

Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

LPNE DE 1670 MW COM SUBFEIXES DE CONDUTORES (SPLITFEX)

ANDRÉ HOFFMANN (*)
Fasttel Engenharia Ltda

JOÃO NELSON HOFFMANN
Consultor

RESUMO

As linhas tipo LPNE de 500 kV com SIL (*Surge Impedance Loading*) de 1670 MW e feixe de 6 cabos, foram concebidas para uso de torres tipo *crossrope*, as quais são apropriadas para terrenos planos e solos de boa resistência mecânica.

Em regiões com topografia acidentada, que implicam na utilização obrigatória de torres autoportantes do tipo Raquete ou Cálice (mais onerosas), tem sido constatado que os empreendimentos requerem soluções alternativas, o que levou ao desenvolvimento da série de torres que denominamos *Splitfex*, objeto deste Informe Técnico.

A solução proposta tem a propriedade fundamental de permitir a utilização de torres autoportantes mais leves de modo a manter o SIL (reatância) mesmo em terrenos acidentados, uma vez que a geometria dos cabos se mantém ao longo de toda a extensão da linha de transmissão, sem aumento de custos.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de Transmissão, LPNE, Feixe expandido, Cálculo Estrutural, Otimização

1.0 - 1.0 – DESCRIÇÃO DA INOVAÇÃO

As linhas tipo LPNE de 1670 MW foram originalmente concebidas com base em projetos de estruturas idealizadas (tipo *crossrope*), as quais são mais adequadas para regiões de topografia predominantemente plana e com solos de boa resistência mecânica. Neste tipo de estrutura, faz-se uso de feixes expandidos de condutores dispostos de variadas formas (referências [1], [2] e [3]) e agrupados todos entre si por meio de espaçadores de dimensões relativamente grandes, em geral de forma circular ou elíptica, cujos semieixos chegam a valores da ordem de 2,58 m x 2,10 m.

Neste Informe Técnico serão mostradas as vantagens ao se redesenhar esta LPNE, aplicando-se uma divisão física de cada feixe em 2 ou mais subfeixes de dimensões menores (Figura 1). A esta técnica convençamos a denominação de *Splitfex***, por tratar-se de uma divisão física do feixe.

Desta forma, fica viabilizado o uso de uma série alternativa de estruturas e espaçadores mais simples, com cadeias conectadas diretamente à torre, e assim facilitando também os serviços de manutenção das cadeias e cabos.

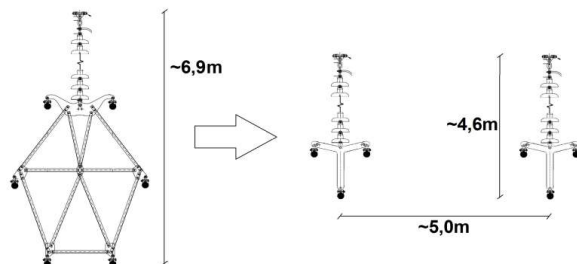


Figura 1 – *Splitfex*: Divisão em 2 subfeixe

(*) Rua Alcino Guanabara, 200 - Hauer, Curitiba - PR, 81610-1102
Tel: (+55 41) 99929-5938, Email: andreh@fasttel.com.br

(**) Pedido de Patente de MU depositado junto ao INPI



XXV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3407
AB/XXX/YY

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

S

A série de torres que foi concebida possui torre predominante do tipo *monomastro*, com estais de menor comprimento que a *crossrope* e além disto, requer apenas 1 mastro central e respectiva fundação, contra 2 fundações centrais iguais no caso da *crossrope*. Deste modo, haverá maior percentual de torres estaiadas em terrenos não planos, pois (1) os estais da monomastro tem menor alcance lateral, e (2) sendo o mastro único, deixará de existir a restrição quanto ao desnível de altura dos mastros, o que restringe a aplicação das torres *crossrope*.

