os valores dos parâmetros mútuos equivalentes de sequência positiva obtidos com o programa, de acordo com a expressão:

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z_+}{Y_+}} \quad (6)$$

em que  $Z_+$  é a impedância de sequência positiva e  $Y_+$  é a admitância de sequência positiva.

### 3.5 Estudo de Caso

A fim de se avaliar o efeito da compactação sobre os parâmetros elétricos de uma linha de transmissão, fez-se um estudo de caso comparando-se uma linha aérea convencional e uma compacta.

Para isso, foram utilizados três exemplos de linhas de transmissão aéreas: uma linha convencional com estruturas autoportantes típicas com disposição de fases horizontal; uma linha convencional com estruturas estaiadas típicas com disposição de fases triangular; e uma linha compacta com estrutura típica autoportante com disposição de fases em delta do tipo CICA (Composite Insulated Cross-Arms), conforme proposto por Yanfeng et al. (2015). A Figura 1 ilustra as silhuetas das torres utilizadas em cada situação e a Figura 2 mostra as distâncias entre fases empregadas.

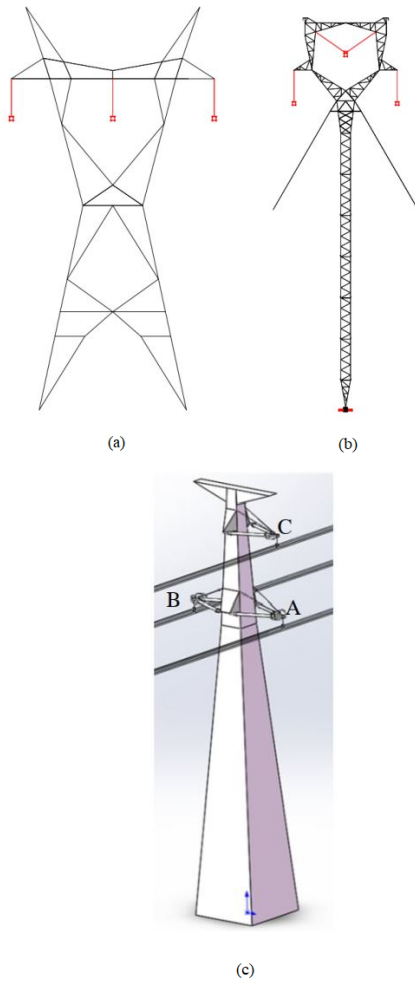


Figura 1. Silhuetas das torres: LT convencional autoportante (a), LT convencional estaiada (b) e LT compacta (c). Adaptado de Yanfeng et al. (2015)

Ressalta-se que, embora seja uma estrutura típica de uma LT convencional, a torre estaiada em questão já apresenta características próprias de linhas de transmissão consideradas compactas, em comparação com a linha convencional autoportante, como o encurtamento das distâncias entre as fases, propiciado pela sua disposição triangular. Essa é inclusive a linha em que as três fases se encontram mais próximas entre si, conforme pode ser visto na Figura 2.

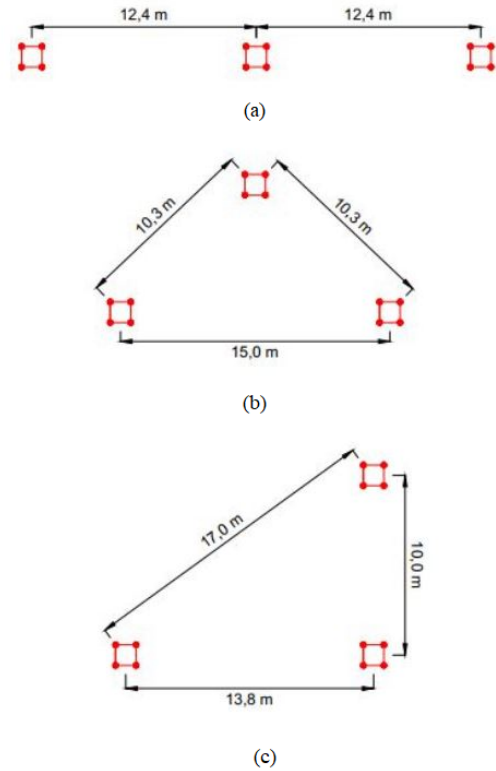


Figura 2. Distâncias entre fases: LT convencional autoportante (a), LT convencional estaiada (b) e LT compacta (c).

