

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**UMA PROPOSTA DE ANÁLISE TÉCNICA PARA LINHAS DE
TRANSMISSÃO COMPACTAS COM POTÊNCIA NATURAL
ELEVADA EM REGIÕES COM TOPOGRAFIA ACIDENTADA**

PEDRO HENRIQUE SOARES VILELA

DATA DA DEFESA: 02/08/2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

**UMA PROPOSTA DE ANÁLISE TÉCNICA PARA LINHAS DE
TRANSMISSÃO COMPACTAS COM POTÊNCIA NATURAL
ELEVADA EM REGIÕES COM TOPOGRAFIA ACIDENTADA**

PEDRO HENRIQUE SOARES VILELA

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Compatibilidade
Eletromagnética e Qualidade de Energia

Orientador: Prof. Ivan José da Silva Lopes, Ph. D.

BELO HORIZONTE

AGOSTO – 2019

V699u

Vilela, Pedro Henrique Soares.

Uma proposta de análise técnica para linhas de transmissão compactas com potência natural elevada em regiões com topografia acidentada [recurso eletrônico] / Pedro Henrique Soares Vilela. - 2019.
1 recurso online (x, 78 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Ivan José da Silva Lopes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 73-78.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Linhas de telecomunicação - Teses.
3. Topografia- Teses. I. Lopes, Ivan José da Silva. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)


"Uma Proposta de Análise Técnica Para Linhas de Transmissão Compactas Com Potência Natural Elevada Em Regiões Com Topografia Acidentada"

Pedro Henrique Soares Vilela

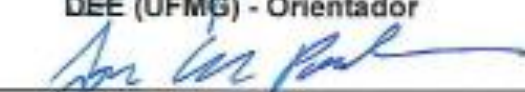
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 02 de agosto de 2019.

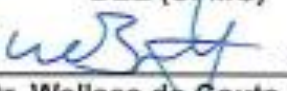
Por:



Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG)

Dedico este trabalho a minha família pelo apoio e a Deus pelas bênçãos recebidas.

Agradecimentos

A Deus e a Nossa Senhora Aparecida sou grato pelas bênçãos e oportunidades. Aos meus pais pelo incentivo e pelos exemplos de trabalho e humildade. A minha esposa e meu filho pelo apoio, compreensão e amor!

Agradeço muito aos colegas de trabalho e da universidade e aos professores do programa de pós-graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, em especial ao Professor Ivan José da Silva Lopes pelos ensinamentos, sabedoria, empenho e paciência para realização deste trabalho.

Muito obrigado mesmo!

Resumo

Apresenta-se uma proposta de análise técnica para investigar os parâmetros elétricos de uma linha de transmissão com Potência Natural Elevada (LPNE) em função da quantidade e tipos de torres necessárias para implantação da mesma em regiões com topografia acidentada. Estes parâmetros são utilizados para o cálculo do valor da impedância característica que, em função do valor da tensão do sistema de transmissão, definem o valor do Surge Impedance Loading (SIL); ou seja, a potência natural, em MW, alcançada pela LPNE. O estudo passa pela obtenção e análise do valor da potência natural atingida de acordo com as possibilidades de plotação da LPNE a ser implantada em regiões com topografia desafiadora, onde a plotação das estruturas torna-se complexa em função das limitações de espaços, altos custos fundiários, esforços mecânicos elevados e restrições socioambientais que este tipo de terreno normalmente apresenta. No caso analisado, onde a série de estruturas possui como torre típica a estrutura estaiada “Cross-Rope”, para atingir o patamar de 1670MW de potência natural na classe de tensão 500kV, circuito simples, verificou-se que alterações nas distâncias horizontais entre fases em função da utilização dos cinco tipos de estruturas que compõem a série possuem forte interferência no valor da impedância característica equivalente da linha de transmissão. Essa influência é mais significativa quando a incidência da torre típica é inferior a 80% das estruturas na plotação. Para esta condição, o valor do SIL alcançado pela LPNE fica abaixo do nível de potência de 1600MW. Por isso, valores abaixo dessa porcentagem de incidência da torre típica, deverão ser revisados, ou seja, as torres de suspensão leves autoportantes presentes na plotação otimizada para custos deverão ser substituídas por torres autoportantes pesadas que possuem geometria de disposição de cabos equivalente à torre “Cross-Rope” até obter o valor de SIL necessário. A análise econômica realizada mostra que estas alterações e definições das estruturas na plotação tem influência direta em pelo menos 35% do custo global de implantação de uma nova linha de transmissão aérea. Em função dos impactos em custo e desempenho operacional, a metodologia aplicada e os resultados obtidos neste trabalho, proporcionam a otimização de utilização das estruturas, para fomentar novos empreendimentos de transmissão de grande porte com elevada capacidade de

transmissão. Assim, o Sistema Interligado Nacional pode atingir o desempenho operacional esperado com máxima eficiência de forma a encontrar o ponto de equilíbrio econômico (medido pelo custo) x técnico (medido pelo desempenho).

Palavras chave: Linhas de Transmissão, Linha com Potência Natural Elevada, Sistema Interligado, Série de Estruturas, Feixe Expandido, HSIL, Topografia, Plotação, Projeto Executivo.

Abstract

A technical analysis proposal is presented to investigate the electrical parameters of a High Natural Power Transmission Line (LPNE) as a function of the number and types of towers required for its implementation in regions with rugged topography. These parameters are used to calculate the characteristic impedance value which, depending on the value of the transmission system voltage, defines the value of the Surge Impedance Loading (SIL); that is the natural MW power achieved by LPNE. The study aims to obtain and analyze the value of the natural power reached according to the possibilities of spotting the LPNE to be implanted in regions with challenging topography. Where spotting of structures becomes complex due to space constraints, high land costs, high mechanical stresses and socio-environmental constraints that this type of terrain normally presents. In the theoretical case analyzed, where the series of structures has as a typical tower the "Cross-Rope" structure, to reach the level of 1670MW of natural power in the 500kV single-circuit voltage class. It was verified that changes in the horizontal distances between phases due to the use of the 5 types of structures that make up the series, have strong interference in the value of the equivalent impedance of the Transmission Line. This influence is more significant when the incidence of the typical tower is less than 80% of the structures in the spotting, for this condition the SIL value reached by the LPNE is below the power level of 1600MW. Therefore, values below this percentage of typical tower incidence should be reviewed, that is the self-supporting light suspension towers present in the cost-optimized spotting should be replaced by heavy self-supporting towers that have cable-laying geometry equivalent to "Cross-Rope" until the required SIL value is obtained. The economic analysis has shown that these changes and definitions of the structures in the spotting have a direct influence on at least 35% of the overall cost of implementing a new overhead power transmission line. Due to the impacts on cost and operational performance, the applied methodology and results obtained in this work, provides the optimization of the use of the structures, to foment new large transmission projects with high transmission capacity. In order for the National Interconnected System to have the

expected operational performance with maximum efficiency in order to find the economic (measured by cost) and technical (as measured by performance) break-even point.

Key Words: Overhead Transmission Lines, High Natural Power Lines, Interconnected System, Family of Structures, Expanded Bundle, HSIL, Topography, Spotting, Executive Project.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Relevância e Motivação.....	1
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Metodologia.....	3
1.4	Organização do texto.....	5
2	Revisão Bibliográfica	6
2.1	Considerações Iniciais.....	6
2.2	Capacidade de Transmissão.....	7
2.3	Linhas de Transmissão Aéreas.....	13
2.3.1	Configurações das Linhas de Transmissão.....	13
2.3.2	Classe de Tensão 500kV.....	14
3	Influência do Projeto Executivo nos Parâmetros Elétricos da LPNE ...	16
3.1	Introdução.....	16
3.2	Parâmetros Elétricos das Linhas de Transmissão Aéreas.....	16
3.2.1	Metodologia de cálculo dos parâmetros da LPNE.....	18
3.3	Projeto da Série de Estruturas.....	23
3.3.1	Torres Estaiadas.....	24
3.3.2	Torres Autoportantes.....	27
3.3.3	Torres Compactas.....	30
3.4	Projeto Executivo da Linha de Transmissão.....	33
3.4.1	Estudo do Traçado.....	33
3.4.2	Faixa de Servidão.....	38
3.4.3	Plotação da Linha de Transmissão.....	39
4	Simulações	43
4.1	Introdução.....	43

4.1.1	Aplicação do modelo LCC para Linhas de Transmissão Aéreas	43
4.1.2	Verificação do Desempenho do Modelo de Linha - Line Check	48
4.2	Modelagem da LPNE.....	51
5	Resultados	57
5.1	Introdução	57
5.2	Parâmetros Elétricos e Potência Natural Obtidos pela LPNE em Função da Plotação das Estruturas	57
5.3	Compensação de Reativos para Aumento da Capacidade de Transmissão	60
5.4	Relação da Incidência da Torre Estaiada no Custo Global das Estruturas para Implantação de uma Linha de Transmissão Aérea	62
5.5	Opções de LPNEs com Estruturas que possuem Homogeneidade na Geometria das Torres que compõem a Série	65
6	Conclusões e Propostas de Continuidade	70
6.1	Introdução	70
6.2	Conclusões	70
6.3	Propostas de Continuidade.....	72
	Referências	73

1 Introdução

1.1 Relevância e Motivação

Anualmente, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), lança no mercado brasileiro editais de licitação de ampla concorrência para concessões de novas Linhas de Transmissão (LT's), possibilitando a disputa entre empresas nacionais e estrangeiras desde que atendidos os pré-requisitos e garantias exigidas pela agência reguladora. Em dezenove anos (período de 03/12/1999 até 20/12/2018), a ANEEL licitou 98.323,85 quilômetros de linhas de transmissão nas tensões de 230, 345, 440, 500 e 525 kV em CA (Corrente Alternada), 600 e 800 kV em CC (Corrente Contínua) [1]. Vale ressaltar também que já está sendo estudada a opção de sistemas de transmissão com classe de tensão 1.000 kV CA a fim de melhorar a eficácia e viabilidade econômica dos novos grandes sistemas de transmissão. Estudos indicam que esta classe de tensão torna-se viável para transmissão de potências superiores a 3.500MW e distâncias acima de 1.000km [2]. Para os próximos anos, destaca-se a implantação das novas instalações constantes no horizonte do Programa de Expansão da Transmissão (PET) que, até o ano 2024, demandará investimentos da ordem de R\$ 27 bilhões, sendo R\$ 21 bilhões referentes a instalações novas (linhas de transmissão e subestações) e R\$ 6 bilhões referentes a ampliações ou reforços [3].

Dentre as novas linhas de transmissão aéreas a serem construídas no Brasil, muitas delas terão potência natural elevada (LPNE) [1] para permitir maior capacidade de transmissão, a fim de proporcionar uma redução nos custos de construção com a compactação na distância entre fases, alta incidência de torres leves, assim como melhor aproveitamento do corredor de transmissão e redução de impactos ambientais em função da melhor relação MW transmitido por uma única linha de transmissão aérea. Desta forma, este estudo sobre linhas de transmissão compactas com potência natural elevada em regiões com topografia acidentada torna-se relevante por apresentar os desafios envolvendo as novas linhas de transmissão aéreas que serão implantadas no

Brasil e conectadas ao Sistema Interligado Nacional, que poderão aumentar a confiabilidade e a viabilidade econômica de novos sistemas de transmissão de grande porte.

Além disso, em função da necessidade de expansão e aperfeiçoamento das redes do sistema de transmissão nacional devido ao aumento da geração hidráulica assim como os novos parques eólicos e solares que serão construídos nos próximos anos, novas interconexões na rede básica e principalmente pela demanda crescente de consumo, torna-se necessário o desenvolvimento de projetos de LT's mais eficientes, que causem menores impactos ambientais e que sejam ativos cada vez mais rentáveis para as concessionárias, investidores e que atendam aos clientes e consumidores com altos índices de confiabilidade com menor custo possível. Neste contexto, dentre as LT's que compõem a rede básica nacional, podemos destacar as linhas de 500kV que, em função da potência natural, desempenho operacional e confiabilidade, constituem a classe de tensão que terá a maior expansão no Sistema Interligado Nacional nos próximos anos. A previsão é do aumento de 6.187km de extensão em 2019 [4]. Na Figura 1.1, podemos observar a evolução do sistema de transmissão de 1960 até a previsão para 2027.

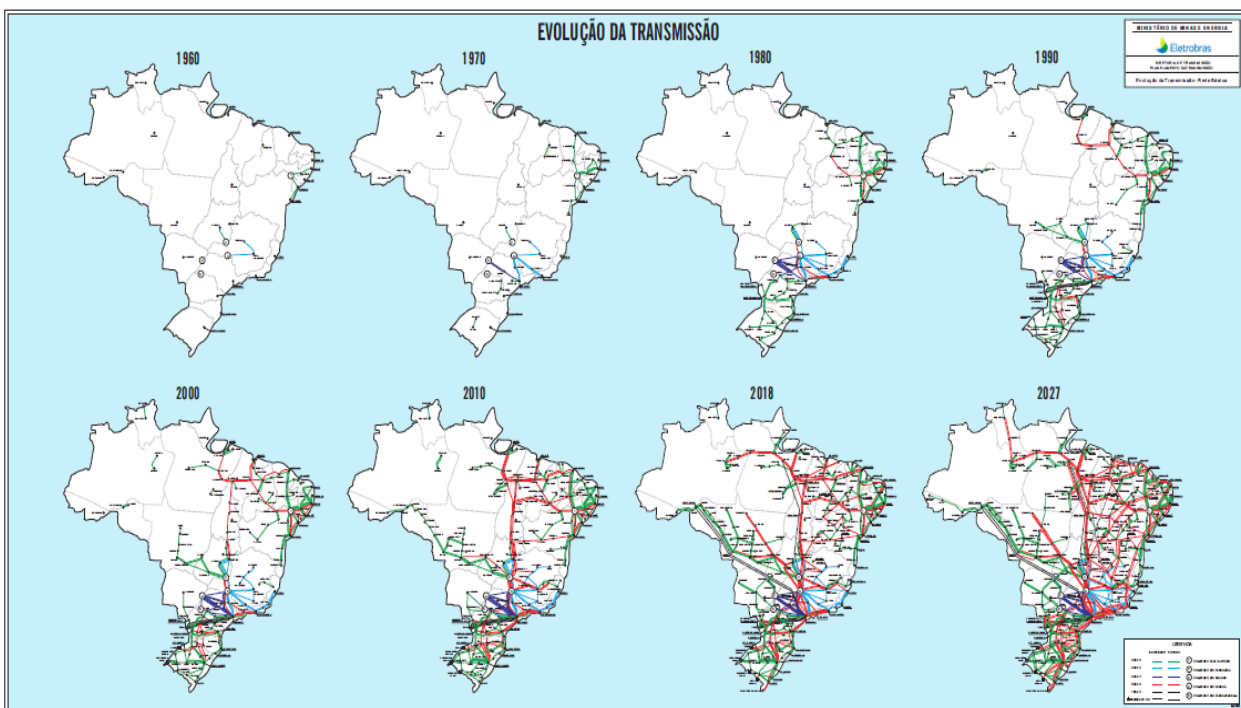


Figura 1.1 – Evolução da Transmissão - Rede Básica [5]

1.2 Objetivo

O objetivo principal desta dissertação é investigar os parâmetros elétricos de uma Linha com Potência Natural Elevada (LPNE) em função da quantidade e tipos de torres necessárias para implantação da mesma em regiões com topografia acidentada. Estes parâmetros são utilizados para o cálculo do valor da impedância característica que, em função do valor da tensão do sistema de transmissão, definem o valor do SIL a ser alcançado pela LPNE. O estudo tem por objetivo obter e analisar o valor da potência natural teórica atingida de acordo com a plotação (que é a definição da quantidade total de torres necessárias para construção da LT em projeto, a distribuição assim como a localização exata de cada estrutura ao longo do traçado e seu tipo) da LPNE a ser implantada em regiões com topologia desafiadora, onde é necessário maior flexibilidade de tipos de torres na série de estruturas para superar obstáculos, mitigar impactos ambientais e dificuldades construtivas.

1.3 Metodologia

A metodologia aplicada neste trabalho está baseada na teoria clássica de linhas de transmissão, para cálculo dos parâmetros em baixas frequências de uma LPNE em função da quantidade e geometria de cada tipo de torre utilizada para implantação da mesma. Foram feitas simulações computacionais a fim de se obter os valores destes parâmetros elétricos e impedância característica alcançados em função da plotação da LPNE, ou seja, para obtenção dos valores destes parâmetros foram feitas simulações variando a incidência da torre típica no software ATP para determinação da impedância característica equivalente da linha de transmissão.

Vale ressaltar que para uma LT convencional, o valor do SIL é calculado a partir dos dados básicos da torre típica. Por outro lado, para LT's com potência natural elevada que possuem a torre estaiada “Cross Rope” como torre típica para regiões com topografia acidentada, esta forma de análise não é a mais adequada devido à baixa incidência (que normalmente é inferior a 50%) da estrutura estaiada “Cross Rope” que atualmente é a principal alternativa utilizada em Linhas de SIL elevado no Brasil. Esta condição de baixa incidência de torres “Cross Rope”, que são as estruturas que aumentam o valor do SIL devido à compactação nas distâncias entre fases, pode

comprometer o valor da potência natural alcançada após implantação da LPNE, uma vez que as torres autoportantes convencionais provocam uma forte elevação nas distâncias horizontais entre fases em relação a “Cross Rope”, condição que causa redução no valor do SIL. Diante deste obstáculo, este trabalho apresenta uma abordagem para possibilitar o conhecimento prévio da potência natural a ser efetivamente alcançada, a partir dos dados de todas estruturas necessárias para plotação da LT presentes na série de torres desenvolvidas para a LPNE em estudo. Dessa forma, verifica-se o valor do SIL real para esta linha de transmissão através de simulações variando as porcentagens alcançadas de torres estaiadas, autoportantes de suspensão e de ancoragem utilizadas na plotação de LTs em áreas com topografia acidentada e com alta incidência de obstáculos a serem transpostos (normalmente encontrados nas regiões sul e sudeste do Brasil). Para obtenção do valor do SIL da LPNE em estudo, foram feitas simulações de variações na incidência de torres estaiadas, analisando os impactos desta alteração no valor da impedância característica da LPNE. Na Figura 1.2, podem ser observados os tipos de torres para linhas de transmissão em circuito simples e também circuito duplo que foram analisados neste trabalho:

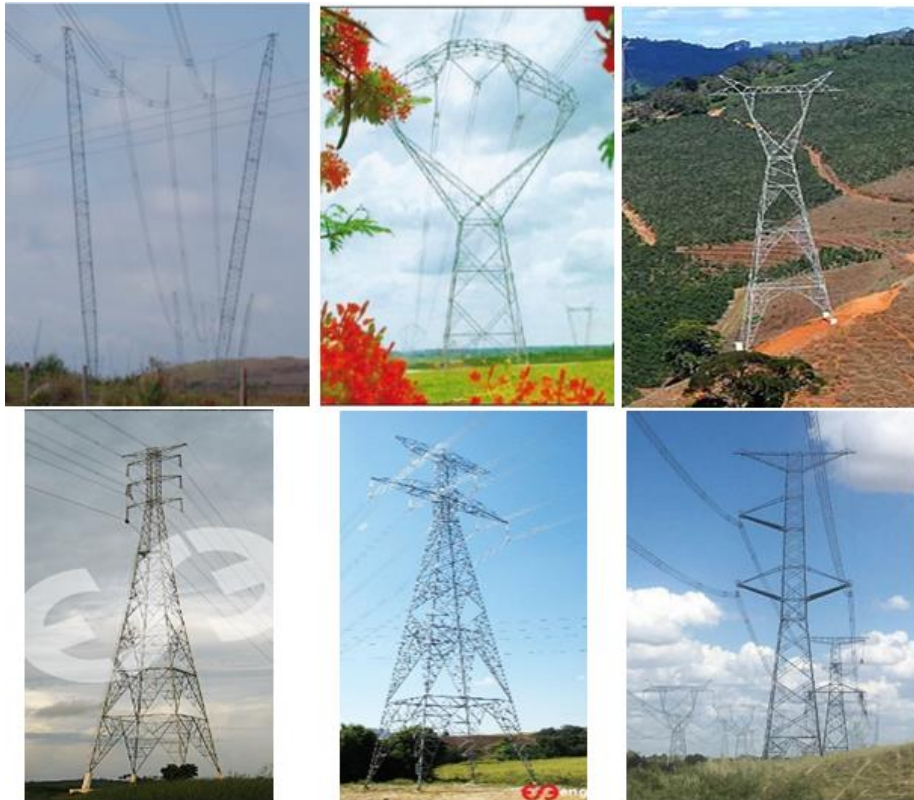


Figura 1.2 – Silhuetas das torres analisadas neste trabalho [6-9]

1.4 Organização do texto

O texto encontra-se organizado em seis capítulos incluindo este capítulo introdutório.