A solução proposta tem a propriedade fundamental de permitir a utilização de uma série de estruturas com torres autoportantes menos onerosas do que a solução com feixe de 6 condutores, e principalmente, mantendo o SIL (reatância) ao longo de toda a linha de transmissão, independentemente da topografia.

Toda a série de estruturas encontra-se modelada no software de cálculo estrutural TOWER (Figura 2), permitindo assim obter pesos teóricos orientativos em aço para qualquer condição de aplicação.

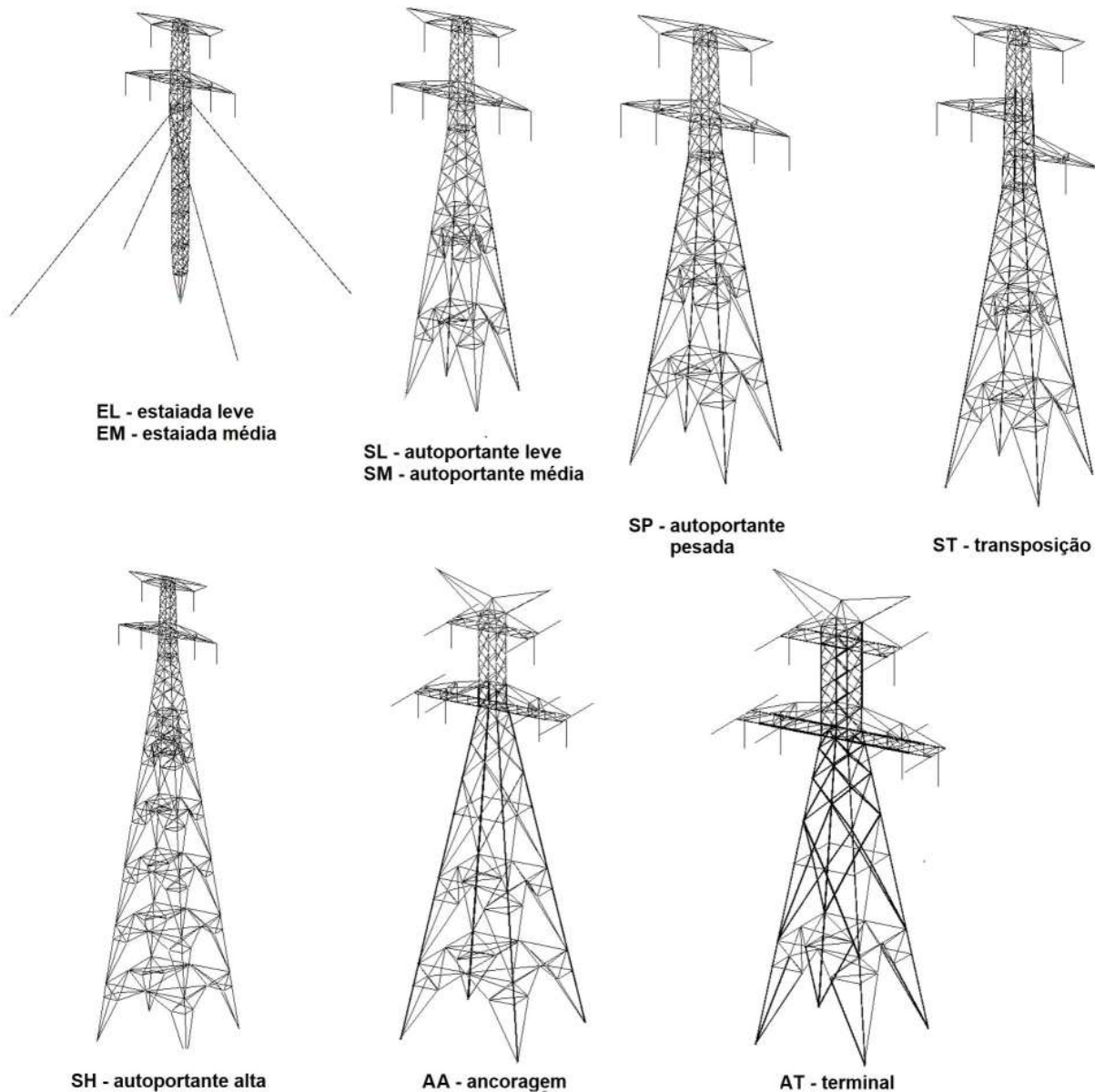


Figura 2 – Série de estruturas de 500 kV para a solução *Splitfex com* de SIL 1670 MW