A Tabela 1 resume as principais características das linhas estudadas. As três linhas apresentam mesma tensão operativa de 500kV, 20km de extensão, feixes de dimensão semelhante compostos por quatro condutores por fase e 2 cabos para-raios. As duas linhas convencionais estudadas apresentam os mesmos tipos de isoladores, cabos condutores de liga de alumínio e cabos para-raios do tipo OPGW. A linha compacta, por sua vez, apresenta mísulas de sustentação e isolamento compostas por material polimérico e cabos condutores de diâmetro maior. Além disso, as flechas dos cabos condutores e para-raios são cada vez menores à medida que se amplia o grau de compactação de fases entre as três linhas, sendo que a linha convencional autoportante apresenta as maiores flechas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada uma das três linhas de transmissão, foram calculados os valores de gradiente superficial máximo e gradiente de corona crítico, além da largura de faixa de segurança segundo os três efeitos eletromagnéticos, e o valor do SIL. Os resultados obtidos são discutidos a seguir.

### 4.1 Variação com a altura

Para o cálculo do gradiente superficial máximo e para a faixa de segurança, foi utilizada a altura de 12,5 m para os cabos condutores. Essa altura é a altura mínima comumente utilizada em projeto para linhas de 500 kV e representa a situação crítica em termos de intensidade dos efeitos eletromagnéticos nas vizinhanças da linha de

Tabela 1. Características gerais das linhas estudadas.

Característica	LT convencional autoportante	LT convencional autoportante	LT compacta
Cabo Condutor	CAL 1120 823 MCM		LGJ-400/35
Cabo PR	OPGW 24 FO 15,5 mm		LBGJ-150-40AC
Dimensão do feixe	457mm		450mm
Diâmetro Condutor	26,53mm		30,0 mm
Diâmetro Cabo PR	15,5mm		15,75 mm
Flecha Cabo Condutor	23,6m	22,5m	21m
Flecha Cabo PR	10,1m	9,6m	9m

transmissão, uma vez que é a situação em que os condutores estão mais próximos do ponto de observação.

Entretanto, para se avaliar o efeito da consideração dessa altura, os cálculos dos parâmetros elétricos também foram feitos para outros valores de altura do cabo condutor. Além da altura mínima de 12,5 m, foram utilizadas: a altura útil do condutor, que representa a altura dos cabos inferiores posicionados na torre; a altura média dos condutores ao longo do vão, calculada a partir da geometria da estrutura e das flechas dos cabos; e, por fim, a altura de 7,5 m que é a altura mínima comumente utilizada em linhas de tensão inferior, como 138 kV.

A Figura 3 mostra o perfil lateral do campo elétrico a 1,5 m acima do solo. Percebe-se que a intensidade do campo aumenta à medida que se reduz a altura dos condutores, ao longo de praticamente todo o perfil lateral. Além disso, para a altura mínima de 7,5 m dos condutores, o campo elétrico extrapola o valor permitido dentro da faixa para três linhas (8,33 kV/m). Esta, portanto, não pode ser a altura mínima a ser adotada. A altura de 12,5 m, por sua vez, atende aos requisitos para todos os casos e é, por isso, a altura adotada. Dessa forma, conclui-se que o campo elétrico lateral é um dos critérios considerados para determinação da altura mínima de projeto para linhas de transmissão.

Embora a altura de 12,5m tenha atendido os requisitos para as três linhas, é necessário que a análise seja feita para cada situação individualmente, visto que geometrias diferentes podem produzir resultados distintos para uma mesma altura. Por fim, é válido mencionar que a variação da altura ao se avaliar os demais efeitos de ruído audível e rádio interferência apresenta comportamento semelhante, porém com sensibilidade menor.