No **Capítulo 2**, são apresentadas as configurações, classes de tensão e capacidades de transmissão das linhas de transmissão aéreas.

No **Capítulo 3**, é abordado o projeto executivo das linhas de transmissão aéreas e a influência que o mesmo exerce nos parâmetros elétricos da LPNE.

No **Capítulo 4**, são apresentadas modelagens e simulações da plotação das estruturas para cálculo da impedância característica da LT em estudo e opções LPNE's compactas para regiões com topografia acidentada.

No **Capítulo 5**, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos

As principais conclusões são apresentadas no **Capítulo 6**, assim como proposta de continuidade deste trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações Iniciais

Diversos estudos referentes ao tema da capacidade de transmissão vem sendo desenvolvidos ao longo da história. De acordo com [10], podemos destacar os trabalhos elaborados pelos pesquisadores russos [11], nos quais verificou-se que o SIL era incrementado ao aumentar o número de condutores por fase; e que embora fosse um bom método, apresentava-se como limitante a quantidade de sub-condutores, pois o espaçamento entre fases tornava-se maior. Procurando diminuir as perdas de potência por condução assim como a queda de tensão nas linhas, foi proposto em [12] reduzir-se o espaçamento das fases e usar arranjos de condutores em vez de um condutor simples, seguindo uma metodologia de projeto em que se tem como limitante a geração do efeito corona nos condutores. Desta forma, a ampliação da capacidade de transmissão fica condicionada ao número de condutores e ao seu campo elétrico superficial máximo.

Considerando a perspectiva brasileira, já temos um sistema de transmissão implantado e em operação com potência natural elevada (o sistema de transmissão entre as SE's de Barreiras II e Luziânia, com capacidade de transmissão de 1670 MW em 500kV, circuito simples [13] e [14]). Estas LT's foram construídas em regiões de topografia plana, com poucos obstáculos a serem transpostos e condições favoráveis para construção de torres estaiadas, onde foi possível a utilização de aproximadamente 90% de torres estaiadas "Cross-Rope" (que são as estruturas que aumentam/melhoram o SIL da LT em função da compactação nas distâncias entre fases que a geometria das mesmas proporciona, a fim de atingir integralmente o valor solicitado nos editais da ANEEL de forma mais econômica). O próximo desafio será a implantação destas LT's com SIL elevado a partir da solução e experiência com a torre estaiada "Cross-Rope" utilizada com sucesso no norte e nordeste do Brasil em novas regiões com topografia acidentada (Sul e Sudeste) [1], [3] e [4] onde a quantidade de torres estaiadas serão reduzidas, o que afetará diretamente o custo do empreendimento, o tempo e dificuldades de construção assim como a impedância característica final obtida após plotação da LT.

A partir destas considerações, fica evidente que a definição do SIL obtido após a plotação de Linhas com Potência Natural Elevada (LPNE) em terrenos com topografia acidentada é um assunto que demandará aprofundamento de estudos, análises e metodologia de cálculos em função da quantidade e importância dos novos sistemas de transmissão a serem instalados nesta configuração [1], [3] e [4]. Para que o Sistema Interligado Nacional tenha o desempenho operacional esperado com máxima eficiência de forma a encontrar o ponto de equilíbrio técnico (medido pelo desempenho) × econômico (medido pelo custo). Dentre os estudos referentes ao aumento capacidade de transmissão já realizados, o foco principal foi na definição do feixe, a geometria da torre típica e estudos de otimização dos mesmos [6], [10], [15], [16].

Poucos estudos foram desenvolvidos com foco na verificação do SIL obtido após a implantação da LPNE, ou seja, considerando os dados de plotação do projeto executivo da mesma, sendo esta a razão e motivação principal para realização do presente trabalho. Assim, foi elaborada uma análise teórica da influência que a quantidade de incidência da torre típica (estaiada “Cross-Rope”) e dos demais tipos de torres que compõem a “família de estruturas” com geometrias distintas possui na determinação dos valores de parâmetros de uma LPNE, dados estes necessários para o cálculo do SIL final obtido pela mesma.

2.2 Capacidade de Transmissão

A capacidade de transmissão é definida em função do valor da tensão nominal de operação e pela impedância característica da linha de transmissão, que pode ser alterada modificando fatores como a rotação das fases sob seu próprio eixo de simetria, a quantidade de sub-condutores, a separação máxima entre eles, a forma dos feixes e o tipo de condutor; afetando também o campo elétrico superficial que é o principal responsável por limitar a potência que pode ser transmitida conforme abordado em [10].

Para analisar a capacidade de transmissão de determinadas linhas de transmissão aéreas e verificar que a LPNE em projeto atinja integralmente o valor de SIL necessário para operação segura do sistema interligado nacional ao qual a mesma se conectará, o valor do SIL (Surge Impedance Loading) é obtido a partir da seguinte equação:

$$SIL = \frac{V^2}{Z_C} [MW] \quad (2.1)$$

onde:

V^2 : tensão nominal da LT em kV e;

Z_C : impedância característica em Ohms (Ω).

São analisados os impactos provocados pela redução de torres estaiadas nos parâmetros da LPNE, a fim de verificar o valor da potência natural atingida em função da plotação das estruturas em regiões com topografia acidentada, onde a incidência de torres estaiadas na plotação é baixa devido a esta condição de terreno; assim como as opções de soluções para resolver este problema de forma a atender integralmente o SIL exigido pelos editais da ANEEL.

Dentre as alternativas possíveis, é analisada a utilização de estruturas autoportantes pesadas compactas (com geometria de disposição dos cabos equivalente a torre estaiada “Cross-Rope”) que contribuirão para redução da impedância característica da LT. A Figura 2.1 apresenta a parte superior comum de uma torre autoportante pesada conhecida como “Raquete”, onde pode-se observar as elevadas dimensões geométricas da mesma com 21,20m na vertical e 22,10m na horizontal. Na Figura 2.2 pode ser visto estas diferenças estruturais entre as torres “Raquete” e “Cross-Rope” já construídas.

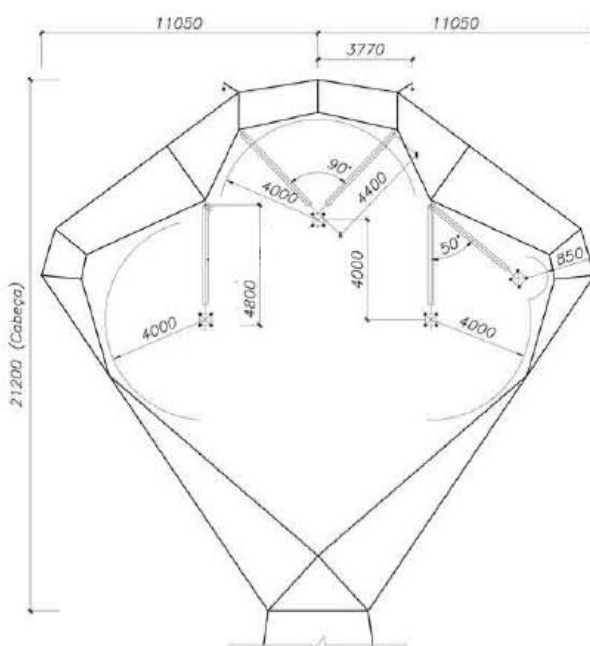


Figura 2.1 – Estrutura Autoportante Pesada “Raquete”. [17]

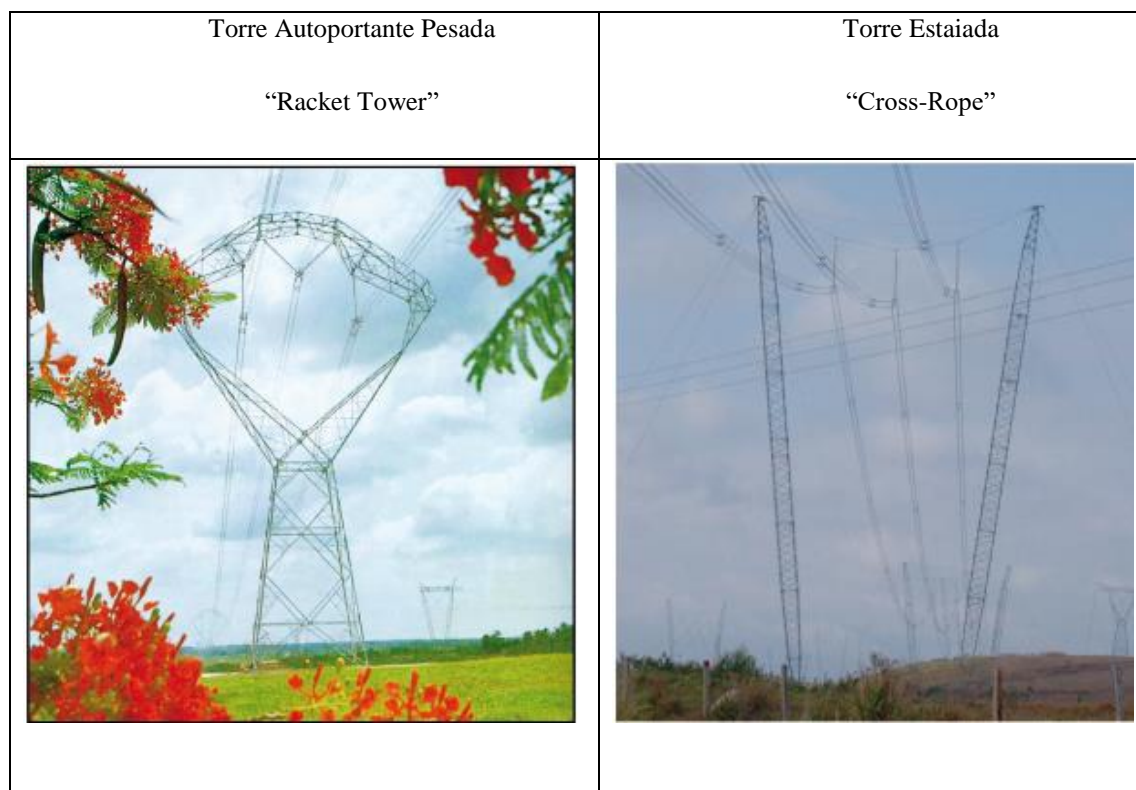


Figura 2.2 - Estruturas: Autoportante Pesada e Estaiada Cross-Rope. [6]

Além destas estruturas, a série de torres para a LPNE em estudo no presente trabalho também é composta por mais 3 tipos de torres, que são as estruturas de ancoragem meio de linha, ancoragem fim de linha e autoportante leve. Para ilustrar as diferenças entre as torres autoportantes leves (mais econômicas, tipicamente utilizadas nas LTs de 500kV circuito simples) em relação às pesadas, na Figura 2.3, é apresentada a silhueta da estrutura autoportante leve que aumenta as distancias horizontais entre fases, porém possui peso e custos muito menores do que a torre autoportante pesada “Racket Tower”, devido às dimensões do tronco básico serem menores 16m na vertical e 11m na horizontal.

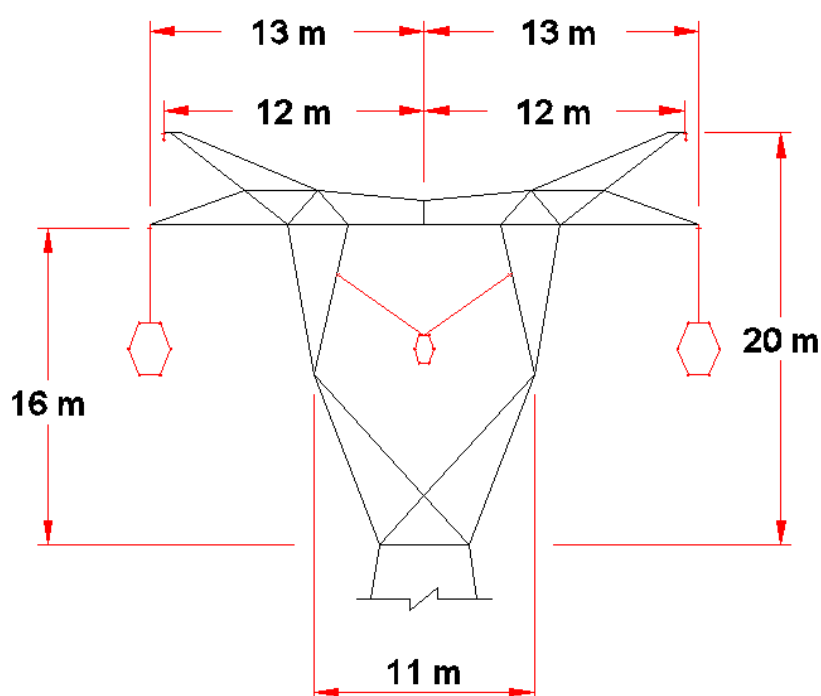


Figura 2.3 - Torre Autoportante Leve – Tipo “Delta” Adaptado de [18]

Como pode ser observado, a torre autoportante pesada possui uma geometria muito diferente das torres convencionais, tendo como consequência uma grande elevação de peso, custos e principalmente possíveis atrasos na obra em função da extrema dificuldade da montagem em campo da mesma, devido à instabilidade gerada pelas dimensões e peso que esta estrutura possui na parte superior.

Neste trabalho é apresentada uma proposta de análise para obtenção do valor do SIL da LPNE em função da quantidade e tipo das estruturas a serem utilizadas para implantação da mesma, caso este valor esteja abaixo do exigido pelos editais da ANEEL, teremos informações suficientes para detectar quanto deverá ser reduzida a impedância característica (z_c) da LT e desenvolver soluções para atender o valor do SIL mínimo a ser alcançado. Neste trabalho, uma das possibilidades considerada e simulada é a quantidade de torres autoportantes pesadas que deverão ser inseridas na plotação desta LPNE, ou seja, o número de torres autoportantes leves que deverão ser substituídas por autoportantes pesadas.

Vale ressaltar que estas alterações provocam forte aumento no custo e prazo de construção da LPNE sendo esta uma das principais motivações do trabalho, para que na fase inicial do empreendimento já seja conhecida a forma para alcançar a potência requerida e estimar o custo de implantação mais próximo do valor final. Para que a LPNE em projeto atinja integralmente o valor de SIL necessário para operação segura do Sistema Interligado Nacional ao qual a mesma se conectará.

Para isso o ponto inicial no estudo dos parâmetros de uma linha de transmissão aérea é analisar e definir quais são os cabos utilizados e a geometria dos mesmos. Neste caso são utilizados os dados encontrados para o sistema de transmissão entre as SE's de Barreiras II e Luziânia, com capacidade de transmissão de 1670 MW [13] e [14]. A geometria da torre típica que compõe a série de estruturas desta LPNE é apresentada na Figura 2.4 e as distâncias e características dos cabos condutores e para-raios na Tabela 2.1:

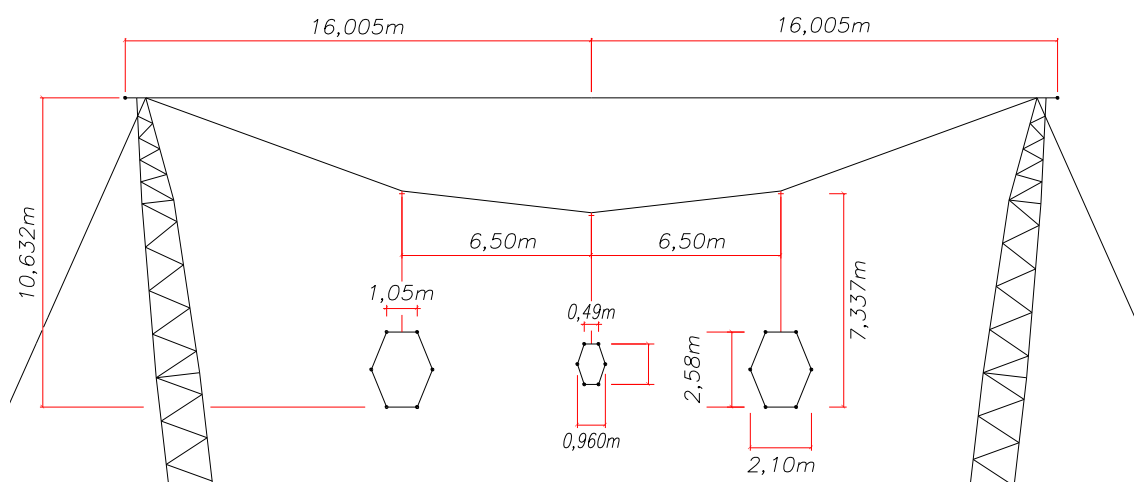


Figura 2.4 – Torre Típica da LPNE – Estrutura Estaiada Cross-Rope Adaptado de [13]

Tabela 2.1 – Distâncias Torre Estaiada Cross-Rope e dados considerados para os cabos condutores e para-raios adaptado de [13]

Resistência dos Condutores [Ω/km]	Raio Condutores e Para-raios [cm]		Distância	
			Horizontal X [m]	Distância Média Vertical Y [m]
0.0776	1.3505		-7.555	22.123
0.0776	1.3505		-0.480	22.308
0.0776	1.3505		5.455	22.123
0.0776	1.3505		-7.030	23.413
0.0776	1.3505		-7.030	20.833
0.0776	1.3505		-5.980	23.413
0.0776	1.3505		-5.980	20.833
0.0776	1.3505		-5.455	22.123
0.0776	1.3505		-0.245	23.003
0.0776	1.3505		-0.245	21.613
0.0776	1.3505		0.245	23.003
0.0776	1.3505		0.245	21.613
0.0776	1.3505		0.480	22.308
0.0776	1.3505		5.980	23.413
0.0776	1.3505		5.980	20.833
0.0776	1.3505		7.030	23.413
0.0776	1.3505		7.030	20.833
0.0776	1.3505		7.555	22.123

As distâncias entre os cabos condutores (CAA Tern) no feixe foram obtidas em [13] e a distância horizontal entre cabos condutores e para-raios, assim como o tipo de cabos para-raios foram estimados para desenvolvimento deste trabalho.

Outra opção que também pode ser utilizada para aumento da capacidade de transmissão são os ganhos de transmissão (fluxo de potência) obtidos através da inserção de bancos de capacitores série nas subestações terminais da LPNE. Esta análise é considerada neste trabalho e os valores obtidos são apresentados no capítulo de resultados. São consideradas também as opções e valores alcançados utilizando Linhas

de Transmissão 500kV circuito duplo, onde tem-se homogeneidade nas geometrias das estruturas que compõem a série, ou seja, menor variação da impedância característica da LPNE em função da incidência de cada tipo de estrutura na plotação.

2.3 Linhas de Transmissão Aéreas

2.3.1 Configurações das Linhas de Transmissão

Para cada classe de tensão temos diferentes configurações para as LTs assim como número de condutores por fase e conseqüentemente capacidade de transmissão em MW. Nas tabelas 2.2 e 2.3, são apresentadas configurações básicas/típicas para LTs de 500, 750 e 1000 kV:

Tabela 2.2 – Capacidade de Transmissão para LTs com diferentes classes de tensão. Adaptado de [16]

Tensão [kV]	Número de condutores por fase	Distância entre condutores no feixe [m]	Potência Natural SIL [MW]
500	4	0.457	1024
750	4	0.457	2123
1000	8	1.103	4552

Tabela 2.3 – Números máximos e mínimos de cabos condutores por fase em função da classe de tensão da LT. Adaptado de [16]

Tensão [kV]	500	750	1000
Número mínimo de condutores	3	4	8
Número máximo de condutores	6	8	10

2.3.2 Classe de Tensão 500kV

As primeiras LT's implantadas em 500kV foram projetadas com 3 cabos por fase e SIL de 900 MW. Depois, com a utilização de 4 cabos por fase obteve-se o SIL de 1000 MW com a expansão do sistema interligado nacional e o aumento no comprimento das LT's assim como no fluxo de potência a ser transmitido, estas linhas chegaram a um novo patamar com SIL de 1200 MW [10].