2.0 - 2.0 – VANTAGENS

Nas instalações de 500 kV até aqui executadas, notou-se que as estruturas tipo *crossrope* comportam bem os feixes com 6 ou mais condutores, mas requerem estruturas alternativas para regiões com topografia acidentada, já que este tipo de torre leva a algumas desvantagens tais como:

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

- 1 - Os estais dos mastros ocupam grande espaço lateral, muitas vezes avançando além da faixa de segurança originalmente prevista;
- 2 - A torre *crossrope* possui 2 mastros, e portanto, requer 2 fundações no solo, encarecendo o projeto principalmente em solos de fraca resistência mecânica;
- 3 - A solução com feixe de 6 cabos apresenta limitações importantes no comprimento do vão de aplicação devido ao balanço assíncrono dos condutores, pois a distância entre fases na torre *crossrope* compacta é de aproximadamente 5 m, contra cerca de 11 metros na solução *Splitfex*;
- 4 - A aplicação da solução com torre *crossrope* fica comprometida em terrenos pouco planos, requerendo estrutura autoportante (Raquete ou Cálice), bem mais pesada e cara, que a substitui nestas condições;
- 5 - Em terrenos mais acidentados esta configuração não mantém o SIL (ou reatância) ao longo de toda a extensão da linha de transmissão, pois a topografia irregular do solo requer obrigatoriamente o uso de diferentes tipos de estruturas, o que altera o valor da potência natural da linha de transmissão. Assim, para reduzir ao mínimo esta perda, recorre-se a estruturas autoportantes especiais, que procuram manter a geometria sempre que possível. Estas estruturas acabam por apresentar um custo significativo, ou são de projeto inviável quando necessitarem ser ainda mais reforçadas. Eventualmente, por questões de vãos longos e balanço assíncrono, acaba-se por recorrer a estruturas convencionais com feixes que não apresentam a geometria adequada para caracterizá-la como LPNE.

Assim se conclui que o uso de estruturas autoportantes de alto custo entra em contradição com o conceito inicial de LPNE, que é permitir maior potência na transmissão com custos reduzidos na construção.

Em complemento, outras questões podem ser importantes na comparação das alternativas:

- 6 - Feixes de grandes dimensões, tal como o feixe elíptico frequentemente utilizado, dificultam a manutenção dos condutores e espaçadores por serem maiores do que a estatura de um trabalhador, dificultando a movimentação do do mesmo sobre o feixe, e o acesso ao componente para manutenção (espaçadores, emendas, cabos, etc.);
- 7 - Na torre *crossrope* não há conexão direta das cadeias de isoladores com as torres metálicas dos mastros, dificultando o acesso dos trabalhadores e a manutenção das cadeias de isoladores e cabos condutores;
- 8 - Um feixe com grandes dimensões pode conduzir a dificuldades durante as etapas de lançamento, nivelamento e grampeamento dos cabos condutores, por utilizar número maior de condutores no feixe e sendo assim, estas etapas consomem maior prazo de execução.

W

Em resumo, pelo exposto, é reconhecido que quanto mais acidentado for o terreno e quanto menos resistente for o solo, menos propícia será a aplicação de torres do tipo *crossrope*.

São estas as condições que tornam ainda mais promissora a aplicação da inovação aqui proposta.