#### 4.2 Campo elétrico superficial

O gradiente superficial máximo obtido para cada situação é mostrado na Tabela 2. Os maiores valores obtidos foram para as LTs convencionais, autoportante e estaiada. Embora as distâncias entre fases diminuam na LT compacta, o que levaria ao aumento do gradiente na superfície dos condutores, o diâmetro do cabo condutor utilizado nessa configuração é maior. Isso assegura que os valores

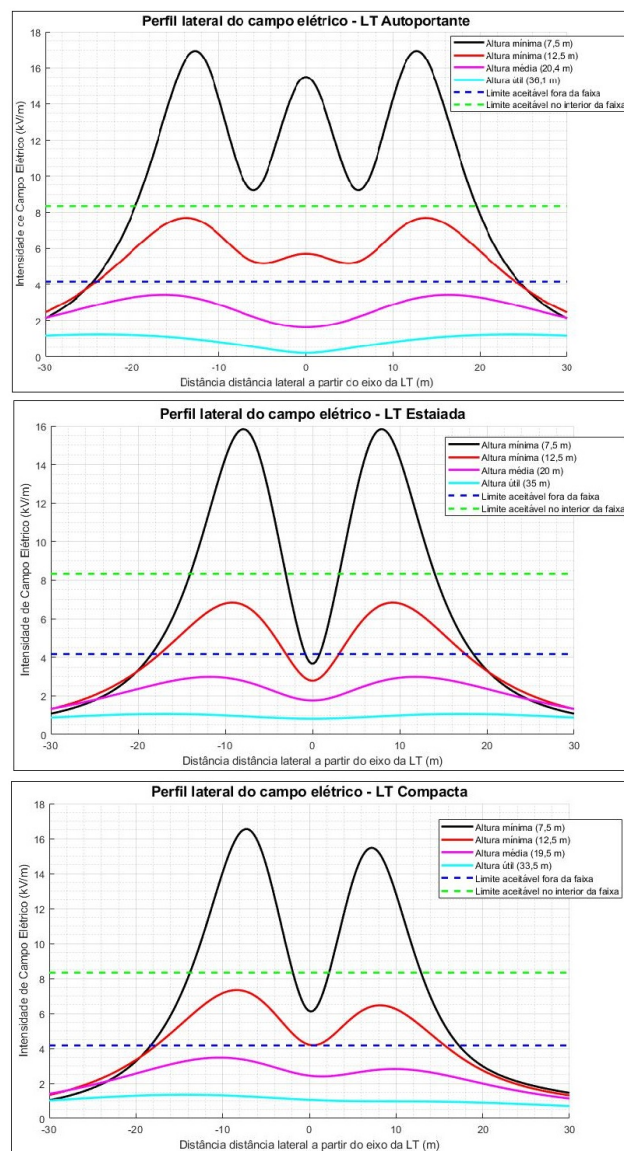


Figura 3. Perfil lateral do campo elétrico a 1,5 m do solo para diferentes alturas do cabo condutor para a LT convencional autoportante, para a LT convencional estaiada e para a LT compacta, respectivamente.

máximos de campo elétrico superficial sejam menores do que os observados nas LTs convencionais. Esse resultado é o indicativo de que em linhas de transmissão compactas, devido aos valores comumente elevados do campo elétrico na superfície dos cabos condutores, ferragens e isoladores, é necessário adotar características que mitiguem esse efeito, como, por exemplo, a adoção de cabos condutores de diâmetro maior.

Tabela 2. Campo elétrico superficial nos condutores

Parâmetro	LT convencional autoportante	LT convencional autoportante	LT compacta
Gradiente (kV/cm)	17,14	17,17	15,97
Gradiente Crítico (kVrms/cm)	18,72	18,72	18,49

#### 4.3 Faixa de segurança - ruído audível

O perfil lateral do ruído audível para cada situação é mostrado na Figura 4. Nas LTs convencionais, o ruído audível apresenta, de modo geral, valores maiores do que na LT compacta para as mesmas distâncias laterais a partir do eixo da linha de transmissão. Esse comportamento é novamente explicado pelo cabo condutor de diâmetro maior adotado para a LT compacta, visto que esse efeito é oriundo do campo elétrico superficial nos condutores. No que diz respeito à faixa de segurança, o ruído audível não exerce influência sobre a largura mínima, visto que os valores estão sempre abaixo dos 58 dB máximos permitidos fora da faixa.