Para aumentar ainda mais a potência natural das LTs de 500kV, foi aplicado o conceito conhecido como "FEXCOM", que consiste em um arranjo equilibrado de compactação entre as fases e expansão dos feixes "super" expandidos, de forma a propiciar uma melhor distribuição do campo elétrico superficial dos condutores, reduzindo assim a impedância da linha através da combinação dos dois efeitos. O que se tem, então, é um aumento substancial na capacidade de transmissão, que, pode alcançar cerca de 60% a mais no mesmo corredor SIL de 1670 MW [13] e [14]. Na Figura 2.5, pode ser observado os feixes "super" expandidos para as fases laterais (de aproximadamente $2.58 \times 2.10\text{m}$) e também o feixe central mais compacto para manter as distâncias elétricas mínimas no meio do vão devido ao balanço dos cabos condutores (de aproximadamente $0.49 \times 0.96\text{m}$):

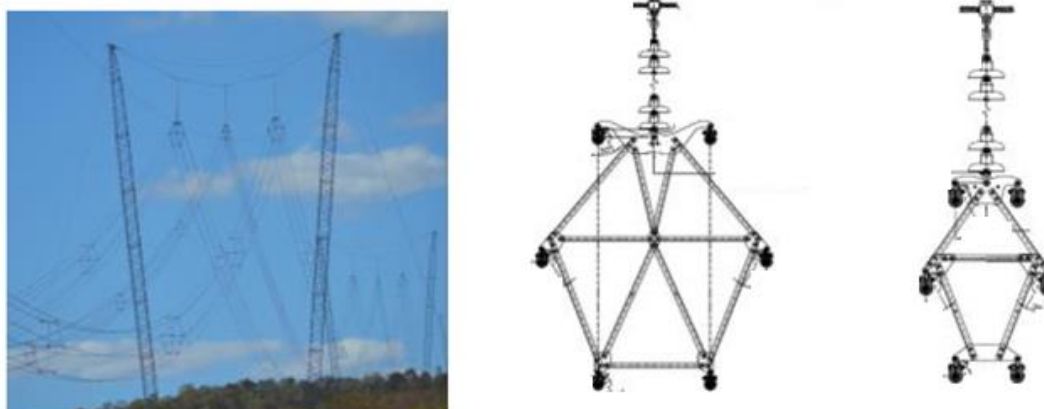


Figura 2.5 – Torre Estaiada “Cross-Rope” e Configuração do Feixe Expandido adaptado de [14]

Pode-se concluir que a capacidade de transmissão de uma linha de transmissão depende basicamente da tensão nominal, do número de cabos condutores, dimensões dos feixes, geometria e distâncias entre as fases e os cabos para-raios. Conforme já apresentado no início deste capítulo já foram realizados muitos trabalhos envolvendo a otimização dos feixes, condutores e disposição geométrica dos mesmos nas estruturas, a partir destes estudos e pesquisas foram desenvolvidas as características básicas da LPNE 500kV, circuito simples que é estudada nesta dissertação.

No presente trabalho é realizada uma nova abordagem sobre este tema onde considera-se a influência do projeto executivo nos parâmetros elétricos de uma LPNE em regiões com topografia acidentada. Para tal situação, somente a análise dos parâmetros da torre típica que é praticada nas linhas de transmissão convencionais não é adequada, devido às oscilações de incidência da mesma na plotação das estruturas.

3 Influência do Projeto Executivo nos Parâmetros Elétricos da LPNE

3.1 Introdução

Neste capítulo, inicialmente é realizada uma abordagem acerca da definição dos parâmetros elétricos a partir da teoria clássica de linhas de transmissão aérea para baixa frequência (60Hz). Além disso, são apresentados também os principais tipos de estruturas utilizadas atualmente nas linhas de transmissão no Brasil e finalmente são abordados os principais itens do projeto executivo das linhas de transmissão aéreas.

3.2 Parâmetros Elétricos das Linhas de Transmissão Aéreas

De acordo com a dissertação desenvolvida por SARMIENTO, J. S. A. “Ampliação da capacidade de transmissão de linhas aéreas melhorando a geometria dos feixes” (Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2016) [10]:

“A transmissão de energia elétrica é altamente influenciada pelos parâmetros das linhas de transmissão, especificamente das impedâncias e admitâncias. As impedâncias longitudinais correspondem aos elementos resistivos e indutivos, enquanto que as admitâncias transversais das linhas aéreas podem ser representadas somente pela capacitância da linha. Para analisar a capacidade de transmissão de determinada

LT é preciso entender como estes parâmetros são obtidos. A capacidade de transmissão da linha é uma característica de regime permanente, não tendo influência as parcelas dos parâmetros elétricos associados às frequências diferentes da fundamental”

“A potência característica (P_c) corresponde à potência que a linha transmite numa condição de equilíbrio entre a potência reativa gerada e consumida pela linha, ou seja, para esta condição de carga não há a necessidade de fornecer suporte de reativo para a linha. A impedância característica de sequência positiva da linha $Z_c[\Omega]$ e a tensão eficaz fase-fase do sistema (V_l) definem a capacidade de transmissão do sistema ou “Surge Impedance Loading” (SIL).

$$P_c = SIL = \frac{V_l^2 [\text{kV}]}{Z_c [\Omega]} \text{ [MW]} \quad (3.1)$$

Para calcular a impedância característica de sequência positiva da linha é necessário obter a impedância e a admitância de sequência positiva por unidade de comprimento da linha. Estes parâmetros são calculados a partir das matrizes de impedância e de admitância primitivas da linha. A impedância da LT pode ser descrita pelos efeitos internos e externos do fluxo de corrente nos condutores e nos condutores imagem localizados no solo, sendo formada pela composição da matriz de impedância interna com a matriz de impedância externa, conforme apresentado a seguir. Nas Linhas de Transmissão, e principalmente em sistemas de altas tensão o limite de potência é dado pela impedância característica do sistema, que pode ser calculada segundo a seguinte equação:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_+}{Y_+}} \quad (3.2)$$

Onde:

Z_+ corresponde à impedância de sequência positiva

Y_+ corresponde à admitância de sequência positiva”

3.2.1 Metodologia de cálculo dos parâmetros da LPNE

Para desenvolvimento dos cálculos para definição dos valores das impedâncias e admitâncias, são aplicados os conceitos da teoria clássica de linhas de transmissão aéreas [19] e também as técnicas de redução matricial.

Uma linha de transmissão aérea com n condutores pode ser caracterizada por meio das seguintes equações:

$$\frac{dV(x)}{dx} = -(Z'_i + Z'_g + Z'_e)I(x) = -Z'I(x) \quad (3.3)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -[Y'_g + Y'_e]^{-1}V(x) = -Y'V(x) \quad (3.4)$$

onde:

- $V(x)$ e $I(x)$: são vetores com dimensão $n \times 1$;
- Z'_i : é uma matriz diagonal de ordem $n \times n$ contendo a impedância interna dos condutores aéreos;
- $Z'_e = j\omega L'_e$ e $Y'_e = j\omega C'_e$: são matrizes de ordem $n \times n$ contendo a impedância e a admitância externa associadas ao meio dielétrico entre os condutores, respectivamente;
- Z'_g e Y'_g : são matrizes de ordem $n \times n$ contendo a impedância e a admitância associadas ao retorno pelo solo, respectivamente.

Em geral, para aplicações envolvendo frequências inferiores a 10MHz é possível desprezar o efeito de Y'_g e considerar apenas a admitância externa no cálculo dos parâmetros de linha. O ATP não considera a possibilidade de se incluir Y'_g e neste trabalho também não é considerado Y'_g pois as análises e cálculos serão desenvolvidos para condição de baixas frequências (60 Hz).

Para o cálculo dos parâmetros longitudinais da LT em estudo, inicialmente calcula-se a condutividade elétrica dos condutores a partir da seguinte equação:

$$\sigma = \frac{1}{R'_{i,ii} \pi r_{o,ii}^2} [S/m] \quad (3.5)$$

onde:

- σ : condutividade elétrica do condutor (S/m);
- $R'_{i,ii}$: resistência em corrente contínua do i-ésimo condutor (Ω/m) e;
- $r_{o,ii}$: raio externo do i-ésimo condutor (m).

A partir da condutividade, pode-se iniciar os cálculos da impedância interna dos condutores utilizando-se, para isso as fórmulas aproximadas indicadas abaixo:

$$Z'_{i,ii(HF)} = \frac{1}{2\pi r_{o,ii}} \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} [\Omega/m] \quad (3.6)$$

$$Z'_{i,ii} = \sqrt{R'^2_{i,ii(cc)} + Z'^2_{i,ii(HF)}} [\Omega/m] \quad (3.7)$$

onde:

- $Z'_{i,ii(HF)}$: impedância do condutor em altas frequências, deduzida supondo a condução de corrente em um anel com espessura igual à profundidade de penetração (Ω/m).

Depois de definida a impedância interna é feito o cálculo da impedância externa, que só depende da distribuição geométrica dos condutores (alturas h_i e h_j e coordenadas horizontais x_i e x_j) e da permeabilidade magnética do meio, que no ar é

equivalente à do vácuo, isto é, $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m. Esta matriz é invariante com a frequência. Determinada a matriz L'_e , a matriz de impedâncias externas é calculada como: $Z'_e = j\omega L'_e$.

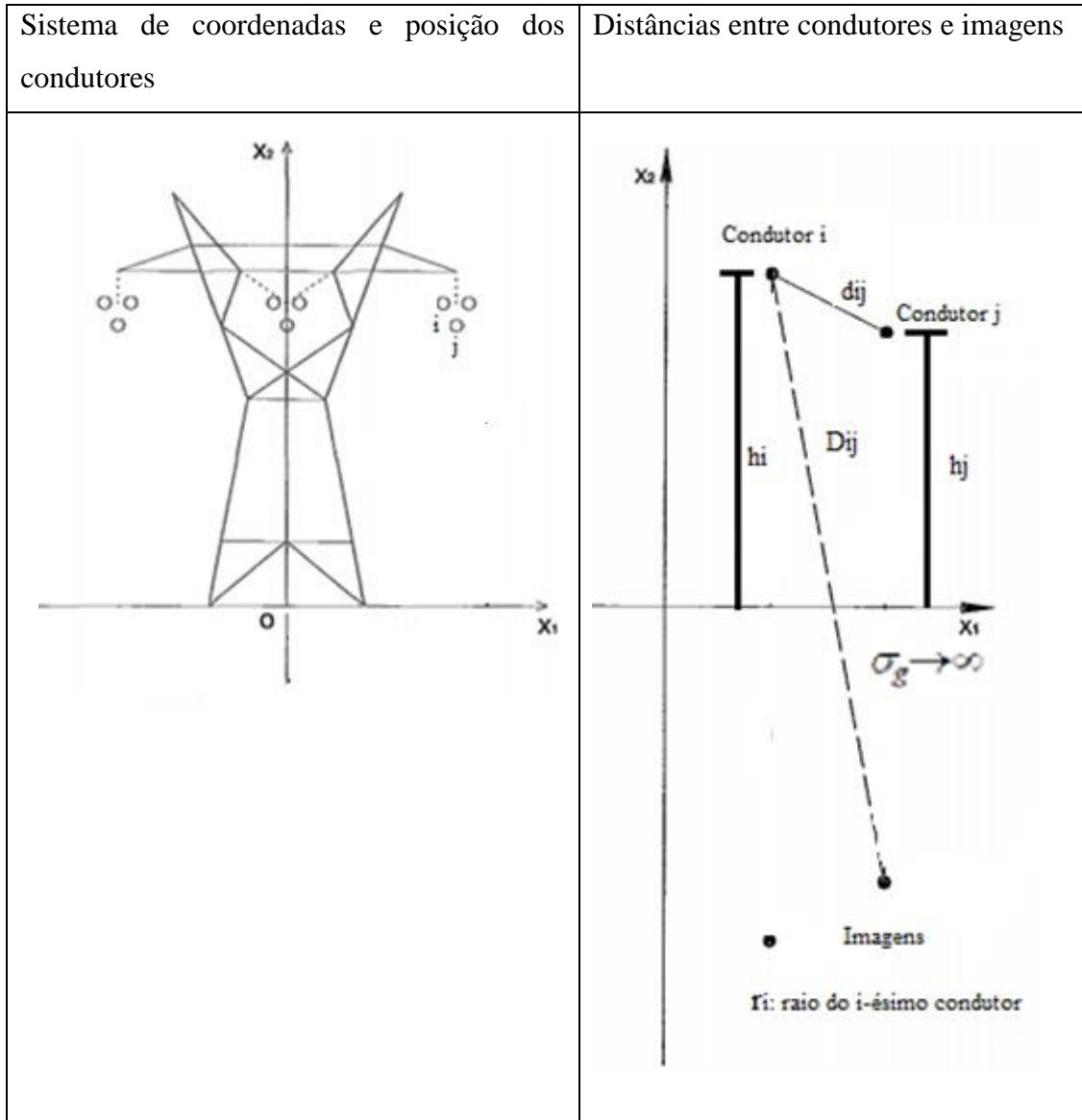


Figura 3.1 – Disposição dos condutores para cálculo Indutância Externa. Adaptado de [20]

$$L'_{e,ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad [H/m] \quad (3.8)$$

$$L'_{e,ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad [H/m] \quad (3.9)$$

Para a impedância de retorno pelo solo são utilizadas as seguintes equações [19] e [21]:

$$p = \sqrt{\frac{\sigma_g}{j\omega\mu_0}} \quad [m] \quad (3.10)$$

$$Z'_{gii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{h_i+p}{h_i} \right] \quad [\Omega/m] \quad (3.11)$$

$$Z'_{gij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(h_i+h_j+2p)^2+r_{ij}^2}}{\sqrt{(h_i+h_j)^2+r_{ij}^2}} \right] \quad [\Omega/m] \quad (3.12)$$

Após os cálculos dos parâmetros longitudinais, são calculados os parâmetros transversais da linha de transmissão, onde a matriz de capacitâncias externas C'_e só depende da distribuição geométrica dos condutores e da permissividade elétrica do meio dielétrico. Esta matriz também é invariante com a frequência. Da relação $C'_e * L'_e = \mu_0 \varepsilon_0 1$, onde 1 é a matriz identidade, a matriz C'_e pode ser calculada como $C'_e = \mu_0 \varepsilon_0 L'_e^{-1}$, onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m e $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m. Determinada a matriz C'_e , a matriz de admitâncias externas é calculada como:

$$Y'_e = G'_e + j\omega C'_e \quad [S/m] \quad (3.13)$$

onde G'_e é uma matriz diagonal contendo a condutância associada ao meio externo aos condutores (S/m). No caso de linhas aéreas, o valor desta condutância pode ser desprezada sem maiores problemas na maior parte das situações de interesse.

Após a definição dos parâmetros da LT, em muitas situações é possível e/ou desejável reduzir a ordem das matrizes de impedância e admitância por unidade de comprimento resultantes [22]. Assim, para aplicação das técnicas de redução matricial no caso da LPNE em estudo neste trabalho com SIL de 1670MW, temos 18 cabos condutores (6 cabos por feixe) e 2 cabos para-raios, ou seja, uma matriz 20x20, dessa forma os cabos condutores serão agrupados em cada um dos respectivos feixes, assim cada fase terá um condutor equivalente e com a eliminação dos cabos para-raios a matriz reduzida terá dimensão 3x3. Na análise de transitórios lentos, em algumas situações é possível supor potencial nulo para os cabos para-raios. Nesse caso temos:

$$\frac{dV(x)}{dx} = -Z'I(x) = \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_A(x) \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z'_{AA} & Z'_{AB} \\ Z'_{BA} & Z'_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A(x) \\ I_B(x) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Onde $V_A(x)$ e $I_A(x)$ correspondem aos vetores de tensão e corrente nos condutores não aterrados. Isolando-se o vetor $I_B(x)$ e substituindo-o na primeira linha da equação matricial, pode-se escrever:

$$\frac{dV_A(x)}{dx} = -Z'_{red}I_A(x) \quad (3.15)$$

$$Z'_{red} = Z'_{AA} - Z'_{AB}Z'^{-1}_{BB}Z'_{BA} \quad (3.16)$$

A ordem da matriz reduzida Z'_{red} é igual a $(n - n_{pr})$, onde n corresponde ao número total de condutores e n_{pr} corresponde ao número de cabos para-raios eliminados. Esta prática só é recomendada em estudos de fenômenos transitórios lentos. No caso dos feixes simétricos, é possível agrupar os condutores i, j, k de um feixe em uma única fase R fazendo:

$$\frac{dV_R(x)}{dx} = \frac{dV_i(x)}{dx} = \frac{dV_j(x)}{dx} = \frac{dV_k(x)}{dx} \quad (3.17)$$

$$I_R = I_i + I_j + I_k \quad (3.18)$$

A LT em análise neste trabalho possui feixes assimétricos, e para definir o condutor equivalente de cada fase poderá ser adotada a metodologia descrita acima, a fim de

agrupar os 6 condutores de cada feixe para obter 1 condutor equivalente por fase. A partir dessas condições é possível reduzir Z' e Y' , que passam a ter ordem $[n - k*(nb - l)]$, onde n é o número original de condutores, k é o número de fases e nb é o número de condutores por fase. Para transformar os parâmetros em suas respectivas sequências pode ser utilizada a matriz de Fortescue [23], para transformação de componentes simétricas A onde a relação de tensões é $V_{abc}=A*V_{012}$:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 & V_1 & V_2 \\ V_0 & \alpha^2 V_1 & \alpha V_2 \\ V_0 & \alpha V_1 & \alpha^2 V_2 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Onde:

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} \text{ (representando a defasagem de } 120^\circ \text{ entre tensões)}$$

3.3 Projeto da Série de Estruturas

Para viabilizar a implantação de linhas de transmissão aéreas de grande porte, uma das premissas fundamentais é o desenvolvimento do projeto das séries de torres adequadas para a LT em projeto com aplicações elétricas, mecânicas e alturas úteis otimizadas.

De acordo com [Referencia 24]:

“A elaboração do projeto das estruturas tem como objetivo principal reduzir os custos sem perder qualidade da transmissão. No contexto econômico, uma linha de estudo muito pesquisada, são as linhas compactas, também conhecidas como Linha de Potência Natural Elevada (LPNE). Esta tecnologia permite aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica de uma linha por meio da disposição adequada dos condutores das fases, de modo a otimizar a distribuição de campo elétrico. Ou seja, para uma mesma potência a ser transmitida, a LNPE garante um projeto mais econômico que os projetos tradicionais de linhas de transmissão. A tecnologia LPNE pode ser utilizada tanto para novos projetos quanto para recapacitação de linhas em operação. Nos últimos quatro anos, surgiram diversas pesquisas, tanto no ambiente nacional como internacional, avaliando a viabilidade do uso do máximo de condutores por fases sem prejudicar a qualidade da transmissão de energia. Estudam-se diversas

geometrias de junções, de forma a diminuir as distâncias entre fases e permitir o máximo de condutores por fase essa compactação permite aumentar a quantidade de energia transmitida, sem a necessidade de implantar novas linhas de transmissão. Esses esforços em compactar a linha têm, em comum, um objetivo e um obstáculo, até então intransponível: o objetivo é de aproximar ao máximo as fases, e o obstáculo é a manutenção do comprimento do vão constante.”

Um exemplo de estrutura econômica para compactação nas distancias horizontais entre fases é a torre estaiada “Cross-Rope” apresentada na Figura 2.3.

Os tipos de estruturas presentes na “família de torres” podem ser divididos segundo a forma de resistir aos carregamentos, assim as estruturas serão classificadas em estaiadas ou autoportantes, conforme pode ser observado nos itens abaixo.