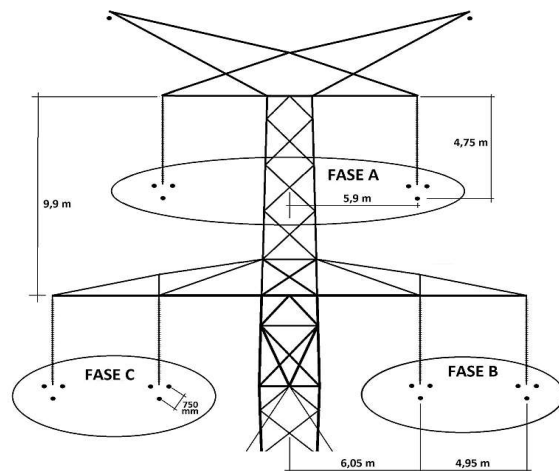


Figura 3 – Configuração viável para 500 kV / 1670 M

3.0 - 3.0 – FEIXES DE CONDUTORES E SIL

Em uma configuração possível para aplicação em 500 ou 525 kV, a Figura 3 mostra as fases organizadas em dois subfeixes com 3 condutores do tipo AAAC, com fios de alumínio liga 1120 de seção transversal 425 mm² (838 MCM).

Desta configuração, e utilizando subfeixes equiláteros com 750 mm de lado, resultam os seguintes valores no software ATP (*Alternative Transient Program*) :

Sequence magnitude (ohm)	Surge impedance angle (degr.)	Attenuation db/km	velocity km/sec
Zero :	5.65127E+02	-8.02688E+00	2.79181E-03
Positive:	1.48299E+02	-2.07788E+00	4.08763E-04

Wavelength km	Resistance ohm/km	Reactance ohm/km	Susceptance mho/km
2.75668E+03	3.59726E-01	1.25008E+00	4.07308E-06
4.84408E+03	1.39489E-02	1.91977E-01	8.75218E-06

Destes resultados se obtém os valores de SIL, $500^2 / 1.48299E+02 = 1685$ MW em 500 kV, e $525^2 / 1.48299E+02 = 1858$ MW em 525 kV, além da reatância 0,191977 ohm/km e resistência de sequencia positiva 0,0139489 ohm/km.

Com maior simplificação no projeto dos espaçadores, atende-se a menores valores de potência natural (p.ex. SIL de ~1500 MW utilizando subfeixes triangulares de 457 mm), com economia adicional em consequência da simplificação.

Há de se considerar pequenas reduções na potência natural, provenientes da aplicação de estruturas em ângulo (desvios), que são projetadas com pequeno acréscimo no distanciamento entre os condutores de forma a atender ao maior ângulo possível de utilização, porém muitas vezes são aplicadas em ângulos menores. No entanto, tais reduções são aceitáveis e se encontram dentro dos limites dos projetos.

4.0 - 4.0 – CADEIAS DE ISOLADORES E ESPAÇADORES

A Figura 4 mostra o projeto sugerido da cadeia de suspensão para um subfeixe de 3 condutores. É requisito necessário que esta cadeia apresente o menor comprimento possível, desde que atenda aos demais requisitos técnicos do projeto, incluindo facilidades específicas para a manutenção. Isto é requerido para que se obtenha a estrutura compactada a ponto suficiente para se obter o SIL (ou reatância) pretendido, atendendo aos valores típicos de balanços de condutores da Figura 5, e atendendo aos requisitos de projeto civil estrutural para a estrutura metálica treliçada.

As cadeias são fixadas diretamente nas torres, como se mostra nas figuras, e assim facilitando os serviços de manutenção, diferentemente do caso dos feixes de 6 condutores em torres *crossrope*, a qual utiliza o cabo de aço na fixação dessas cadeias.