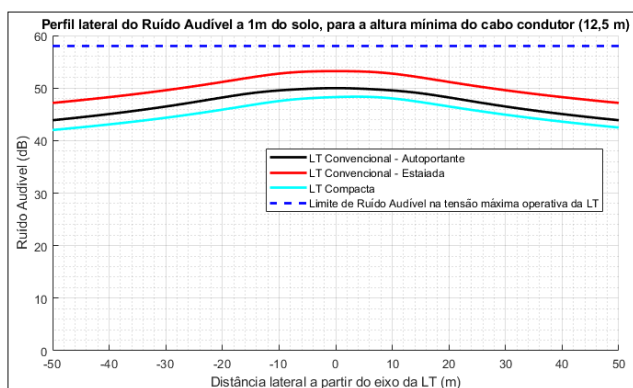


Figura 4. Perfil lateral do ruído audível a 1,0 m do solo para a LT convencional autoportante (preto), para a LT convencional estaiada (vermelho) e para a LT compacta (azul).

#### 4.4 Faixa de segurança - rádio interferência

Em relação à rádio interferência, o comportamento observado nos perfis laterais da Figura 5 é semelhante ao ruído audível devido aos valores de campo elétrico superficial, sendo que a LT estaiada apresenta os maiores valores máximos.

Conforme mostrado na Tabela 3, a menor faixa de segurança obtida foi para a LT compacta em virtude da menor intensidade desse efeito ao longo do perfil lateral. Em contrapartida na LT convencional estaiada, embora possua características compactas, o valor de faixa obtido foi semelhante ao da LT convencional autoportante. O resultado confirma, mais uma vez, a necessidade de se modificar características da linha aérea quando se adota a filosofia compacta. Mesmo com distâncias entre fases mais curtas nas torres estaiadas, a largura de faixa determinada pela rádio interferência não foi reduzida devido à utilização do mesmo cabo condutor usado nas torres autoportantes, em oposição à linha compacta onde se utilizou cabo condutor de seção reta maior e, conseqüentemente, a largura de faixa calculada foi consideravelmente menor.

#### 4.5 Faixa de segurança - campo elétrico

Em relação ao campo elétrico, o perfil lateral ao longo da faixa é mostrado na Figura 6. As diferenças observadas entre os valores calculados para as três configurações se devem às diferentes disposições de fases. Embora possua

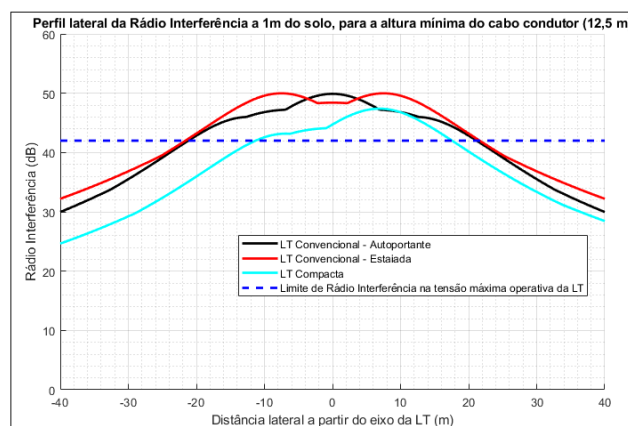


Figura 5. Perfil lateral da rádio interferência a 1,0 m do solo para a LT convencional autoportante (preto), para a LT convencional estaiada (vermelho) e para a LT compacta (azul).

distâncias horizontais entre fases menores, a disposição de fases assimétrica na LT compacta faz com que os valores máximos de campo observados na lateral esquerda sejam maiores do que o valor máximo de campo gerado pela LT convencional estaiada, a qual possui disposição de fases triangular. Em contrapartida, a aproximação das fases do lado direito na LT compacta faz com o perfil lateral nessa região apresente intensidade de campo elétrico menor em comparação à LT convencional estaiada para as mesmas distâncias à direita a partir do eixo.