3.3.1 Torres Estaiadas

As torres estaiadas são sustentadas mecanicamente pelo mastro central e pelos estais. Os esforços nesta estrutura são divididos entre as cargas de tração e de compressão, que são transmitidas ao terreno através das fundações, este comportamento pode ser observado na Figura 3.2:

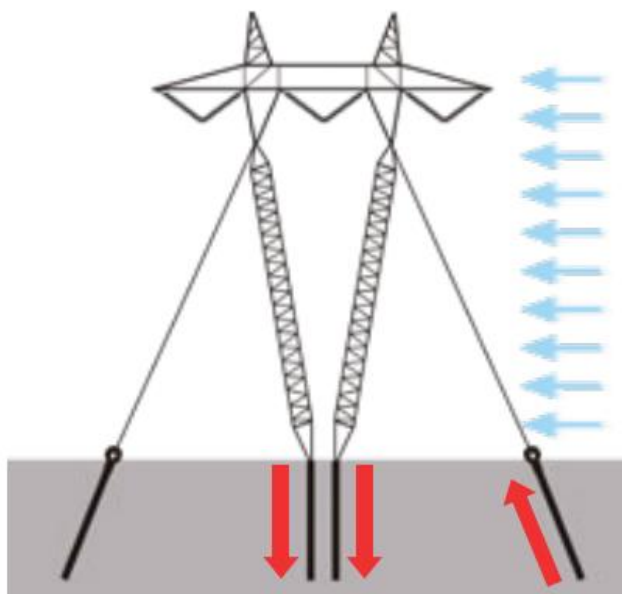


Figura 3.2 – Torre Estaiada. [25]

Na Figura 3.3 é apresentada a torre estaiada utilizada com sucesso para LPNE's implantadas em locais com topografia plana:

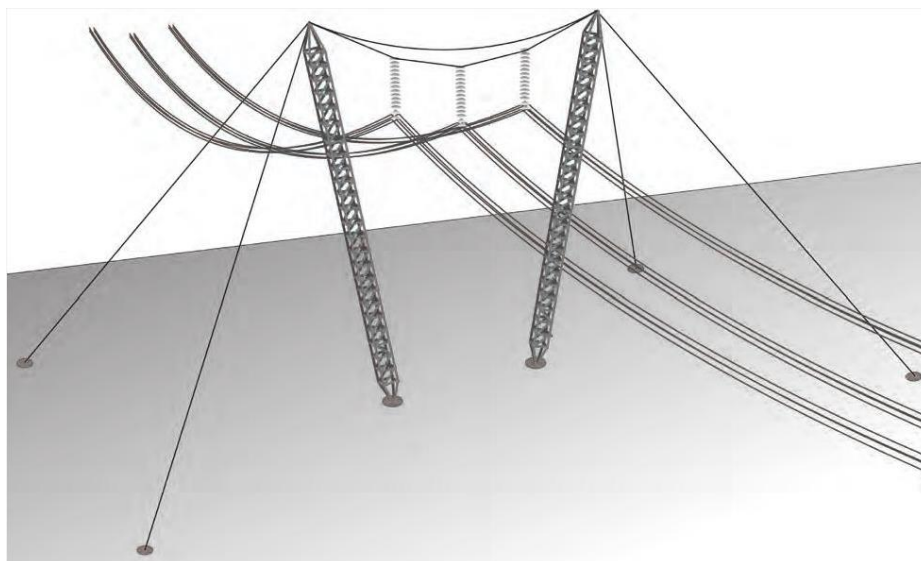


Figura 3.3 – Torre Estaiada “Cross-Rope” [26]

Outra configuração de torres estaiadas muito utilizada no Brasil nas classes de tensão 230 e 500kV consiste em estruturas conhecidas como “Cara de Gato”, que é uma torre compacta, leve com alto valor de vão de médio em torno de 500m para a classe de tensão 500kV. Na Figura 3.4, tem-se uma aplicação para LTs de 500kV das torres estaiadas próximas da subestação de Foz do Iguaçu:



Figura 3.4 – Torres Estaiadas “Cara de Gato” próximas da Subestação de Foz do Iguaçu [27]

Para as LTs em circuito duplo 500kV no Brasil a opção mais utilizada onde não há restrições para a largura da faixa de servidão é a configuração triangular conhecida como “Torre Danubio” onde temos uma boa distribuição de campo elétrico em função da geometria e conseqüente melhor capacidade de transmissão em comparação com as geometria vertical com mesmo feixe, para o circuito vertical é necessário fazer uma expansão de 200mm no feixe para atingir a mesma potência no circuito triangular conforme poderá ser observado no capítulo de resultados deste trabalho. Ambas as estruturas possuem vão médio elevado, a torre triangular mais leve exige em média 10m a mais de faixa de servidão em relação a torre vertical que possui peso unitário maior em função de sua altura mais elevada, conforme pode ser observado na Figura 3.5:

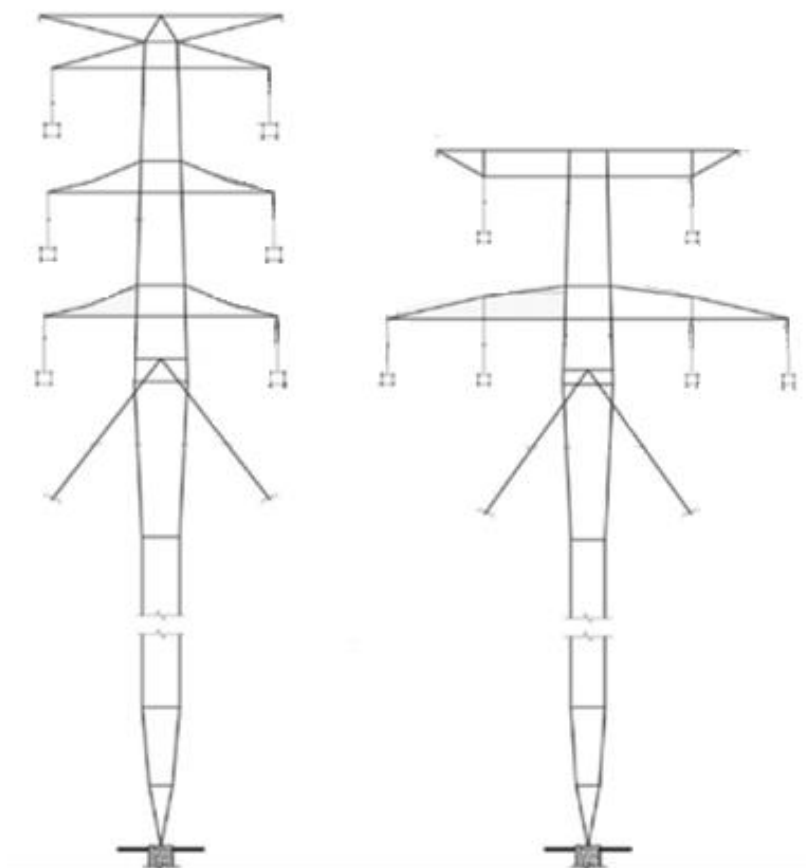


Figura 3.5 – Torres Estaidas Monomastro Vertical e Danúbio para 500kV, circuito duplo [28]

3.3.2 Torres Autoportantes

Para as torres Autoportantes que são sustentadas por quatro pés, a transferência dos esforços da torre para o solo é realizada diretamente através das fundações dos pés desta estrutura, conforme pode ser observado na Figura 3.6:

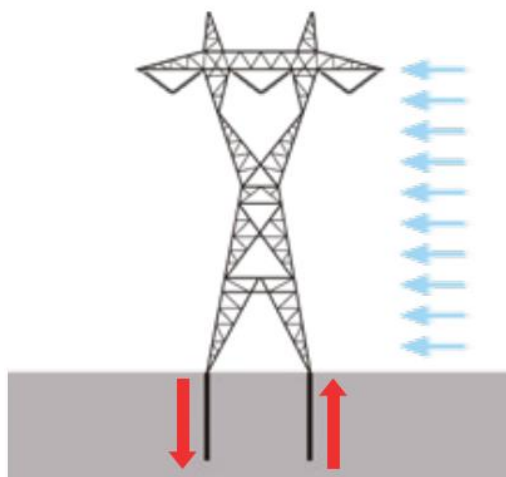


Figura 3.6 – Torre Autoportante. [25]

A “Torre Raquete” que possui geometria e distâncias entre fases equivalente à torre estaiada “Cross-Rope”, porém com peso e dificuldades construtivas elevados o que limita em muito a utilização desta estrutura, sendo portanto restrita a casos especiais. Na Figura 3.7 podemos ver um exemplo de utilização desta estrutura em uma região com topografia plana.



Figura 3.7 – “Torre Raquete”. [29]

Já as estruturas autoportantes tipo Delta, são largamente utilizadas tanto em regiões com topografia plana quanto para topografia acidentada para as classes de tensão de 345, 500 e 750kV em circuito simples no Brasil:



Figura 3.8 – “Torre Delta”. [30]

Outra estrutura muito utilizada em diversos tipos de terreno é a torre autoportante “Cara de Gato” aplicada nas LTs de 230 e 500kV circuito simples:



Figura 3.9 – Torre Autoportante “Cara de Gato”. [8]

As estruturas autoportantes de suspensão e ancoragem circuito duplo vertical, são muito utilizadas onde é necessário faixas de servidões compactas:

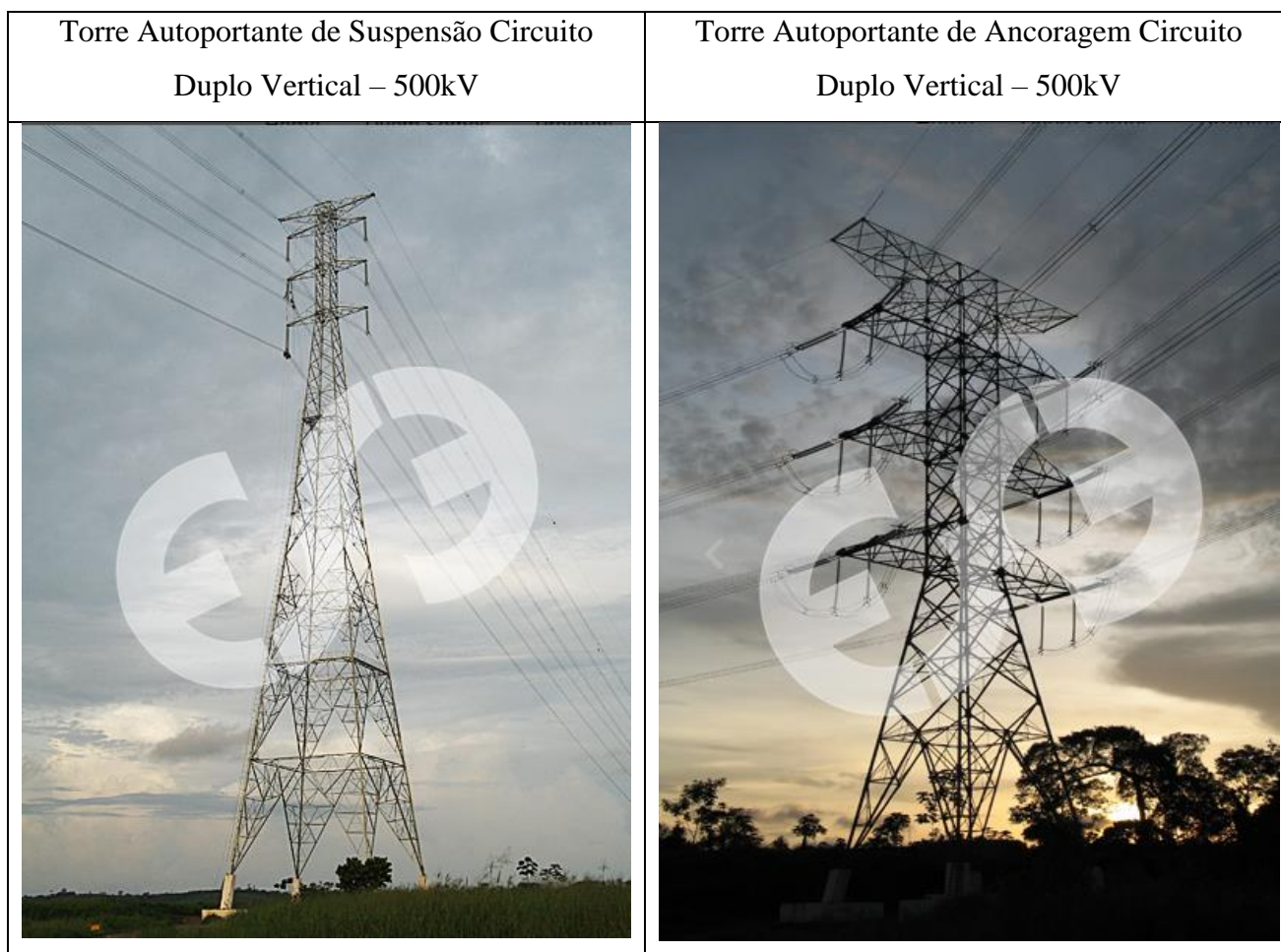


Figura 3.10 – Torres Autoportantes de Suspensão e Ancoragem Circuito Duplo Vertical. [8]

Por último, a Fig. 3.11 mostra o arranjo da torre autoportante com geometria triangular, conhecida como torre “Danúbio”:



Figura 3.11 – Torre Autoportante Triangular Circuito Duplo “Danúbio”. [8]

3.3.3 Torres Compactas

Para regiões onde os custos fundiários são elevados ou ocorram restrições e limitações socioambientais, estruturas compactas podem ser utilizadas como opção de solução para viabilizar novos sistemas de transmissão de grande porte. Uma solução interessante a ser considerada nestes casos é conhecida como Torre CICA (Composite Insulated Cross-Arm) [31-33], que consiste em uma estrutura onde as mísulas são formadas por isoladores poliméricos com dupla função, ou seja, além garantirem a isolamento elétrica entre os cabos condutores e a estrutura, estas cadeias horizontais tem também a função de mísula e suportam mecanicamente os cabos condutores, conforme pode ser observado na Figura 3.12 de uma torre para 500kV, circuito duplo:



Figura 3.12 – Torre “CICA” 500kV – Circuito Duplo adaptado de [31]

A torre “CICA” tem a mísula composta pelos seguintes materiais e conexões;

- 1) Isolador Polimérico Principal que suporta maior carga mecânica (Line post);
- 2) Isolador Polimérico Auxiliar “Estai” (tem a função de estabilizar o conjunto e aumentar a resistência mecânica);
- 3) Conexão de acoplamento de metálico entre os isoladores poliméricos e cadeia de suspensão;
- 4) Cadeia de suspensão dos feixes dos cabos condutores;
- 5) Anéis anti-corona;
- 6) Anéis de gradiente e;
- 7) Conexão dos conjuntos (com a torre).

Esta solução “CICA” já é utilizada fora do Brasil para a classe de tensão 750kV como pode ser observado nas imagens da Fig. 3.13:



LT 750kV CS LT Foz do Iguaçu - Tijuco Preto (Brasil) [34]	LT 750kV CS - Faixa Compacta - CICA Tower (China) [9]
	

Figura 3.13 – Comparação entre Linhas de Transmissão 750kV [9] e [34]

Conforme pode ser observado, a solução de torres compactas “CICA” pode ser aplicada para LTs de 750kV em locais onde é necessário uma faixa de servidão mais compacta. Estudos elaborados pela Shermar empresa que desenvolveu a torre “CICA” indicam que esta estrutura possibilita uma redução de 30% na largura da Faixa de Servidão em comparação com as soluções convencionais [9, 31-33, 35 e 36].

3.4 Projeto Executivo da Linha de Transmissão

Esta dissertação propõe uma análise do valor de SIL alcançado no âmbito do projeto executivo das novas LTs, ou seja, levando em consideração as demais estruturas presentes na plotação, para calcular a impedância característica equivalente de sequência positiva desta LT buscando uma condição mais próxima do que será implantado em campo.

Vale ressaltar que a plotação da Linha de Transmissão é o principal escopo do projeto eletromecânico e também de todo projeto executivo pois a partir da plotação é que serão feitas as definições de fundações das estruturas, ajustes na série de estruturas, lista de construção e de materiais assim como identificação das dificuldades construtivas e plano de ataque para execução da obra.

3.4.1 Estudo do Traçado

O estudo do traçado é fundamental para o desenvolvimento, implantação e viabilidade das novas LTs, pois o traçado será uma das referências para plotação das estruturas e conseqüentemente a elaboração do projeto executivo da LT. Os cruzamentos com Linhas de Transmissão com tensão menor do que a Linha em estudo deverão ocorrer, sempre que possível, no meio do vão da linha cruzada. De acordo com o item 7.8 Travessia com LT da rede básica, dos Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão Aéreas – Submódulo 2.4 do ONS [37] informa que:

“7.8.1 O agente de transmissão deve evitar ao máximo o cruzamento sobre LT existentes. Caso o cruzamento seja inevitável, o agente deve identificar esses casos, tanto nas entradas/saídas das subestações quanto ao longo do traçado das LT, e informar no projeto básico as providências que serão tomadas no sentido de minimizar os riscos inerentes a esses cruzamentos, ficando a critério da ANEEL a aprovação dessas providências.

7.8.2 O agente de transmissão deverá relacionar no projeto básico os cruzamentos da LT em projeto com outra(s) LT existente(s) da rede básica. Seguem,

abaixo, as informações mínimas da(s) LT em cruzamento a serem prestadas pelo agente:

- (a) identificação com as SEs terminais do trecho em questão;*
- (b) tensão nominal;*
- (c) número de circuitos; e*
- (d) disposição das fases (horizontal, vertical, triangular etc).*

7.8.3 Nos casos relacionados a seguir, de cruzamento da LT em projeto com outra(s) LT da rede básica, a LT em projeto deverá cruzar necessariamente sob a(s) existente(s):

- (a) quando um circuito simples (em projeto) cruzar, num mesmo vão de travessia, mais de um circuito de LT existente com tensão igual ou superior a de projeto; ou*
- (b) quando a tensão nominal da LT em projeto for menor que da LT existente.”*

Nos casos de cruzamentos com linhas de tensão superior ou igual, com maior número de circuitos deverá ser estudado o ponto de cruzamento adequado de modo a evitar modificações nas linhas cruzadas por distâncias mínimas de segurança, já que a LT em estudo deverá passar sob a linha existente, na Figura 3.14 pode-se observar os traçados das principais LTs do Brasil:



Figura 3.14 – Mapa Sistema Interligado Nacional – Horizonte 2017. [4]

A definição do traçado deverá seguir critérios para viabilizar a implantação da LT em estudo, para isso vale destacar que as deflexões deverão ser reduzidas ao mínimo, tanto em grandeza quanto em quantidade. A ordem de grandeza de tais deflexões deverá respeitar os valores máximos dos ângulos suportados pela série de torres, conforme determinado pelas características das estruturas a serem aplicadas. Deverão ser evitadas deflexões junto a travessias sobre rodovias, ferrovias, Linhas de Transmissão, vias navegáveis, oleodutos, gasodutos e adutoras. Nos casos inevitáveis, o vértice deve localizar-se no mínimo, fora dos limites da faixa de segurança e não edificante do obstáculo a ser transposto. A definição dos vértices, ou seja, locais onde obrigatoriamente terá uma estrutura deverão ser locados privilegiando regiões de fácil acesso, deverá ser evitado encostas laterais, reservas indígenas, quilombolas e unidades de conservação. Deverão ser evitadas também benfeitorias, construções onerosas, como barragens, aeroportos, autódromos, loteamentos, áreas de lavras, terrenos muito valorizados, pantanosos, rochosos ou sujeitos a erosão e obras de interesse social [24] e [38].

Deverão ser verificados, ao longo do traçado, a existência ou projetos de rodovias, ferrovias, oleodutos, gasodutos, adutoras, linhas elétricas aéreas, torres de micro-ondas, bem como projetos de benfeitorias ou construções como especificado acima e tudo mais que possa tornar-se fator decisivo na definição do traçado. No caso de reservatórios planejados, deverá ser verificada e caracterizada fielmente a curva de inundação dos mesmos, visando evitá-los. Serão respeitados os ângulos de cruzamentos com rodovias, ferrovias, linhas de transmissão e de telecomunicações, vias navegáveis, oleodutos, gasodutos e adutoras, os quais deverão ser idealmente de 90° quanto possível, porém são admitidos os seguintes valores mínimos [39]:

✓ Linhas Elétricas.....	15°
✓ Rodovias	15°
✓ Ferrovias.....	60°
✓ Linhas de Telecomunicações	60°
✓ Dutos de Grande Porte (Gasodutos, etc...)	60°

Deverão ser evitados paralelismo, em trechos longos, com linhas de telecomunicações, oleodutos, gasodutos e adutoras; em nenhum caso será admitido que tal paralelismo ocorra dentro da faixa de segurança ou servidão. Vale ressaltar que para os cruzamentos de Linhas de Transmissão com tubulações de grande porte deverá ser elaborado o estudo de Compatibilidade Eletromagnética, para garantir que a tubulação continuará operando normalmente após a implantação da LT. No caso de obrigatoriedade de aproximação de aeródromos, homologados ou não, será obedecido o exposto no decreto n° 83399 de 03/05/79, publicado no diário oficial de 04/05/79, que estabelece critérios para utilização de áreas vizinhas aos aeródromos. Nas aproximações com estações transmissoras ou receptoras de rádio, retransmissora de televisão, torres de micro-ondas e antenas de telefone celular, deverá ser verificado se o traçado escolhido para a LT não interfere nessas instalações. Para tanto deverá executar um levantamento topográfico inicial que contenha as distâncias e diferenças de cotas entre o eixo da LT e as instalações. Qualquer obstáculo que exista numa faixa de 200 m de cada lado do eixo da linha e que possa influenciar o projeto, construção ou operação da linha ou vir a sofrer influências desta, deverá ser referenciado ao eixo da LT e perfeitamente caracterizado no perfil & planta e arquivos para PLS-CADD (software utilizado para plotação das estruturas), executando os levantamentos à parte. Tanto quanto possível,

deverão situar-se fora da faixa de segurança da linha, todas as estruturas de linhas elétricas de transmissão ou distribuição com tensão nominal igual ou superior a 13,8 kV; deverá ser verificada a necessidade ou não de remanejamento de linhas elétricas de baixa tensão (distribuição) e telecomunicações nos casos de cruzamento ou interferência com a LT.