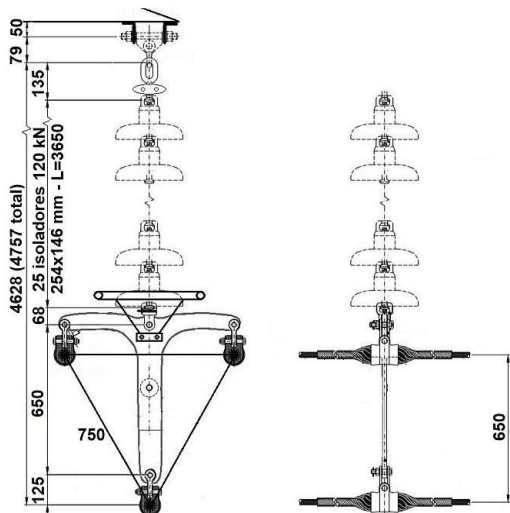


Figura 4 – Cadeias de suspensão típicas

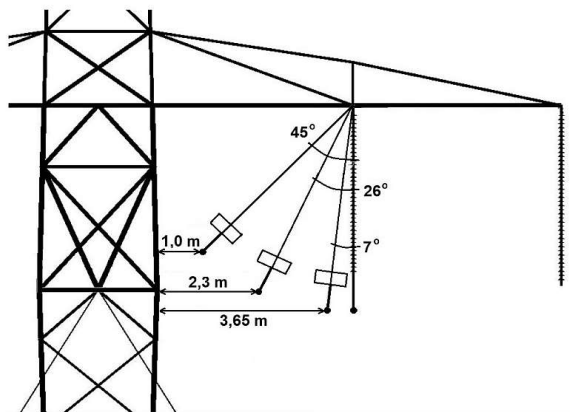


Figura 5 – Exemplo de ângulos de balanço possíveis

5.0 - 5.0 – CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL

As análises de campo elétrico superficial foram feitas por meio de um programa de computador utilizando o Método de Simulação de Cargas, otimizado para tais cálculos [4], [5].

Desta forma, obteve-se os seguintes valores para as configurações acima apresentadas, os quais encontram-se dentro dos limites aplicáveis ao condutor considerado em regiões de altitudes usuais, com densidade relativa do ar da ordem de 0,90. Para outras situações a solução *Splitflex* requer estudos específicos, podendo apresentar alterações nos feixes e/ou geometria da torre.

Tabela 1 – Campos elétricos superficiais máximos nos condutores

Tipo de LPNE	Valor máximo em um dos condutores c/550 kV (kV/cm)	Média dos máximos numa fase c/550 kV (kV/m)
LNPE 1685/1858 MW	19,8	19,2
LNPE 1500 MW	18,6	18,1

6.0 - 6.0 – EMISSÃO ELETROMAGNÉTICA E FAIXA DE SEGURANÇA

Incluem-se nestes estudos a verificação do atendimento às Normas Técnicas dos valores de campos elétrico e magnético, rádio interferência e ruído audível ao nível do solo, e verificação do balanço dos condutores sob vento. Para as configurações básicas acima apresentadas (LPNE de 1500 ou 1685 MW em 500 kV, 1858 MW em 525 kV com 2 subfeixes de 3 condutores por fase), verificou-se atendimento a estes requisitos com os métodos de cálculo disponíveis, para uma largura de faixa de segurança de 60 m (30 m a partir do eixo da linha) e um vão típico de 500 m entre estruturas. O estudo de *rádio interferência* foi elaborado como descrito em [6], e o cálculo de campos elétricos ao nível do solo como descrito em [7].

7.0 - 7.0 – ESTRUTURAS DE TRANSMISSÃO

Foram elaborados estudos de cálculo estrutural para as torres citadas, utilizando-se o software TOWER (Powerline Systems Inc./EUA), de forma a obter os pesos teóricos em aço para as torres, e tornando assim possível uma melhor estimativa de custos.