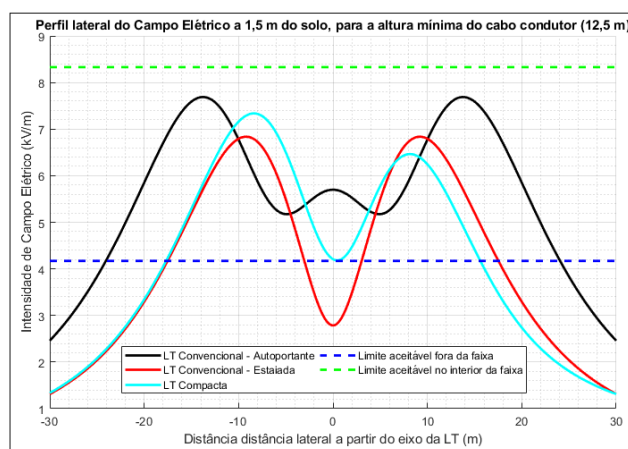


Figura 6. Perfil lateral do campo elétrico a 1,5 m do solo para a LT convencional autoportante (preto), para a LT convencional estaiada (vermelho) e para a LT compacta (azul).

Por outro lado, as distâncias entre fases maiores observadas na LT convencional autoportante fazem com que o campo elétrico gerado por essa linha seja o maior entre os três casos analisados. De forma semelhante, na LT convencional estaiada o campo apresenta o menor valor máximo, uma vez que nessa configuração a disposição triangular simétrica das fases faz com a distância entre cada duas delas seja a menor, comparada às demais.

Com relação à faixa de segurança, os valores calculados são mostrados na Tabela 3. A maior largura obtida foi para a LT convencional autoportante, em virtude dos seus

valores de campo elétrico e distâncias entre fases maiores. Nas outras duas LTs, onde as fases foram aproximadas, a largura de faixa foi reduzida significativamente, apresentando valores similares.

Tabela 3. Faixa de segurança e valores máximos dos efeitos eletromagnéticos

Parâmetro	LT Convencional Autoportante		LT Convencional Estaiada		LT Compacta	
	Valor máximo	Largura (m)	Valor máximo	Largura (m)	Valor máximo	Largura (m)
Campo elétrico (kV/cm)	7,69	48	6,84	35	7,34	33
Ruído audível (dB)	49,98	-	53,21	-	48,35	-
Rádio interferência (dB)	49,89	42	49,98	43	47,39	28,5

Para resumir os resultados discutidos anteriormente, a Figura 7 mostra os valores máximos obtidos ao longo da faixa de segurança para os três efeitos eletromagnéticos nas três situações estudadas. Além disso, a Figura 8 mostra a largura mínima da faixa calculada para cada linha, como sendo o maior valor de faixa obtido entre os três efeitos, mostrado na Tabela 3.

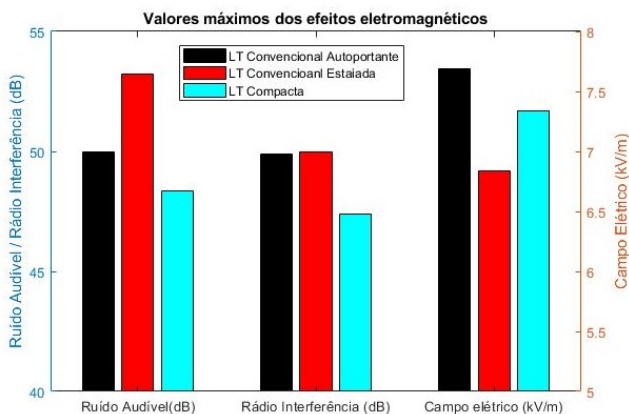


Figura 7. Valores máximos dos efeitos eletromagnéticos para a LT convencional autoportante (preto), para a LT convencional estaiada (vermelho) e para a LT compacta (azul).

#### 4.6 Surge impedance loading

Em relação à capacidade de transmissão, a Tabela 4 e a Figura 9 mostram os valores de impedância de surto e potência natural. De forma geral, a compactação de fases promoveu o aumento da capacidade de transmissão das linhas estudadas. A diminuição das distâncias entre fases na LT convencional estaiada e na LT compacta tende a aumentar o acoplamento elétrico entre os cabos e, com isso, aumentar o valor da capacitância da linha. Isso leva à diminuição da impedância de surto e, conseqüentemente, ao aumento do Surge Impedance Loading (SIL) nessas duas LTs em comparação à LT convencional autoportante.