Após a definição do traçado ocorre o aerolevanteamento a laser, recobrando toda área de interesse com imagens de alta resolução e nuvem de pontos do terreno, vegetação, benfeitorias e obstáculos considerando uma faixa de 1000 metros (500 para cada lado da diretriz). A partir destes dados, o traçado deverá ser novamente estudado observando a interferência com os seguintes fatores que podem determinar modificações e também inserção de novas deflexões no traçado:

- ✓ Aeródromos;
- ✓ Reservas Ambientais;
- ✓ Áreas de Preservação Permanente;
- ✓ Áreas povoadas, loteadas ou edificadas;
- ✓ Locais com dificuldade de acesso;
- ✓ Terrenos geologicamente instáveis;
- ✓ Travessias com linhas de transmissão e comunicações;
- ✓ Travessias sobre rios, canais ou reservatórios;
- ✓ Obras de interesse social (cemitérios, escolas, hospitais, igrejas, etc.);
- ✓ Terrenos pantanosos ou que requeiram fundação especial devido ao nível de alagamento máximo;
- ✓ Reservas indígenas, quilombolas e unidades de conservação ambiental;
- ✓ Cruzamentos de estradas de ferro e rodagem;
- ✓ Cruzamentos e aproximação com oleodutos, gasodutos e adutoras;
- ✓ Grotas longitudinais, profundas e extensas;
- ✓ Antenas ou torres de TV e celular;
- ✓ Minas com exploração autorizada e;
- ✓ Reservas legais registradas e sítios arqueológicos.

Respeitando todos os critérios e condições indicadas acima o traçado em estudo passa para a fase executiva tanto nas questões fundiárias (que contempla as autorizações

de passagem para a LT nas propriedades atingidas pelo traçado, negociações, indenizações e por fim liberação para construção) como na plotação das estruturas.

3.4.2 Faixa de Servidão

Para dar andamento no projeto da LT é preciso definir os parâmetros básicos da mesma, dentre eles temos o cálculo da largura da faixa de servidão da LT. Conforme metodologia indicada em [40] a expressão para cálculo da faixa de servidão (ver Figura 3.15) é dada por:

$$L = 2 \times (b + d + D) \quad (3.20)$$

sendo:

b – distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado deste eixo, em metros.

d – soma das projeções horizontais das flechas do condutor (d_2) e do comprimento da cadeia de isoladores (d_1) na condição de máximo deslocamento dos condutores, em metros.

onde:

$$d = d_1 + d_2 \quad (3.21)$$

D – distância que leva em conta os efeitos de R.I (Rádio-Interferência) e T.I (Interferência Telefônica) sendo calculada em função do gradiente de tensão na superfície do condutor, em metros.

$$D = 2,5 + 0,01 \times (D_u - 69) \quad (3.22)$$

sendo:

D_u – distância em m, numericamente igual à tensão nominal entre fases da LT, em kV.

Quando a LT estiver em uma região próxima a edificações, tem-se:

$$D'_u = \frac{D_u}{130}$$

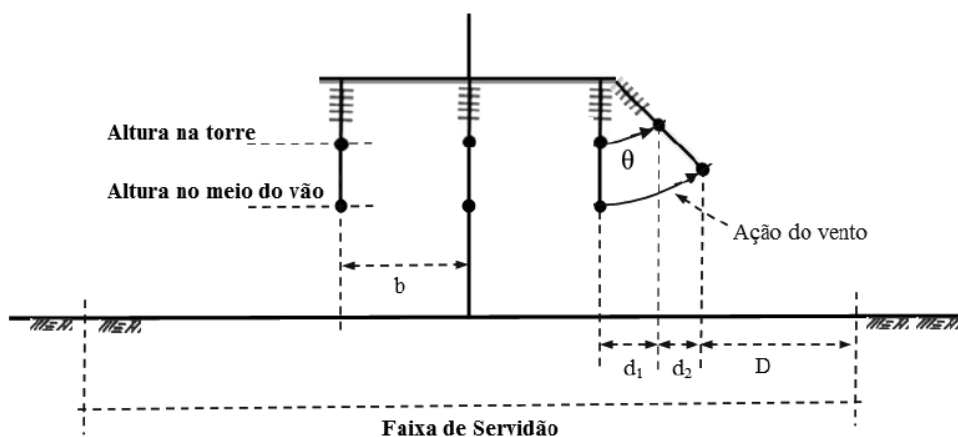


Figura 3.15 – Distâncias envolvidas para o cálculo da Faixa de Servidão. [40]

3.4.3 Plotação da Linha de Transmissão

Após o estudo e definição do traçado, localização e extensão da linha de transmissão, já é possível levantar os dados climatológicos como as velocidades e pressões de vento e temperaturas associadas a LT em projeto assim como o levantamento topográfico com a identificação do relevo, vegetação e obstáculos mapeados que serão transpostos. A partir do estudo dos dados ambientais devem ser definidas as características gerais da linha de transmissão como a geometria e configurações das fases, cabos condutores e para-raios, cadeias de isoladores, cálculo dos ângulos de balanço para o estudo da coordenação de isolamento [41-44]. Estas definições são utilizadas como referência para definição da largura da faixa de servidão, desenvolvimento da série de estruturas e cálculo das distancias mínimas de segurança, cabo solo, cabo mata e em relação aos obstáculos a serem transpostos. No estudo da série de estruturas, é definido o número de tipos de torres necessário para plotação, que geralmente são 6 tipos de estruturas:

1. Estaiada (torre mais leve da série, porem possui aplicação reduzida normalmente de até 2° de deflexão);
2. Autoportante - Suspensão Leve (torre com geometria e aplicação igual a torre estaiada, para locais onde não é possível instalar os estais. Nesse caso vale ressaltar a exceção da torre estaiada Cross-Rope onde a torre autoportante espelho da mesma é uma Autoportante – Suspensão Pesada);

3. Autoportante – Suspensão Pesada (torre de maior peso em relação a torre Suspensão Leve porem possui maior aplicação de vão médio, vão de peso e também até 6° de ângulo de deflexão);
4. Autoportante – Suspensão Transposição de Fases (para LTs com comprimento acima de 100km normalmente é necessário realizar a transposição de fases). *“as linhas de transmissão de comprimento igual ou superior a 100km devem ser transpostas com um ciclo completo de transposição, de preferência com trechos de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 do comprimento total”. Além disso, consta também que “deve ser avaliada e justificada no projeto básico pela transmissora a forma adequada de transposição de um dos circuitos em relação ao outro, no sentido de não inviabilizar os religamentos monopolar e tripolar dessas linhas”. Devem ser verificados os desequilíbrios de tensão nas linhas de transmissão com comprimento inferior a 100 km e não transpostas. Esses desequilíbrios, para a linha a vazio e a plena carga, não podem ser superiores a 1,5%. As avaliações de desequilíbrio precisam ser justificadas por cálculo ou simulação. Linhas de transmissão em paralelo, na mesma faixa de passagem ou em faixas contíguas ou linhas de circuito duplo, que porventura necessitem ser transpostas, devem ter os ciclos de transposição com sentidos opostos.” [38].*
5. Autoportante – Ancoragem Meio de Linha (torre de maior peso em relação a torre Suspensão Pesada, porem possui maior aplicação de vão médio, suporta vão de peso negativo e também até 30° de ângulo de deflexão) e;
6. Autoportante – Ancoragem Fim de Linha (torre que possui a maior aplicação na série de até 60° de deflexão assim como o maior peso e custo, portanto é uma estrutura que deve-se evitar ao máximo a utilização da mesma. O ideal seria apenas para condições de saída e chegada da LT nas Subestações aplicação para a qual está torre foi desenvolvida para suportar uma tração reduzida em direção a Subestação (5% da carga de ruptura do cabo condutor em média) e tração nominal para o lado da LT (20% da carga de ruptura do cabo condutor em média) por resistir a está

condição de desbalanço de tração é o motivo pelo o qual esta estrutura possui este nome de torre terminal ou fim de linha.

Após definida a série de estruturas composição das alturas das estruturas e pesos, deverão ser elaborados os gráficos de aplicação das mesmas com os limites de vão médio, vão de peso em função dos ângulos de deflexão.

A partir da ampacidade da LT e dados climatológicos é definida a temperatura de locação da LT para condição normal de operação e também uma temperatura de emergência para operação em curta duração. Para ambas as condições devem ser calculadas as distâncias de segurança mínimas verticais cabo solo e também em relação aos obstáculos atravessados. A partir destas definições e estudos é feita a plotação inicial da LT tendo como resultado alcançado o Perfil & Planta indicado na Figura 3.16:

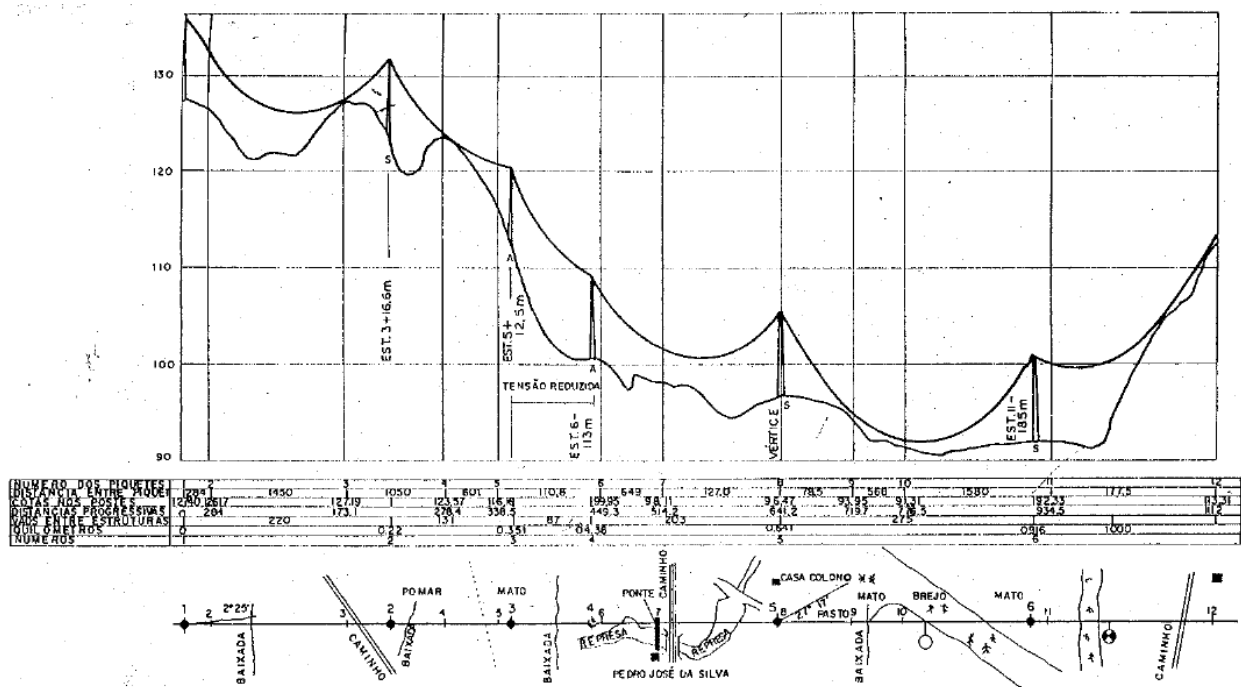


Figura 3.16 – Exemplo de projeto de distribuição de estruturas (Plotação) Perfil e Planta da LT. Retirado de [44]

A partir do Perfil & Planta que é um dos principais documentos do projeto executivo temos a quantidade, tipo e detalhes das torres presentes na plotação, que são

as informações necessárias para iniciar as simulações para obter o valor da impedância característica da LPNE.

De acordo com a teoria abordada para o cálculo dos parâmetros de uma linha de transmissão, no próximo capítulo são feitas simulações de plotação e para avaliação dos impactos provocados pelas possibilidades de incidência da torre estaiada “Cross-Rope” no valor da impedância característica equivalente da linha de transmissão e, conseqüentemente, no valor de potência natural atingida em MW. São apresentadas também opções de LPNEs em 500kV, circuito duplo para análises e comparações.

4 Simulações

4.1 Introdução

Neste capítulo é realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros da LPNE em função da variação de incidência da torre típica na plotação da linha de transmissão, a partir de simulações computacionais com o software *ATP* [45]. Este software foi utilizado para a modelagem da geometria das torres que compõem a série de estruturas, cabos condutores e para-raios, resistividade do solo, frequência e comprimento para obtenção do valor da impedância característica equivalente da LPNE em função das possibilidades de plotação da mesma. A seguir, são apresentados os procedimentos e considerações utilizadas.

4.1.1 Aplicação do modelo *LCC* para Linhas de Transmissão Aéreas

O modelo *LCC* (*Line Constants Cable*) do *ATP*, foi utilizado para modelagem, simulações e obtenção dos valores dos parâmetros da LPNE aérea. Este modelo *LCC* possui diversas opções de configurações para desenvolver estudos e análises para os vários tipos de sistemas de transmissão. A seguir, são apresentadas estas configurações possíveis [45]:

- *Transposed*: Presume-se que a linha aérea seja transposta se o botão estiver marcado, (para o modelo *PI* esta opção já é considerada e automaticamente a mesma é desativada);
- *Auto bundling*: Quando marcado, ativa o recurso de *bundling* automático do *LINE CONSTANTS* (opção quando temos mais de um cabo condutor por fase);
- *Skin effect*: Se o botão for marcado, o efeito pelicular é considerado, se desmarcado, não é feita a consideração do efeito pelicular nos cabos;
- *Metric/English*: Opção de escolha para os sistemas de unidades Métrico ou Inglês;

- *Segmented ground*: Cabos de aterramento segmentados se este botão estiver desmarcado, caso contrário os cabos de aterramento serão considerados continuamente aterrados e;
- *Real trans. matrix*: se marcada, a matriz de transformação é assumida como real. Os auto vetores da matriz de transformação são girados mais perto do eixo real, de modo que sua parte imaginária é assumida como insignificante. Recomendado para simulações transitórias. Caso contrário, uma matriz de transformação complexa completa será usada. Recomendado para cálculos de estado estacionário.

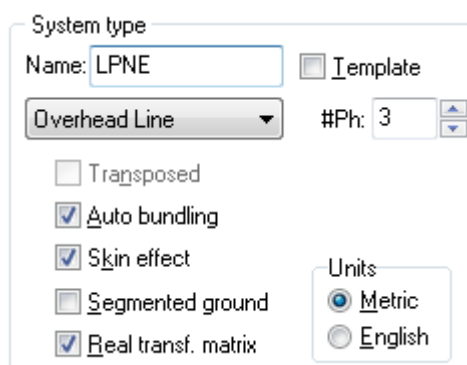


Figura 4.1 – Opções de tipo de sistema para linhas aéreas. [Software ATP]

Para consideração dos valores das resistividade do solo, frequência nominal de operação e comprimento da linha de transmissão, estes dados são inseridos na página modelo indicados na Figura 4.2, são comuns para todos os tipos de linhas e devem ser informados nas seguintes unidades [45]:

- *Rho*: A resistividade do solo deverá ser informada em ohms×m e será considerado solo homogêneo (Teoria de Carson);
- *Freq. init*: Frequência em Hertz [Hz] na qual os parâmetros de linha serão calculados (modelos Bergeron e PI) ou o ponto de menor frequência (modelos JMarti, Noda e Semlyen) do ajuste de parâmetro e;
- *Length*: Comprimento da linha aérea em km ou milha, definir comprimento como texto na opção de ícone (Set length in icon).

Standard data

R_{ho} [ohm*m] 1000

Freq. init [Hz] 60

Length [km] 200

Set length in icon

Figura 4.2 – Dados padrão para todos os modelos de linha. [Software ATP]

Para as simulações realizadas, foi utilizado o modelo PI que é a opção que atende o objetivo deste estudo, que é obter os valores dos parâmetros da linha de transmissão para baixas frequências (60Hz). No modelo PI para linhas de transmissão aéreas podemos habilitar as seguintes configurações [45]:

- *Printed output*: Se selecionado a capacitância shunt, matriz de impedância/admitância da série do sistema não reduzido, e/ou do sistema condutor de fase equivalente (após a eliminação dos cabos terra e o agrupamento dos condutores), e/ou dos componentes simétricos será calculado e;
- *$\omega[C]$ print out*: Seleção entre a matriz de capacitância e a matriz de susceptância (ωC).

Model

Type

Bergeron

PI

JMarti

Semlyen

Noda

Data

Printed output

ω [C] print out

Output Z

[Z] [Z]-1

[Ze] [Ze]-1

[Zs] [Zs]-1

Output C

[C]-1 [C]

[Ce]-1 [Ce]

[Cs]-1 [Cs]

Figura 4.3 – Configurações opcionais para modelos de linha PI [Software ATP]

A configuração da página de dados para a linha de transmissão contém os campos de entrada onde devem ser especificados os dados geométricos e características dos cabos condutores e para-raios. Pode-se especificar também o número da fase, diâmetro e número de cabos condutores e para-raios, feixe, posições do condutor e para-raios, como pode ser observado na Figura 4.4.

O *ATP* define o sistema de aterramento automaticamente ou emite avisos se as condições de aterramento não corresponderem ao número fixo de fases. Pode-se excluir a última linha da tabela usando os botões cinza abaixo ou adicionar uma nova clicando no comando adicionar linha conforme pode ser observado na Figura 4.4. As linhas dentro da tabela também podem ser excluídas, mas primeiro elas devem ser arrastadas para baixo como a última linha.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.6673	1.3505	0.0776	-5.98	37.5	12.5	0	0	1
2	1	0.6673	1.3505	0.0776	-7.555	38.79	13.79	0	0	1
3	1	0.6673	1.3505	0.0776	-7.03	40.08	15.08	0	0	1
4	1	0.6673	1.3505	0.0776	-7.03	37.5	12.5	0	0	1
5	1	0.6673	1.3505	0.0776	-5.98	40.08	15.08	0	0	1
6	1	0.6673	1.3505	0.0776	-5.455	38.79	13.79	0	0	1
7	2	0.6673	1.3505	0.0776	-0.48	38.975	13.975	0	0	1
8	2	0.6673	1.3505	0.0776	-0.245	39.67	14.67	0	0	1
9	2	0.6673	1.3505	0.0776	-0.245	38.28	13.28	0	0	1
10	2	0.6673	1.3505	0.0776	0.245	39.67	14.67	0	0	1
11	2	0.6673	1.3505	0.0776	0.245	38.28	13.28	0	0	1
12	2	0.6673	1.3505	0.0776	0.48	38.975	13.975	0	0	1
13	3	0.6673	1.3505	0.0776	5.455	38.79	13.79	0	0	1
14	3	0.6673	1.3505	0.0776	5.98	40.08	15.08	0	0	1
15	3	0.6673	1.3505	0.0776	5.98	37.5	12.5	0	0	1
16	3	0.6673	1.3505	0.0776	7.03	40.08	15.08	0	0	1
17	3	0.6673	1.3505	0.0776	7.03	37.5	12.5	0	0	1
18	3	0.6673	1.3505	0.0776	7.555	38.79	13.79	0	0	1
19	0	0	0.476	3.44	-16.005	48.132	23.132	0	0	1
20	0	0	0.67	0.724	16.005	48.132	23.132	0	0	1

Buttons: Add row, Delete last row, Insert row copy, Move (up/down arrows)

Figura 4.4 – Caixa de diálogo Dados de linha de uma linha trifásica. 4 condutores / fase + 2 fios terra. [Software ATP]

A seguir são descritas as funções das colunas apresentadas na Figura 4.4 [45]:

- *Ph.no.*: número de fase. 0 = fio terra (eliminado pela redução da matriz);
- *Rin*: Raio interno do condutor. Disponível apenas se a caixa de seleção Skin effect é selecionado na página Modelo (Figura 4.1). Se não selecionada, a coluna Rin será removida e uma coluna React será exibida, onde o usuário especificará a reatância CA da linha em ohm / comprimento da unidade;
- *Rout*: Raio externo (cm ou polegada) do condutor;
- *Resis*: Resistência do condutor (ohm / comprimento da unidade) em DC (com efeito pelicular verificado) ou resistência CA (se nenhum efeito pelicular for selecionado);
- *Horiz*: Distância horizontal (m ou pé) do centro da torre até os cabos condutores e para-raios (cabos que estão ao lado esquerdo da torre são identificados com o sinal negativo “-“, os cabos do lado direito não contem este sinal);
- *Vtower*: altura vertical dos cabos condutores e para-raios na torre até o solo (m ou pé);
- *Vmid*: altura vertical dos cabos condutores e para-raios no meio do vão (m ou pé). A altura média do condutor pode ser calculada a partir da equação $h = 2/3 * Vmid + 1/3 * Vtower$ que será usada nos cálculos (se a opção *Auto bundling* estiver marcada na página modelo indicada na Figura 4.1);
- *Separ*: Distância entre condutores no feixe (cm ou polegadas);

- *Alpha*: Posição angular de um dos condutores em um feixe, medido no sentido anti-horário a partir da linha horizontal e;
- *NB*: Número de condutores no feixe.