As estruturas para as ancoragens dos cabos condutores terão configuração e geometria similar às estruturas de suspensão, com maior distanciamento entre as fases de forma a compensar a utilização destas estruturas nos ângulos (desvios) da linha de transmissão, e assim procurando manter o SIL requerido e a reatância especificada no Edital de Transmissão, dentro dos limites admitidos no projeto. A Tabela 2 mostra pesos orientativos de torres para algumas regiões:

Tabela 2 – Pesos estimados de torres por tipo e por região de aplicação (t)

Tipo de Torre	Altura útil (m)	Pressão de vento 250 anos (10m, 10min, kgf/m ²)		
		65	50	42
Suspensão	25,5	11,6	9,7	8,9
Estaiada, 525m	43,5	14,5	12,2	11,1
Suspensão Auto-portante, 700m	25,5	16,8	13,9	12,9
	43,5	24,4	21,0	19,5
Ancoragem 30°	25,5	26,5	25,8	25,2
	40,5	37,7	35,9	34,3
Região típica =>		Sul/Sudeste	Centro/Sudeste	Norte/Nordeste

8.0 - 8.0 – TRANSPOSIÇÃO DE FASES

Uma solução possível para a transposição de fases em 500/525 kV é mostrada nos desenhos da Figura 6. Foi verificado que as distâncias mínimas são adequadas, da ordem de 6 a 7 m entre fases ao longo de um vão típico simulado com o software PLS-CADD (Powerline Systems Inc./EUA).

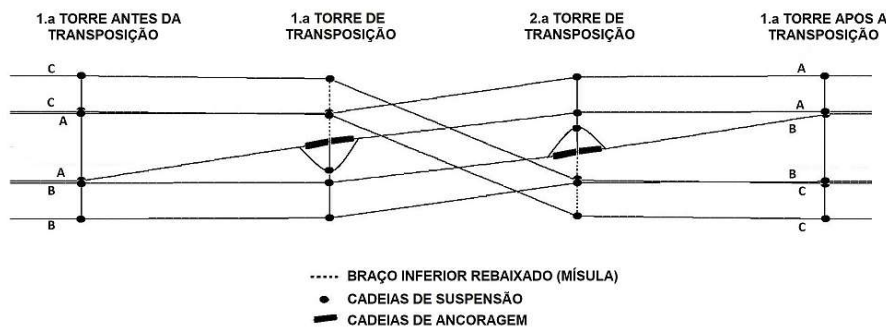


Figura 6 – Esquema de transposição sugerido



9.0 - 9.0 – ESTIMATIVAS DE CUSTOS

A aplicação da solução aqui descrita foi estudada para um caso real onde está prevista a construção de uma linha de transmissão de 500 kV com cerca de 500 km de extensão e potência natural de 1670 MW (reatância máxima 0,192 ohm/km), tendo sido previsto originalmente o uso de feixe elíptico com 6 condutores por fase.

Em função do baixo percentual de torres estaiadas resultante da solução *crossrope* devido à topografia acidentada da região (da ordem de apenas 35 a 40% de estaiadas), foi feita uma análise de custos comparativa com a solução *Splitfex*. Concluiu-se para este caso, por uma redução de custos total (considerando torres, ferragens, estais, adicionais de faixa, fundações e manutenção em 30 anos) da ordem de US\$ 28.000 por km de linha de transmissão.

Embora a torre monomastro apresente 20 a 30% maior peso do que a torre *crossrope* de mesma altura útil, verificou-se que o uso da solução *Splitfex* resultou numa redução de 5% do peso global de torres neste empreendimento específico. Isto deve-se ao maior peso das torres autoportantes da solução com torres *crossrope* (autoportantes tipo Raquete ou Cálice), que seriam utilizadas nos vãos não muito longos, e que são necessárias para evitar perda excessiva do SIL com esta solução de feixe elíptico & torres *crossrope*.

Estas estimativas, no entanto, são muito dependentes do percentual de torres estaiadas que se pretendia empregar inicialmente, ou seja, quanto menor esse percentual, maior será a economia que será obtida com a nova solução proposta.