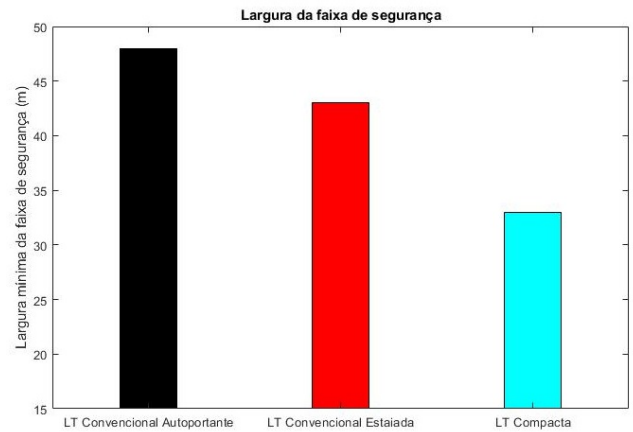


Figura 8. Largura mínima da faixa de segurança para a LT convencional autoportante (preto), para a LT convencional estaiada (vermelho) e para a LT compacta (azul).

Entre a LT convencional estaiada e a LT compacta, o SIL é ligeiramente maior na configuração estaiada. Esse resultado pode ser explicado pelas disposições de fases: as distâncias entre cada duas fases são menores na disposição triangular em relação à disposição em delta.

Tabela 4. Potência natural e impedância de surto

Parâmetro	LT convencional autoportante	LT convencional estaiada	LT compacta
Impedância Característica ( $\Omega$ )	258,20	242,13	246,66
Potência Natural (MW)	968,25	1032,5	1013,53

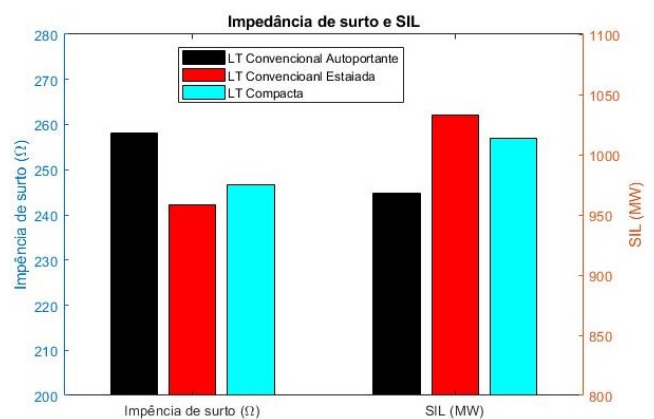


Figura 9. Impedância de surto e SIL para a LT convencional autoportante (preto), para a LT convencional estaiada (vermelho) e para a LT compacta (azul).

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem realizar as seguintes conclusões. De modo geral, a compactação de fases, obtida através o encurtamento das distâncias entre elas, levou ao aumento dos valores máximos de campo elétrico na superfície dos condutores, o que reflete no aumento dos valores de

ruído audível e rádio interferência nas vizinhanças dessas linhas.

Para esses casos, o bom desempenho da linha de transmissão e uma faixa de segurança menor ficam condicionados à adoção de alguma característica que permita a atenuação dos valores de gradiente superficial, como a utilização de cabos condutores de diâmetro maior, a exemplo do que foi feito para a situação compacta analisada.

De forma geral, a largura da faixa de segurança pode ser reduzida consideravelmente nas linhas com torres estaiadas e compactas, sobretudo quando se considera o critério do campo elétrico lateral ao nível do solo. Para este efeito eletromagnético, o tipo de configuração de fases exerce grande influência sobre os valores obtidos.

Em relação à capacidade de transmissão, a comparação entre os três exemplos estudados indicou que a aproximação de fases nas LTs aéreas com torres estaiadas e compactas leva à redução da sua impedância de surto e, conseqüentemente, ao aumento da potência natural.