4.1.2 Verificação do Desempenho do Modelo de Linha - Line Check

Um modelo de linha ou cabo isolado pode ser verificado de duas maneiras diferentes. Internamente na interface Line / Cable existe o módulo Verify que suporta tanto uma opção de varredura de frequência quanto um cálculo de frequência de energia. Externamente no ATP → Line Check, existe um módulo que permite selecionar várias seções de linha sequenciais (incluindo transposição) e realizar cálculos de frequência, potência, impedância e admitância em série [45]. Vale ressaltar que este comando foi fundamental para realização deste trabalho pois através do Line Check foi possível investigar o impacto que as estruturas com geometrias distintas provocarão no valor da impedância característica equivalente a ser alcançada pela LPNE. A partir deste modelo foi desenvolvida a presente proposta de análise técnica para Linhas de Transmissão compactas com potência natural elevada em regiões com topografia acidentada, onde a incidência da torre típica sofre forte redução de utilização na plotação em função das solicitações de esforços mecânicos e restrições físicas que este tipo de topografia possui.

Para verificação e obtenção dos parâmetros equivalentes de uma linha de transmissão levando em consideração a plotação da mesma, primeiro deve-se modelar cada estrutura no LCC (torres: estaiada, autoportante suspensão leve, autoportante suspensão pesada, autoportante ancoragem meio de linha e autoportante ancoragem fim de linha). Após modelada a geometria destas estruturas e dados dos cabos condutores e para-raios foram estimadas incidências em km ou em porcentagem em relação a extensão total de cada estrutura na plotação da linha de transmissão. Após a modelagem e definição da incidência de cada tipo de estrutura na plotação da Linha de Transmissão que desejasse obter o valor da impedância característica a mesma deverá ser selecionada e em seguida, executar o comando Line Check, como mostra a Figura 4.5. Em seguida, a caixa de diálogo de seleção de entrada / saída mostrada na Figura 4.6 é habilitada.

O recurso *LineCheck* no *ATP* suporta até 3 circuitos, *ATP* sugere as quantidades padrão. Os nós mais à esquerda do circuito são sugeridos como os nós de entrada, enquanto os mais à direita nós tornam-se a saída. O número do circuito segue a ordem dos nós dos objetos. Para todos os componentes *ATP* padrão, os nós superiores possuem o menor número de circuito. Também deve-se especificar a frequência onde a linha será analisada. Finalmente, pode-se verificar o fasor equivalente, o que resultará em resultados ligeiramente melhores para as seções de linhas longas.

Para uma configuração trifásica, 4 casos de dados sequenciais são criados (Z_{+} , Y_{+} , Z_0 , Y_0) enquanto que para uma configuração de 9 fases, 24 casos são criados (Z_{11+} , Y_{11+} , Z_{110} , Y_{110} , $Z_{12\dots}$, $Z_{22\dots}$, $Z_{13\dots}$, $Z_{23\dots}$, $Z_{33\dots}$), uma vez que a simetria é assumida. Finalmente, todo o arquivo LIS é escaneado. Os valores calculados são então apresentados na janela de resultados, como mostra a Figura 4.7. Tem-se a opção de alternar entre coordenadas polares e complexas e criar um arquivo de texto do resultado. Os dados mútuos são apresentados em uma janela separada. A unidade das admitâncias é dada em Farads ou Siemens (micro ou nano) e pode-se escalar todos os valores por um fator ou pelo comprimento. [45]

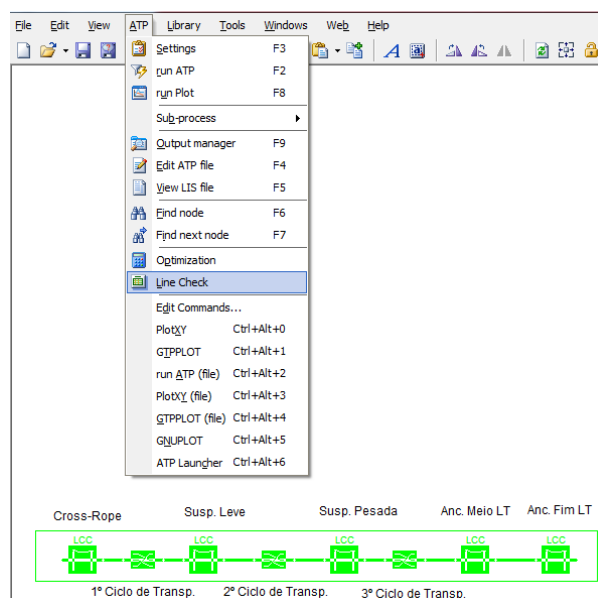


Figura 4.5 – Seleção a sequência de linha. [Software ATP]

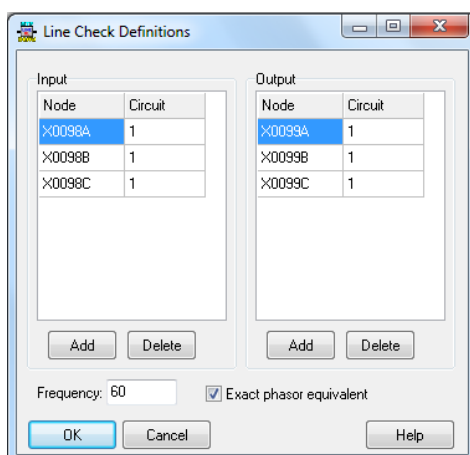


Figura 4.6 – Especifique entradas e saídas. [Software ATP]

As impedâncias em série são obtidas pela aplicação de correntes de 1A nos terminais e as extremidades de saída são aterradas (os outros circuitos são deixados abertos e não-energizados). Para o acoplamento mútuo, uma fonte trifásica equilibrada de 1A é aplicado em ambos os circuitos. Por outro lado, as admitâncias de derivação são obtidas aplicando uma fonte de tensão trifásica equilibrada de 1V em um terminal, deixando a extremidade de saída aberta. Para o acoplamento mútuo, 1V é aplicado em um circuito enquanto uma tensão de 1^{-20} é aplicada no outro.

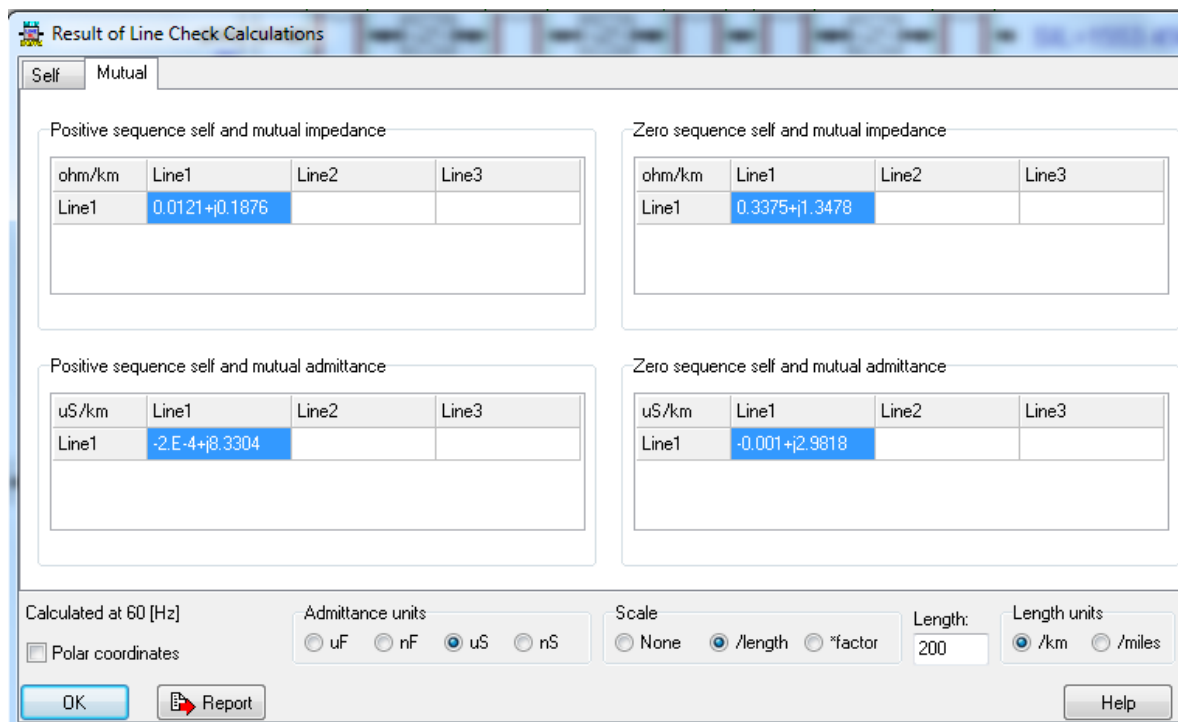


Figura 4.7 – Apresentação dos resultados [Software ATP]

A partir dos cálculos feitos no modelo *Line Check* são obtidos os valores de parâmetros mútuos equivalentes da linha de transmissão, estes valores encontrados de sequência positiva para impedância e admitância mútua são utilizados para o cálculo da impedância característica equivalente (Z_C) da LPNE, onde a impedância característica será calculada conforme equação já apresentada (3.2) e indicada abaixo [10]:

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z_+}{Y_+}} \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

Para o cálculo do valor da potência natural atingida será aplicada a equação já apresentada (3.1) considerando o valor da tensão nominal do sistema de transmissão de 500kV:

$$SIL = \frac{V^2[kV]}{Z_c [\Omega]} \quad [MW] \quad (4.2)$$

4.2 Modelagem da LPNE

Para modelagem da LPNE em estudo de 500kV, circuito simples, 200km com potência natural a ser alcançada de 1670 MW, foi utilizado o modelo PI no software ATP, onde foram inseridos os dados da série de estruturas da Linha com 5 tipos de torres, dados dos cabos condutores e para-raios, assim como os devidos ciclos de transposição de fases necessários para iniciar as simulações. Na Figura 4.8 é apresentado o circuito base elaborado para o desenvolvimento deste trabalho, nesta modelagem a incidência de cada tipo de estrutura é agrupada de forma a representar o comprimento equivalente da linha de transmissão que a geometria e distâncias entre cabos, que cada tipo de torre proporciona.

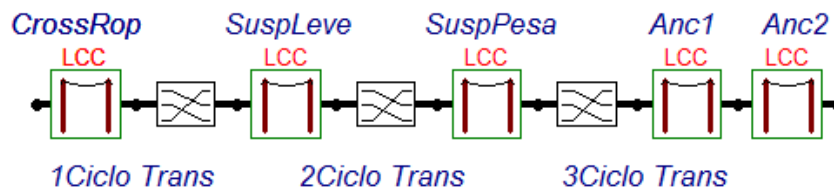


Figura 4.8 – Modelagem da LT no ATP

Nesta modelagem foram consideradas todas as torres com a mesma altura, oscilando as distancias horizontais e distancias geométricas que cada tipo de torre possui. Pois a altura mínima vertical cabo solo deverá ser respeitada por todas as estruturas, ou seja, as alturas dos cabos serão praticamente as mesmas para todos os tipos de estruturas que compõem a série de torres de uma LT, sendo portanto as distancias entre fases o item de maior interesse nas análises feitas neste trabalho.

A seguir na Figura 4.9 é apresentado o *View Model* com a geometria dos cabos condutores e para-raios de uma torre autoportante comum (leve) e também de uma estrutura estaiada “Cross-rope” a fim de evidenciar as diferenças geométricas entre as mesmas:

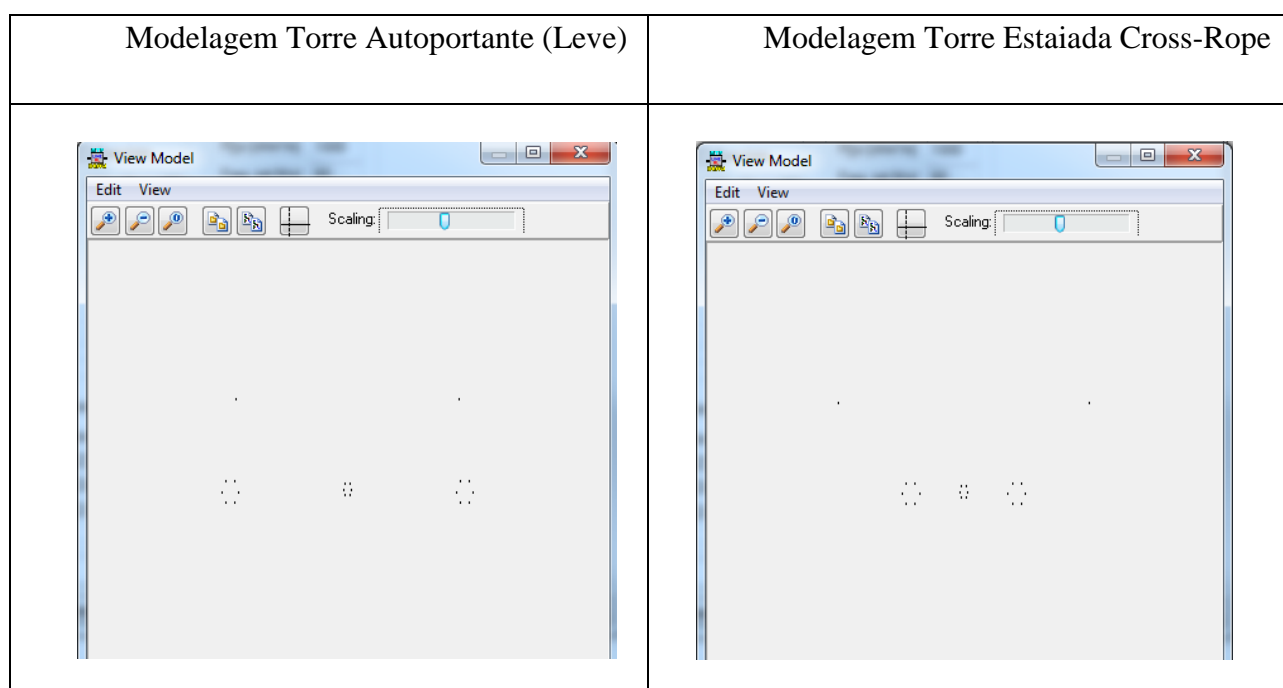


Figura 4.9 – Modelagem das Torres no ATP

Foram simulados também o valor de SIL alcançado para 3 tipos de série de estruturas onde existe homogeneidade nas geometrias das torres que compõe a família de torres, essas estruturas por apresentarem esta equivalência nas distâncias entre fases na série não provocam grandes alterações no valor da impedância característica equivalente da LPNE em relação à opção que possui a torre estaiada “Cross-Rope” como torre típica onde a variação de incidência deste tipo torre da série na plotação,

provoca forte alteração na potência natural alcançada pela linha de transmissão. Uma forma de solucionar a baixa incidência da torre “Cross-Rope” é a utilização da torre autoportante pesada que possui a mesma geometria entre fases. Porém, esta alternativa não é viável do ponto de vista financeiro e principalmente pelo ponto de vista executivo em campo devido à instabilidade que ocorre na montagem da parte superior desta estrutura que pode acarretar em acidentes fatais. Devido a este problema que praticamente inviabiliza a utilização da torre “Raquete” de suspensão pesada, as opções indicadas abaixo em circuito duplo tornam-se mais interessantes para as novas LT’s com elevada capacidade de transmissão em regiões com topografia acidentada.

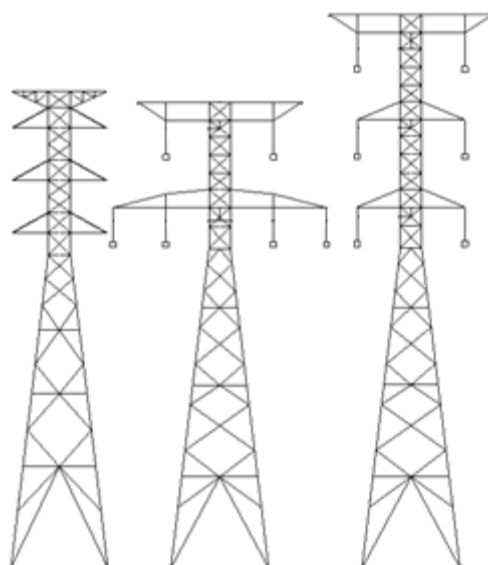


Figura 4.10 – Torres Compactas em Circuito Duplo com elevada capacidade de transmissão

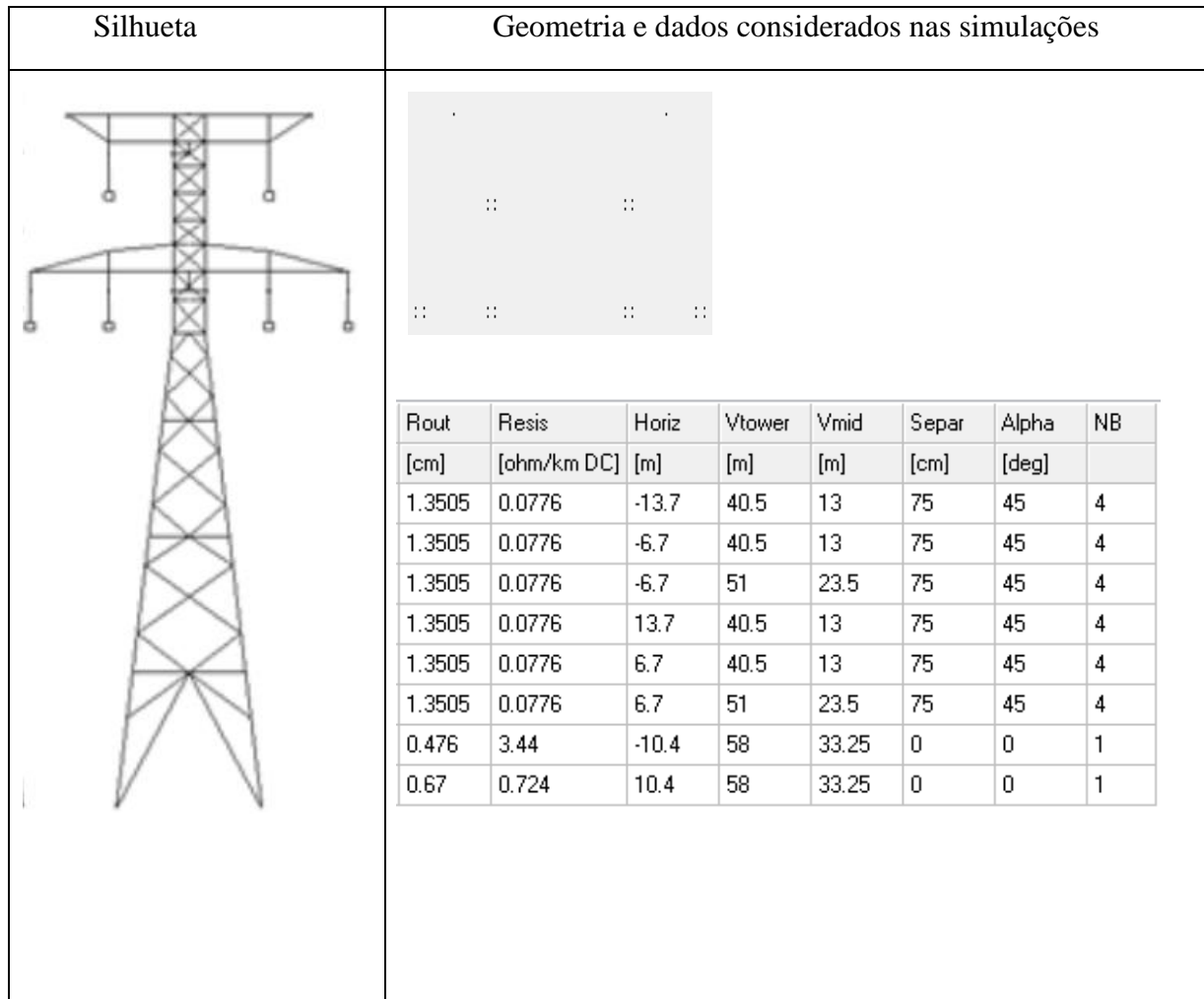


Figura 4.12 – Torre “Danúbio” em Circuito Duplo, 500kV com elevada capacidade de transmissão *View Model - ATP*

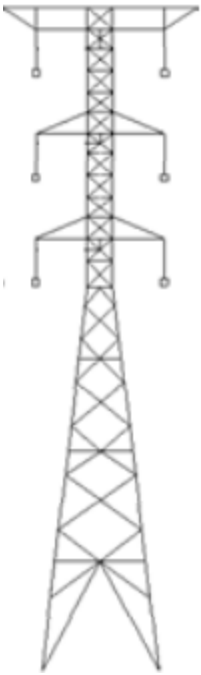
Silhueta	Geometria e dados considerados nas simulações							
	:: :: :: :: :: ::							
	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
	1.3505	0.0776	-6.7	40.5	13	100	45	4
	1.3505	0.0776	-6.7	50	23	100	45	4
	1.3505	0.0776	-6.7	60	33	100	45	4
	1.3505	0.0776	6.7	40.5	13	100	45	4
	1.3505	0.0776	6.7	50	23	100	45	4
	1.3505	0.0776	6.7	60	33	100	45	4
0.476	3.44	-10.4	67	42	0	0	1	
0.67	0.724	10.4	67	42	0	0	1	

Figura 4.13 – Torre Vertical em Circuito Duplo, 500kV com elevada capacidade de transmissão *View Model - ATP*

A partir das considerações, dados e simulações abordadas neste capítulo para obtenção da impedância equivalente da LPNE em função da plotação, os principais resultados obtidos são apresentados e analisados no capítulo 5.