Observa-se ainda que não está considerado nestas avaliações o benefício adicional obtido pelo fato da solução *Splitfex* propiciar o atendimento integral ao requisito de SIL e reatância requeridos, considerando que isto não seria obtido com a solução de torres *crossrope*.

Em um outro caso real analisado, onde o balanço assíncrono em vãos grandes de trechos acidentados limitou ainda mais o uso de autoportantes (Raquete ou Cálice) na solução *crossrope*, concluiu-se por utilizar um número significativo de autoportantes não compactas em substituição à *crossrope*. Neste caso verificou-se que os custos das duas soluções (feixe elíptico com *crossrope* x *Splitfex* com monomastro) ficam aproximadamente equivalentes, porém a solução *Splitfex* atenderia ao SIL de 1670 MW, enquanto que a solução com *crossrope* apresentaria comprometimento do SIL com redução da ordem de até 10 % (aumento deste percentual na reatância), e desta forma, a solução com *crossrope* estaria comprometida por não atender tecnicamente.

10.0 - 10.0 – CONCLUSÕES

Foi mostrado que o uso da solução denominada *Splitfex* nas LPNE de 500 kV/1670 MW, e 525 kV/1850 MW, apresentará vantagens técnicas e econômicas em terrenos não planos e/ou com solos de baixa resistências, permitindo o atendimento integral dos requisitos de SIL ou reatância especificados nos Contratos de Concessão das linhas de transmissão.



11.0 - 11.0 – REFERÊNCIAS

- [1] "LT 500 kV CS Barreiras II – R. das Éguas – Luziânia, Solução Eletromecânica Estrutural para SIL de 1670 MW", R.P. Guimarães, R.S. Nakamura, P.C. Campos, M.M.C. Guerra, A. Quintiliano, J.B.F. Silva, D. Souza – XXIII SNPTEE, 2015
- [2] "Otimização de LT Não Convencional de Alta Capacidade de 500 kV", J. Amon F., C.P.R. Gabaglia, M.J. Izzycki, F. Tavares, R.C.R. Menezes, A.S. Riqueira, F.C. Dart, J.B.G.F. Silva, L.F. Ferreira, XX SNPTEE, 2009
- [3] "Estudos e Aplicações do Feixe Expandido em LT de 500 kV", O.Régis Jr, S.J.G. Cavalcanti, A.P. Neto, F.C. Dart, XIV SNPTEE, 1997
- [4] "New Developments On The Combined Application Of Charge Simulation And Numerical Methods"- J.N. Hoffmann, P. Pulino – IEEE PAS 1995
- [5] "Improving the charge simulation method for the computation of high voltage electric fields with efficient least squares techniques" – J.N. Hoffmann, P. Pulino – Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 1997
- [6] "Cálculo e Medições de Rádio Interferência", N.S.R. Quoirin, R.L. Araujo, A.A. Costa, F.A. Guerra, L.M. Ardjomand, J.N. Hoffmann, XII Eriac, 2007
- [7] "Cálculo de Campos Elétricos Tridimensionais Típicos em Linhas de Transmissão", J.N. Hoffmann, XXI SPNTEE, 2011



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3407
AB/XXX/YY

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

12.0 - 12.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



André Hoffmann é formado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (2013) e MBA em Gestão de Pessoas do Setor Elétrico pela FGV (2019). Trabalhou no Departamento de Pesquisas em Estruturas Civas do Lactec, com modelagens de torres para cálculo estrutural, foi monitor da Isotech para os *softwares Pls-cadd* e *Tower*, atualmente trabalha na Fasttel Engenharia Ltda, na Gestão de Empreendimentos de Subestações e Linhas de Transmissão até 525 kV no formato *full EPC*.



João Nelson Hoffmann é formado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná (1981), com mestrado na Unicamp (1993) e especialização em Formação Gerencial na Puc-PR (2003). Trabalhou na Copel Geração e Transmissão SA, sendo autor de diversos artigos técnicos relacionados a estudos eletromecânicos de Linhas Aéreas de Transmissão.