Diante dessas evidências, pode-se concluir que a compactação de linhas de transmissão aéreas pode ser uma alternativa viável, desde que sejam feitas ponderações em relação aos seus parâmetros elétricos. A depender da geometria da estrutura, a largura de faixa de segurança pode ser sensivelmente reduzida. O fator crítico, contudo, é o campo elétrico na superfície dos condutores, o qual influencia não só o efeito corona, como também os valores de ruído audível e rádio interferência, e exige assim adoção de condutores maiores. Por fim, a capacidade de transmissão pode também ser consideravelmente aumentada, sendo esta, portanto, outra vantagem das linhas compactas.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à RS Engenharia pelo apoio técnico e cessão de alguns dados e imagens.

#### REFERÊNCIAS

- ABNT (1985). *NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Acosta, J.S. and Tavares, M.C. (2017). Methodology for optimizing the capacity and costs of overhead transmission lines by modifying their bundle geometry. *Electric Power Systems Research*, 163, 668–677.
- Andreato, L.E.B. (2021). Avaliação de parâmetros elétricos em linhas de transmissão compactas. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), Belo Horizonte, Brazil.
- Belico, V.T. (2017). Distribuição de campo elétrico em um modelo de linha compacta frente à tensão operativa. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), Belo Horizonte, Brazil.
- Buryanina, N., Koroluk, Y., and Timofeeva, A.M.V. (2020). 35-200 kv compact transmission lines with improved power transfer capability. In *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 1–5.
- Chisholm, W.A., Anderson, J.G., Phillips, A., and Chan, J. (2009). Lightning performance of compact lines. In *X International Symposium on Lightning Protection*. Curitiba, Brazil.
- CIGRE (2015). *Guide to Overall Line Design*. CIGRE. Reference 638.
- CIGRE (2020a). *Compact AC Overhead Lines*. CIGRE. Reference 792.
- CIGRE (2020b). *Transmission lines structures with Fiber Reinforced Polymer (FRP) composite*. CIGRE. Reference 818.
- Goffinet, J.F., Gutman, I., and Sidenvall, P. (2017). Innovative insulated cross-arm: Requirements, testing and construction. In *2017 12th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 1–7.
- LaForest, J.J. (ed.) (1982). *Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above*. General Electric Company and Electric Power Research Institute.
- Melo, M., Fonseca, L., Fontana, E., and Naidu, S. (1999). Electric and magnetic fields of compact transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(1), 200–204.
- RegisJunior, O. and Domingues, L. (2017). Feixes compactos e otimizados para redução dos campos elétricos superficiais, do ruído audível e da radio interferência em linhas aéreas. In *XXIV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Curitiba, Paraná-Brasil.
- Reichman, J. (1973). Comparison of radio noise prediction methods with CIGRE/IEEE Survey Results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 92(3), 1029–1042.
- Sousa, W.E., Boaventura, W.C., and Assis, S.C. (2018). Electrical performance of a compact arrangement of conductors for 138 kV overhead transmission lines. *IEEE Latin America Transactions*, 16(1), 96–104.
- Souza, C.J. (2012). *Determinação da largura de faixa de segurança de linhas de transmissão: um estudo paramétrico*. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Vasconcelos, J.A.d., Teixeira, D.A., and Ribeiro, M.F.d.O. (2017). Optimal selection and arrangement of cables for compact overhead transmission lines of 138/230 kv. *IEEE Latin America Transactions*, 15(8), 1460–1466.
- Vilela, P.H.S. (2019). *Uma proposta de análise técnica para linhas de transmissão compactas com potência natural elevada em regiões com topografia acidentada*. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Villa, P., Bertazzi, A., and Leva, M. (2002). Compact transmission line with inverted delta configuration. In *Cigre 2002 conference*, volume 103. Paris.
- Yanfeng, G., Chao, W., Xidong, L., Yingyan, L., Guoli, W., and Chao, G. (2015). Electric field and electromagnetic environment analyses of a 500 kV composite cross arm. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 92(3), 399–402.
- Zhu, Y., Wang, L., Yu, J., and Fang, J. (2017). Optimal insulation design for new-type transmission tower with composite cross-arm. In *Conference Proceedings of ISEIM 2017*, 578–581.