5 Resultados

5.1 Introdução

São apresentados e comentados os valores de parâmetros elétricos e potência natural alcançada de uma LPNE em função das possibilidades de plotação da mesma. Para as situações onde o SIL alcançado a partir dos parâmetros calculados é inferior ao necessário além da opção de estruturas autoportantes pesadas também é avaliado o aumento de capacidade de transmissão obtido através da utilização de bancos de capacitores série para compensação de reativos. É analisado também a relação da incidência da torre estaiada no custo global das estruturas para uma linha de transmissão aérea. Por fim são abordadas opções de LPNEs com estruturas que possuem homogeneidade na geometria das torres que compõem a série assim como uma análise da importância de faixas de servidão compactas.

5.2 Parâmetros Elétricos e Potência Natural Obtidos pela LPNE em Função da Plotação das Estruturas

Conforme metodologia indicada no capítulo anterior e a partir das informações básicas da LNPE em estudo, foram feitas as simulações variando a porcentagem da incidência das torres estaiadas “Cross-Rope” para verificação dos impactos destas estruturas nos parâmetros finais da Linha obtendo os resultados teóricos apresentados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Variação dos Parâmetros e SIL de uma LT em função da incidência de Torres Estaiadas

Incidência da Torre Típica Estaiada “Cross-Rope” [%]	SIL [MW]	Z característica da LT [Ω]	Resistência [Ω/m]	XL [Ω/km]	Admitância ($\mu S/km$)
0	1297.76	192.64	0.0126	0.249	6.71
10	1308.64	191.04	0.0126	0.231	6.32
20	1366.44	182.96	0.0126	0.237	7.10
30	1410.97	177.18	0.0126	0.215	6.85
40	1440.59	173.54	0.0126	0.225	7.5
50	1473.57	169.66	0.0126	0.220	7.67
60	1513.07	165.23	0.0126	0.214	7.86
70	1553.46	160.90	0.0126	0.208	8.06
80	1595.23	156.72	0.0126	0.202	8.26
90	1664.01	150.07	0.0126	0.180	8.01
100	1681.85	148.65	0.0126	0.191	8.65

Como pode ser observado na Tabela 5.1, a resistência da LT não sofre impacto da plotação pois depende basicamente dos cabos utilizados. Já quando ocorrem variações na quantidade de torres estaiadas “Cross-Rope” na plotação LPNE ocorrem elevados impactos nos valores de reatância da mesma devido à oscilação nas distâncias entre fases. Quanto menor a incidência de torres “Cross-Rope”, ocorrem mais vãos com distâncias maiores do que 6.5m entre fases (conforme pode ser observado na Figura 2.4 e comparado com a Figura 2.3 as diferenças de distâncias entre fases). Por isso, a reatância indutiva aumenta. Este aumento conseqüentemente eleva o valor da impedância característica equivalente da LT e conseqüentemente diminui o valor da potência natural alcançada pela LPNE, uma vez que conforme já demonstrado (equação 3.2) impedância característica e potência natural são inversamente proporcionais.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 5.1, para a LPNE em estudo onde é esperado um SIL de 1670 MW a porcentagem mínima de torres estaiadas para este LT deverá ser da ordem de 80%, analisando somente os parâmetros obtidos pelas estimativas de plotação da LT. Valores abaixo dessa porcentagem deverão ser acrescidos de torres autoportantes pesadas que possuem geometria de disposição de cabos equivalentes a torre estaiada até obter o valor de SIL necessário.

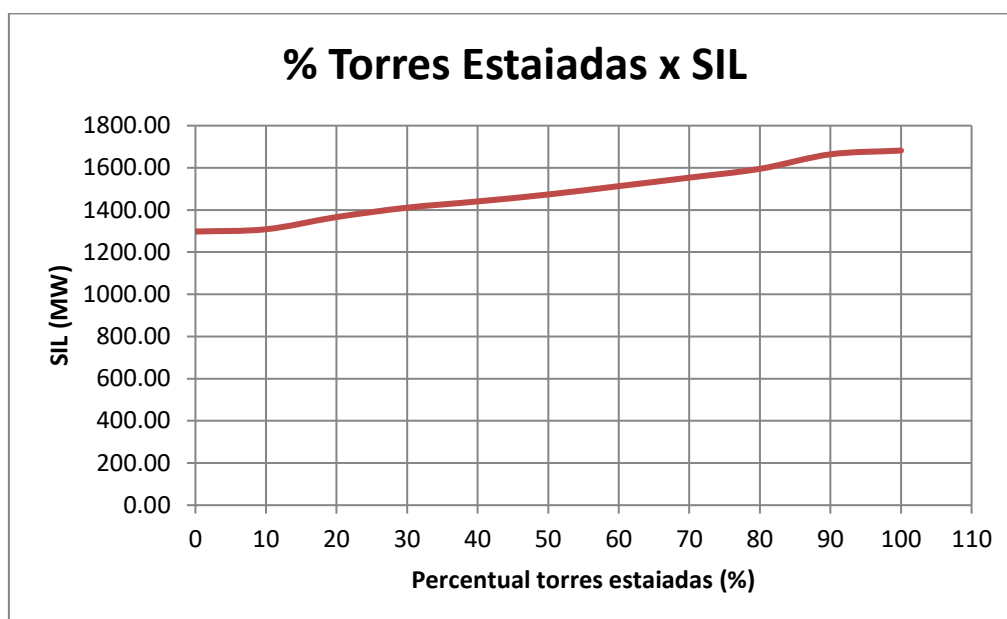


Figura 5.1 – Porcentagem de Torres Estaiadas x SIL alcançado na LT em MW

Conforme já mencionado neste trabalho, esta opção de inserção de torres autoportantes de suspensão pesada (Torre “Raquete”) não tem sido uma opção viável, pois conforme relatos de construtores a montagem eletromecânica desta estrutura é dificultada pelas dimensões elevadas da “cabeça” desta torre. Em campo, na condição de vento incidindo sobre as treliças gera forte instabilidade nas partes que estão formando a parte superior desta estrutura e é nessa etapa onde tem ocorrido acidentes. Tal dificuldade e complexidade tornam a construção desta estrutura em locais com topografia acidentada inviáveis tanto do ponto de vista financeiro, de tempo e principalmente pelo risco de acidentes fatais.

Uma alternativa para não utilizar esta torre “Raquete” é a utilização de compensação de reativos a partir de bancos de capacitores série. Tal alternativa quando bem dimensionada pode ser uma opção de solução interessante. A seguir são apresentados os resultados obtidos considerando esta opção.

5.3 Compensação de Reativos para Aumento da Capacidade de Transmissão

Uma opção para viabilizar o aumento da capacidade de transmissão na linha de transmissão é através da compensação de reativos através de capacitores série, capaz de reduzir e mesmo anular os efeitos da indutância da linha, quando vistos de seus terminais [46]. A partir desta redução na indutância e, conseqüentemente, na impedância característica o valor da potência natural aumenta. Na Figura 5.2 é apresentado o circuito onde foram simuladas compensações de reativos de 45, 30, 20 e 10% para alcançar o patamar de 1670 MW de SIL.

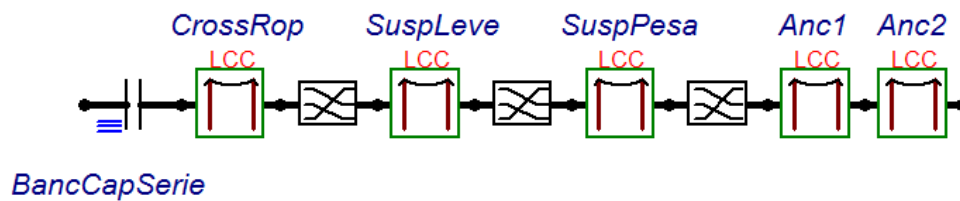


Figura 5.2 – Inserção do Banco de Capacitor Série para Compensação de Reativos na LPNE

Na Tabela 5.2 a seguir são apresentados os resultados obtidos:

Tabela 5.2 – Compensação Série de Reativos da LPNE x SIL

Incidência da Torre Típica Estaiada “Cross-Rope” [%]	SIL [MW]	Z característica da LT [Ω]	XL [Ω/km]	Admitância [μS/km]	Compensação [%]	Potência [MVA_r]
0	1703,34	146,77	0,1451	6,7358	45	192,0
10	1734,31	144,15	0,1303	6,2707	45	178,0
20	1670,00	149,63	0,1525	6,8112	30	111,0
30	1688,83	148,03	0,1352	6,1698	30	122,0
40	1703,36	146,77	0,1604	7,4462	30	116,0
50	1740,11	143,67	0,1572	7,616	30	114,0
60	1679,97	148,81	0,1734	7,8302	20	74,00
70	1723,95	145,0157	0,1688	8,0268	20	72,00
80	1675,89	149,1743	0,1834	8,2416	10	35,00
90	1751,25	142,2492	0,1629	7,9935	10	31,00
100	1681,85	148,65	0,0126	5,702	-	-

Conforme pode ser observado na Tabela 5.2, a compensação de reativos para os casos de 0 a 90% de incidência da torre “Cross-Rope” proporciona elevação suficiente no sistema de transmissão para alcançar o patamar de 1670 MW na classe de tensão de 500kV, sendo, portanto, uma alternativa de solução a ser considerada para a viabilização de sistemas de transmissão com altos fluxos de potência. Já na Figura 5.3, podemos observar a comparação entre os valores de SIL alcançados com e sem compensação série, no gráfico podemos observar que através da compensação de reativos é alcançado o patamar de 1670 MW para condições de baixa incidência de torres estaiadas e necessidade de compensação diminui à medida que a incidência da torre estaiada aumenta.

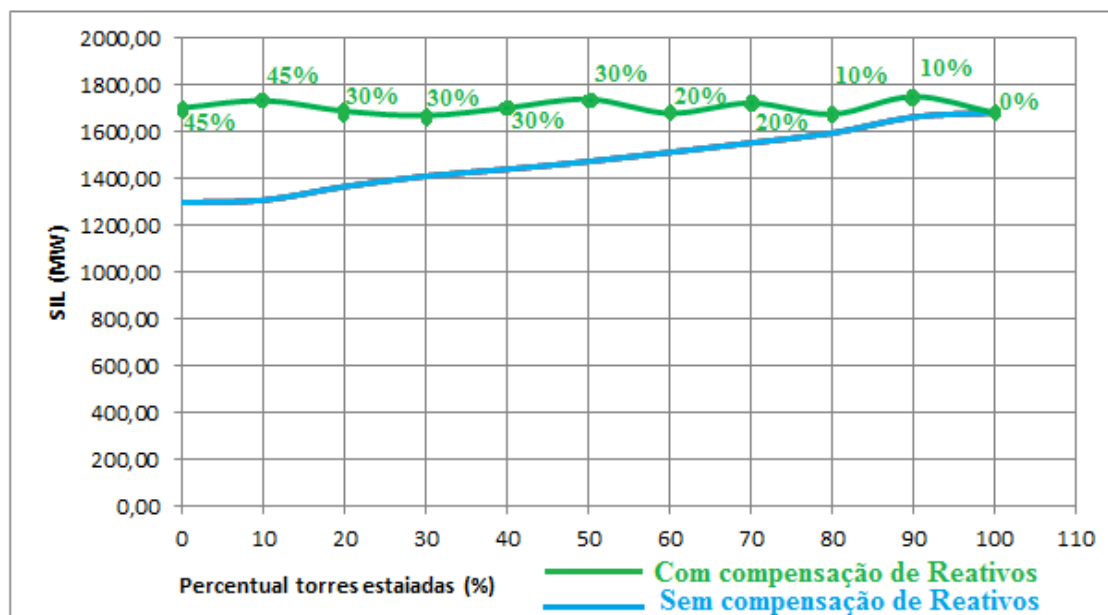


Figura 5.3 – Comparação entre os valores alcançados de SIL com e sem compensação de reativos série

5.4 Relação da Incidência da Torre Estaiada no Custo Global das Estruturas para Implantação de uma Linha de Transmissão Aérea

Na Figura 5.3, é apresentada uma tabela-resumo para os custos totais e parciais das principais linhas da Rede Básica construídas nos últimos anos [24]. Os valores desta tabela são valores médios obtidos a partir dos orçamentos dos vários contratos de concessão, sendo efetuada atualização de acordo com as taxas mensais do IPCA. Observa-se que estes custos médios permitem uma visão geral da composição dos custos dos principais níveis de tensão de linha de transmissão que atualmente estão sendo construídas no Brasil.

TENSÃO	230 kV CS	%	230 kV CD	%	500 kV CS	%	500 kV CD	%	±600kVcc	%
Projeto	6079,33	1,96	7955,77	1,86	4178,87	0,78	6371,968	0,49	1816,842	0,24
Levantamento topográfico	3221,64	1,04	2123,20	0,50	3228,46	0,60	4036,164	0,31	2578,947	0,35
Sondagens	1096,05	0,35	2099,86	0,49	917,13	0,17	2758,381	0,21	1067,368	0,14
Melo ambiente/fundiário	16069,93	5,18	12450,04	2,91	12721,14	2,38	35088,79	2,70	37023,15	4,97
TOTAL ENG.	26466,94	8,53	24628,87	5,76	21045,61	3,93	48255,31	3,72	42486,31	5,71
Suporte Estruturas	54025,47	17,42	54770,45	12,82	83513,50	15,61	239535,3	18,46	98783,16	13,27
Suporte Fundações	14473,63	4,67	6073,78	1,42	4169,15	0,78	6175,199	0,48	4273,684	0,57
Cabo condutor	66838,68	21,55	151605,85	35,47	167218,49	31,25	393253,4	30,30	291905,3	39,21
Cabo para-raios	15526,63	5,01	8523,54	1,99	16551,71	3,09	20005,43	1,54	15877,89	2,13
Contrapesos	2369,43	0,76	1324,34	0,31	6769,79	1,27	5738,438	0,44	1825,474	0,25
Ferragens cadeias	7670,68	2,47	41958,60	9,82	12724,40	2,38	38001,98	2,93	19146,14	2,57
Isoladores	7859,09	2,53	8302,97	1,94	15189,07	2,84	30468,09	2,35	21247,13	2,85
Espaçador (amortec)	4454,79	1,44	7318,51	1,71	5157,27	0,96	4478,302	0,35	8014,737	1,08
Acessórios	3898,10	1,26	2692,32	0,63	10454,51	1,95	5762,081	0,44	20282,11	2,72
TOTAL MATERIAL	177116,49	57,09	282570,36	66,12	321747,89	60,14	743418,2	57,28	481355,6	64,65
Faixa de servidão e acessos	12610,03	4,06	13055,49	3,05	23638,68	4,42	104392,5	8,04	20751,58	2,79
Execução fundações	27892,64	8,99	25396,09	5,94	74150,78	13,86	209915,2	16,17	57486,32	7,72
Montagem e suportes	18194,83	5,87	39580,60	9,26	37139,06	6,94	94255,4	7,26	42915,39	5,76
Instalação cabos e acess.	25040,29	8,07	10962,41	2,56	35803,95	6,69	41407,94	3,19	56952,63	7,65
Instal. Contrapeso (aterr.)	5342,12	1,72	1211,13	0,28	4070,01	0,76	18418,96	1,42	5893,684	0,79
TOTAL CONSTR. E MONT.	89079,90	28,72	90205,73	21,11	174802,48	32,67	468389,9	36,09	183999,6	24,71
Adminstr.e Fiscaliz.	12993,77	4,19	8439,65	1,97	10734,44	2,01	22507,3	1,73	23219,31	3,12
Eventuais	4563,69	1,47	21543,94	5,04	6690,87	1,25	15270,85	1,18	13473,68	1,81
TOTAL GERAL	310220,79	100,00	427388,55	100,00	535021,30	100,00	1297842	100,00	744534,5	100,00

CS – Circuito Simples
CD – Circuito Duplo

Fonte: ANEEL

Figura 5.4 – Custos por nível de tensão dos principais componentes das linhas de transmissão (R\$/km) [24]

Conforme pode ser observado acima, se somados os percentuais relativos as estruturas que são o material (15,61%), execução das fundações (13,86%) e montagem (6,94%) a definição das estruturas tem um impacto direto em pelos menos 36,41% do custo global de implantação de uma nova Linha de Transmissão aérea.

Para apresentar os impactos que a incidência da torre estaiada provoca no CAPEX (*CAPital EXpenditure*) de uma LT foram estimados os custos médios dos materiais, serviços e fundações para cada tipo de estrutura obtendo-se os seguintes valores médios adaptados da Base de Preços de Referência ANEEL - Ref. 06/2017 [47]:

- Torre Estaiadas “Cross-Rope”: R\$ 100.000,00;
- Torre Autoportante – Suspensão Leve: R\$ 150.000,00;

- Torre Ancoragem Meio de Linha: R\$ 300.000,00 e;
- Torre Ancoragem Fim de Linha: R\$ 350.000,00.

A partir destes valores unitários médios, foram consideradas diferentes proporções de incidência da torre típica estaiada na plotação (torre mais leve da série). Os resultados obtidos referentes ao custo global são apresentados na Figura 5.5.

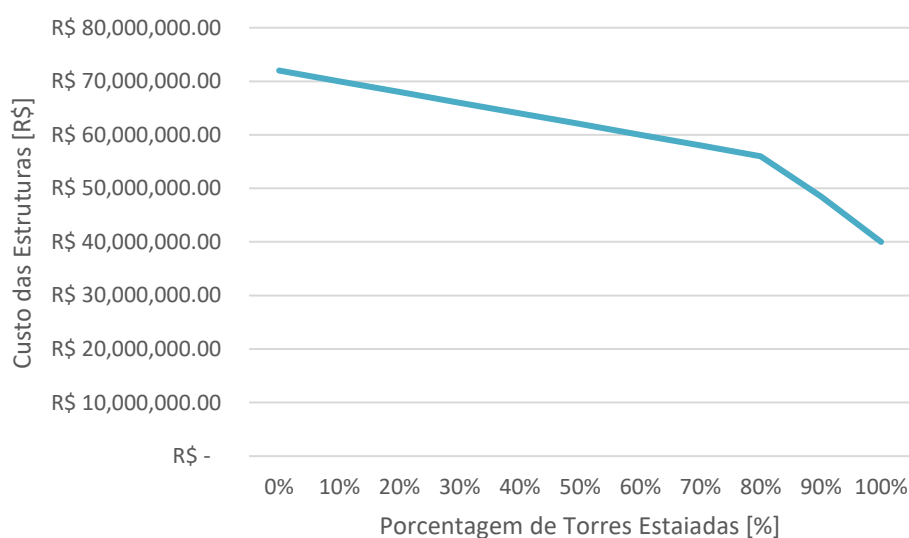


Figura 5.5 – Porcentagem de Torres Estaiadas x Custo das Estruturas na LT em R\$

Como pode ser observado a incidência de torres estaiadas na plotação de uma linha de transmissão aérea também possui grande impacto no custo de construção, e quanto maior a incidência de torres estaiadas maior é a redução de custos.

Outro ponto de extrema importância na implantação de novos sistemas de transmissão é o prazo de construção, por dois motivos: o atraso no cumprimento na data de energização assumida no contrato de concessão é passível de multas. O segundo motivo, que também é o foco das empresas, é a antecipação de conclusão da obra onde é possível pleitear antecipação da Receita Anual Permitida (RAP). Neste cenário, onde o tempo e prazos de execução das atividades são fundamentais para obter sucesso na disputa comercial (leilões de transmissão ANEEL) e na implantação do

empreendimento de transmissão, a agilidade de construção para a torre estaiada é primordial.

A agilidade de construção da torre estaiada, se faz possível, primeiro pelo peso reduzido que esta estrutura possui em relação às demais torres que compõem a série e conseqüentemente menores cargas na fundação o que proporciona redução de gastos deste item, que possui impacto médio de quase 14% no custo total de implantação. Como segundo ponto, outra vantagem que a torre estaiada proporciona, é a possibilidade de fazer a montagem estrutural desta torre no solo e através do guincho, sendo possível içá-la sobre a fundação já completamente montada. Todas estas vantagens, benefícios, facilidades, segurança e agilidade que a torre estaiada proporciona dependem de um fator ambiental: a topografia. À medida que a topografia do terreno se torna mais acidentada a mecanização do processo de construção fica mais restrita e conseqüentemente o custo do empreendimento eleva-se, devido a uma maior incidência de trabalhos manuais e mais tempo para execução das atividades.

5.5 Opções de LPNEs com Estruturas que possuem

Homogeneidade na Geometria das Torres que compõem a Série

Devido às dificuldades construtivas, custos elevados, restrições socioambientais e busca da maior relação de capacidade de transmissão em um corredor, dentre as opções de linhas de transmissão aéreas estudadas neste trabalho é avaliada a aplicabilidade em regiões com topografia acidentada as LTs de 500kV em circuito duplo. Foram analisadas três opções de LPNE's de circuito duplo, para regiões com topografia acidentada. Os valores de SIL e largura de faixa de servidão obtidos são apresentados na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 – Valores de SIL encontrados para os 3 tipos de série de torres simulado e relação de MW transmitido em função da largura da faixa de servidão

Tipo	Surge Impedance Loading (SIL) [MW]	Largura da Faixa de Servidão [m]	Número de cabos condutores e Dimensões do Feixe	Capacidade de Transmissão no corredor [Relação MW/m]
CICA Tower	2446 (2x1223)	50	4 (750mm)	49
Circuito Vertical	2408 (2x1204)	60	4 (1000mm)	40
Danúbio (Triangular)	2408 (2x1204)	70	4 (750mm)	34
Cross-Rope (Circuito Simples)	1670	*80	6 (2.58 × 2.10m) e 6 (0.49 × 0.96m)	21

** A abertura dos estais da torre Cross-Rope podem atingir na transversal uma largura da ordem de 80.0m, por este motivo o valor da faixa de servidão para este tipo de estrutura é maior.*

Conforme pode ser observado, os três tipos de estruturas de circuito duplo analisadas chegaram ao patamar de capacidade de transmissão acima de 2.400MW (1200MW por circuito) utilizando os mesmos cabos condutores e para-raios, assim como as mesmas condições ambientais. Para a torre “CICA”, que tem a tecnologia de proporcionar maior compactação nas distâncias entre fases foi necessário um feixe de 750mm para atingir o patamar de 1.200MW por circuito. Para a torre “Danúbio” também foi necessário o feixe de 750mm já para torre Vertical convencional foi necessário um feixe de 1000mm de lado.

A torre “CICA” que é a mais compacta dos três tipos de estruturas de circuito duplo analisados além de ser a mais leve, com mesmo vão médio foi a que apresentou a melhor relação MW / Largura de Faixa de Servidão, por proporcionar uma faixa de servidão de aproximadamente 30% menor do que a torre “Danúbio” triangular. Analisando a relação MW / Largura de Faixa de Servidão a opção que apresentou o menor valor foi a torre “Cross-Rope”, por ser uma LPNE de circuito simples e devido a abertura elevada que os estais desta estrutura possui, impactam diretamente na largura

da faixa de servidão onerando fortemente os custos fundiários. Vale ressaltar que para as regiões com maior densidade demográfica localizadas principalmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil as tratativas e negociações podem inviabilizar a implantação das novas linhas de transmissão aéreas, em função do nível das propriedades atingidas assim como restrições socioambientais.

A Tabela 5.4 apresenta o preço médio de aquisição de área para servidão de linhas de transmissão por m² e por estado, obtida na Base de Preços de Referência ANEEL - Ref. 06/2017 [47]. Podemos observar que os valores médios de R\$/m² praticados no Brasil oscilam fortemente nas regiões do Brasil, assim como de estado para estado. Se comparamos o custo da área de servidão em Santa Catarina que é o estado que possui o valor mais elevado (R\$: 5,2929) com o Amapá que é o estado eu possui o menor valor (R\$: 0,0812), a diferença é de 65 vezes maior o custo fundiário para o estado catarinense. Ou seja, a largura da faixa de servidão é uma condição que vai governar a concepção e desenvolvimento dos projetos das estruturas, assim como o projeto executivo em função do impacto financeiro elevado que o fundiário representará no custo global de construção da linha de transmissão.

Os estados do sul e sudeste foram destacados em amarelo na Tabela 5.4 por serem os estados que apresentam os maiores custos de aquisição de servidão por m², destaques foram dados para os estados de Santa Catarina, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul por apresentarem valores extremamente elevados. Vale ressaltar, que grande parte destes estados que possuem os valores fundiários elevados apresentam também topografia acidentada e restrições socioambientais, estes motivos são determinantes para os novos sistemas de transmissão nestas regiões; que devido as estas condições devem ser compostos por LPNEs com soluções estruturais adequadas, que permitam faixas de servidão compactas e com vãos médios elevados, para viabilizar novas implantações de linhas de transmissão nestas áreas.

Tabela 5.4 – Terrenos e Servidões (R\$/km) - Média por Estado [47]

Estado	Preço (R\$/m ²) (Ref. 06/2017)
Acre	0,1831
Alagoas	0,7167
Amapá	0,0812
Amazonas	0,1225
Bahia	0,9007
Ceará	0,5135
Distrito Federal	1,2279
Goiás/Distrito Federal	2,0116
Espírito Santo	1,2279
Maranhão	0,3019
Mato Grosso	0,7663
Mato Grosso do Sul	1,3289
Minas Gerais	1,6345
Pará	0,2680
Paraíba	0,4373
Paraná	2,9390
Pernambuco	1,2655
Piauí	0,2014
Rio de Janeiro	1,3775
Rio Grande do Norte	0,4538
Rio Grande do Sul	2,2970
Rondônia	0,8622
Roraima	0,2712
São Paulo	4,9024
Santa Catarina	5,2929
Sergipe	1,1894
Tocantins	0,5405

A partir os resultados obtidos neste capítulo foi verificado que para atender a capacidade de transmissão elevada pode-se utilizar estruturas pesadas ou bancos de capacitor serie para compensar reativos da LPNE que a princípio é a solução mais econômica. A incidência da torre estaiada além de aumentar a capacidade de transmissão também tem forte impacto no custo global do empreendimento. Foram apresentadas opções de LPNEs em circuito duplo compactas que apesar de aumentarem de 50 a 80% o custo de implantação em comparação com LTs de circuito simples a depender da plotação das estruturas, também são opções para transmitir potencias

elevadas, principalmente em regiões com topografia acidentada, custos fundiários elevados e restrições socioambientais.

6 Conclusões e Propostas de Continuidade

6.1 Introdução

Este trabalho teve como objetivo obter e analisar o valor da potência natural (SIL) atingida por uma LPNE em regiões com topografia acidentada, onde a incidência da torre típica sofre forte redução devido ao perfil desnivelado do terreno. Para análise de sensibilidade dos impactos que a torre estaiada provoca na impedância equivalente da LPNE, foi feita uma simulação de incidência desta estrutura na plotação e foi verificado que, quando os valores foram abaixo de 80% de ocorrência desta estrutura compromete-se a obtenção do valor de SIL de projeto. Para reduzir a impedância característica equivalente da LPNE e consequentemente aumentar a capacidade de transmissão até o nível necessário, pode-se utilizar torres autoportantes pesadas ou a compensação de reativos através de bancos de capacitor série. Outras opções analisadas nesta dissertação são as LPNEs de 500kV em circuito duplo para elevar a capacidade de transmissão em mesmo corredor. As conclusões obtidas a partir da elaboração destes estudos assim como a propostas de continuidade deste trabalho, são apresentadas neste capítulo.

6.2 Conclusões

O estudo elaborado mostra que será um grande desafio a implantação de LT's de 500kV com potência natural elevada (1670 MW) em regiões com topografia acidentada em função da dependência de alta incidência de torres estaiadas nestas LT's. Esta questão pode ser solucionada com a utilização de torres autoportantes especiais (pesadas) com geometria de disposição dos cabos equivalente à torre estaiada, o que

provoca uma grande elevação no custo do empreendimento, assim como extrema dificuldade construtiva e prazos de obras. Por outro lado, a compensação de reativo a partir de bancos de capacitores em série com a LPNE é uma alternativa de solução que a depender da região de implantação da LPNE, poderá ser a opção mais interessante para atingir o patamar de capacidade de transmissão de 1670MW na classe de tensão 500kV, circuito simples. As LPNEs em circuito duplo na classe de tensão em 500kV analisadas neste trabalho são as mais indicadas para regiões com topografia acidentada, principalmente por apresentarem homogeneidade de geometria nas estruturas que compõem a série torres. Por este motivo, não possuem forte dependência de incidência mínima de um tipo de estrutura da série para alcançarem o patamar de potência necessário. Além disso, em situações onde for indispensável faixas de servidão compactas, devido aos elevados custos fundiários e restrições socioambientais, as alternativas estudadas que apresentaram maior potencial técnico de estruturas para solucionar a dependência da torre estaiada “Cross-rope” é a utilização de torres de circuito duplo, onde pode ser obtida uma potência de 2.400 MW (2x1200MW) para 500kV, que é a principal classe de tensão na rede básica, com uniformidade na geometria entre as estruturas que compõem a série aliada a faixas de servidões compactas, o que proporciona melhor relação de MW transmitido em um mesmo corredor.

Diante do exposto, conclui-se que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado. Uma proposta de análise técnica para quantificar a potência natural atingida para linhas de transmissão compactas em regiões com topografia acidentada, foi apresentada levando em consideração a torre típica e também as demais estruturas presentes na série de torres. Para isso, foi determinada a quantidade mínima de estruturas estaiadas “Cross-Rope” e autoportantes pesadas com geometria equivalente, que deverão estar presentes na plotação da LPNE ou a compensação de reativos necessária para atingir a devida capacidade de transmissão. Para que a LPNE, tenha o desempenho operacional esperado, com o menor custo possível, através do conhecimento prévio da quantidade de torres necessárias para atingir o SIL elevado de uma LPNE que possui forte dependência e relação com a plotação das estruturas.

Por fim, vale ressaltar também, que esta análise de capacidade de transmissão levando em considerações as condições topográficas e socioambientais é um dos itens

fundamentais nos estudos de novas concessões, devido a influência que as mesmas possuem no custo, prazo e conseqüentemente viabilidade de implantação nos empreendimentos de transmissão de grande porte, fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico brasileiro.

6.3 Propostas de Continuidade

Na modelagem utilizada neste estudo a altura dos cabos, distancias entre fases e em relação aos cabos para-raios foram agrupados e fixados em função da geometria e incidência de cada tipo de torre. Porém, estudos complementares a este trabalho, são necessários, a fim de aperfeiçoar a metodologia de análise técnica para o cálculo e definição do valor do SIL obtido para linhas de transmissão compactas com potência natural elevada em regiões com topografia acidentada em função da quantidade e tipos de torres necessárias para implantação da LPNE seja mais preciso.

Para este aperfeiçoamento e verificação da precisão da metodologia aplicada no cálculo dos parâmetros e SIL da LPNE é indicado a medição dos valores de impedância e admitância quando a mesma já estiver em condição normal de operação para comparar com os valores obtidos na fase de projeto, afim de verificar o que pode ser aperfeiçoado nos modelos teóricos apresentados neste trabalho.

Referências

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica - **ANEEL** – Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/transmissao4>.
- [2] SILVEIRA, P. O. “**Planejamento de sistemas de transmissão em área com fonte de geração intermitente, apoiado no uso de tecnologias avançadas.**” (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, Brasil, 2017.
- [3] Programa de Expansão da Transmissão - **PET**, Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Programa-de-Expansao-da-Transmissao-Plano-de-Expansao-de-Longo-Prazo-Ciclo-2018>.
- [4] Operador Nacional do Sistema Elétrico - **ONS** – Disponível em: <http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.
- [5] Centrais Elétricas Brasileiras - **Eletrobrás** – Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br>.
- [6] Del Monte, A.G.; Liebhaber, D.; Ahn, H.S.; Doyle, J.; Davila, J.M.F.; Regis, O.J.; Penserini, P.; Tsinghua University, Naidoo.V. “**Evaluation of High Surge Impedance Loading (HSIL) solutions for increased natural capacity of 500 kV Overhead Lines.**”, Cigre Science & Engineering • N°2 June 2015.
- [7] Soluções de Projeto em Sistemas de Transmissão – **MC Engenharia** – Disponível em: <https://www.mcengenharias.com/>.
- [8] Engetower Engenharia - **Engetower** – Disponível em: <http://engetower.com.br/projetos>.
- [9] X. Yang, N.Y. Li, Z.R. Peng, "Potential distribution computation and structure optimization for composite cross-arms in 750 kV AC

-
- transmission line,"** IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, pp. 1660-1669, Aug. 2014.
- [10] SARMIENTO, J. S. A. **“Ampliação da capacidade de transmissão de linhas aéreas melhorando a geometria dos feixes”** (Dissertação de Mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2016.
- [11] ALEXANDROV, G. N.; PODPORKYN, G. V. **“Improvement of the efficiency of 35 to 220 kV lines. In: International Conference on AC and DC Power Transmission.”** Londres, Inglaterra: [s.n.], 1991.
- [12] ALEXANDROV, G. N.; PODPORKYN, G. V.; SELEZNEV, Y. G. **“Shape Optimization of Overhead Transmission Line Bundle Conductors. Electric Technology”** U.S.S.R, v. 4, p. 1–15, 1988.
- [13] J. B. G. F. SILVA E. K. HIRUMA, X. WANG, J. SHANG, **“Projeto Paranaíba – uma Linha com Elevada Capacidade de Transmissão”** XVII ERIAC, 21 al 25 de mayo de 2017, Ciudad del Este, Paraguay.
- [14] Rogério Peixoto Guimarães, Ricardo Shigueo Nakamura, Paulo César Campos, Marina Megale de Carvalho Guerra Alcedo Quintiliano, João Batista G. Ferreira da Silva. **“LT 500 kV CS BARREIRAS II – RIO DAS ÉGUAS – LUZIÂNIA SOLUÇÃO ELETROMECAÂNICA ESTRUTURAL PARA SIL DE 1670MW”** XXIII SNPTEE SEMINÁRIO NACIONALDE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - FI/GLT/25, 18 a 21 de Outubro de 2015, Foz do Iguaçu – PR.
- [15] MACIEL, R. P. **“Maximização da potência característica de linhas de transmissão usando método de otimização não linear.”** (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2013.
- [16] J.S. Acosta, M.C. Tavares, **“Methodology for optimizing the capacity and costs of overhead transmission lines by modifying their bundle geometry”** Electr. Power Syst. Res. (2017)
-

-
- [17] Vanderlei Guimarães Machado, José Henrique Machado Fernandes, Marcos César de Araújo, Mário Noboru Takai, Ricardo Alexandrino Vasconcelos, Antônio Pessoa Neto, Ruy Barbosa Pinto Jr, Filipe Guerra Soares, Paulo Ricardo R. Liberato Silva, Reynaldo Castriota de Mello, Sírio José Ferreira. **"LT 500 kV INTERLIGAÇÃO NORTE/SUL III – TRECHO 2 SOLUÇÃO ESTRUTURAL COM TORRE MONOMASTRO E FEIXE EXPANDIDO"** XIX SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – GLT 01, 14 a 17 de Outubro de 2007, Rio de Janeiro – RJ
- [18] VILELA, P.H.S.; LOPES, I. J. S.. **“Uma Proposta de Análise Técnica para Linhas de Transmissão Compactas com Potência Natural Elevada em Regiões com Topografia Acidentada”**. XVIII ERIAC - Encontro Regional Ibero-americano do Cigre, Maio 2019, Foz do Iguaçu, Brasil.
- [19] CARSON J. R., **“Wave propagation in overhead wires with ground return”**, Bell Systems Technical Journal, vol. 5, pp. 539-556, 1926.
- [20] MENDONÇA, P. N. **“Otimização dos Feixes de Condutores de Linhas de Transmissão em Corrente Alternada”** (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Brasil, 2002.
- [21] DERI, A., G. Tecan, A. Semlyen, A. Castanheira, **“The complex ground return plane: a simplified model for homogeneous and multilayer earth return”**, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 100, no. 8, pp. 3686-3693, 1981.
- [22] ARAUJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. . **“Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia”**. 1a. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2005. 260p .
- [23] FORTESCUE C. L., **“Método de Componentes Simétricos Aplicado à Solução de Circuitos Polifásicos”**, Transactions on American Institute of Electrical Engineers – AIEE, vol. 37, p. 1027-1140, 1918
-

-
- [24] Maduro-Abreu A., Saavedra A. R., Araújo J. A., Murça L. B., Fragelli R. R., Frontin S. de O., Rego V. B., “**Prospecção e Hierarquização de inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão**”, Brasília, 2010.
- [25] Sistemas DYWIDAG para Linhas de Transmissão - **DYWIDAG** – Disponível em: <www.dywidag.com.br>.
- [26] PLP do Brasil - **PLP** – Disponível em: <<http://www.plp.com.br/site/transmissao-catalogo/item/594-cross-rope>>.
- [27] Eletrobras Furnas - **Furnas** – Disponível em: *Revista Furnas nº 360, pagina 8.*
- [28] **Portal o Setor Elétrico** – Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/desafios-para-implantacao-da-lt-500-kv-tucurui-manaus/>>.
- [29] Metalica Torres de Transmissão de Energia - **Metálica** – Disponível em: <<http://www.metolica.com.br/torres-de-transmissao-de-energia>>.
- [30] Shanghai **SHEMAR** Power Engineering LLC – Disponível em: <<http://www.shemar.com.cn/>>.
- [31] M. X. Yang, Y. Chen, W. G. Li, et al. “**Research progress on composite tower and pole and its key technical problems**”, North China electric power, no. 1, pp. 48-50, 2010.
- [32] H. Wei-Gang, “**Study on Conductor Configuration of 500-kV Chang-Fang Compact Line**”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 18, NO. 3, JULY 2003.
- [33] **Memória da Eletricidade** – Disponível em: <<https://portal.memoriadaeletricidade.com.br/>>.
- [34] X. Yang, Q.Y. Wang, H.R. Wang, “**Transient electric field computation for composite cross-arm in 750 kV AC transmission line**”
-

-
- under lightning impulse voltage,"** IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, pp. 1942-1950, Aug. 2016.
- [35] X. Yang, X. Q. Yu, et al. **"Voltage-sharing characteristics of composite cross-arm in 750kV AC transmission lines"**. Power system technology, vol. 37, no. 6, pp. 1625-1631, 2013.
- [36] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS – **Submódulo 2.4: Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão**, disponível em: <<http://www.ons.org.br>>.
- [37] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS – **Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão**. Estudos Elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão, Rio de Janeiro, 2013
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**. Brasil: ABNT, 1985.
- [39] VILLAS, José Eduardo Telles. **LINHAS DE TRANSMISSÃO II - Projeto Mecânico**. UERJ, Rio de Janeiro, 2015.
- [40] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI), **Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above**, Second Edition, California, 1982.
- [41] FARZANEH, M.; FAROKHI, S.; CHISHOLM, W.A.; **Electrical Design of Overhead POWER TRANSMISSION LINES**. MacGraw-Hill, United States of America. 2013.
- [42] FUCHS, RUBENS DARIO. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas; Teoria das Linhas em Regime Permanente**. 2ª. Edição; Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1979.
-

- [43] LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.
- [44] HØIDALEN, H.K; PRIKLER, L.; **ATPDRAW version 5.6**, User Manual, Norway, 2009.
- [45] **REZENDE**, P.H.O.; SANTILHO, F. P.; VASCONCELOS, L.E.; SILVA, T.V.. “**COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO COMPENSADORES ESTÁTICOS FIXOS**”. XI CEEL – Conferencia de Estudos em Engenharia Elétrica, Novembro 2013, Uberlandia, Brasil.
- [46] Agência Nacional de Energia Elétrica – **ANEEL: Base de Preços de Referência 06/2017**, Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/transmissao4>.