



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
ASPECTOS TÉCNICOS, ORÇAMENTÁRIOS E CONSTRUTIVOS

Victor Prangiel de Menezes

DRE:106084883

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Antônio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Rio de Janeiro

Agosto de 2015

**LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
ASPECTOS TÉCNICOS, ORÇAMENTÁRIOS E CONSTRUTIVOS**

Victor Prangiel de Menezes

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.
(Orientador)

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.

Eng. Luiz Antônio de Andrade

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Agosto/2015

Menezes, Victor Prangiel de

Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos
Técnicos, Orçamentários e Construtivos

Victor Prangiel de Menezes - Rio de Janeiro: UFRJ/
Escola Politécnica, 2015.

X, 77 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso
de Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 75.

1. Introdução.
2. A Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica no Brasil.
3. Estimativa de Orçamentos.
4. Aspectos Construtivos de Linhas de Transmissão.
5. Considerações Finais e Propostas para Trabalhos Futuros.
6. Referências Bibliográficas. I. de Lima, Antonio Carlos Siqueira II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Técnicos, Orçamentários e Construtivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e imensamente aos meus amados pais, Sarita e Alcenir, por todo o amor, suporte, força e tranquilidade, que me permitiram cumprir esta etapa com confiança, dedicação e equilíbrio;

À minha irmã, Viviane, minha melhor amiga que sempre me incentivou em todos os momentos e por quem nutro profunda admiração e amor;

À minha querida tia Glorinha, cuja receptividade, afeto e carinho me fizeram ainda mais forte;

À minha bondosa avó Arlette, pela ternura e apoio;

A toda a minha família e em especial aos imortais tios Isaac e Ester, que sempre me encorajaram;

À minha preciosa namorada, Jade, que me cativa a cada dia com seu discurso e olhar sincero, alegre e apaixonante, e me ajuda a seguir sempre motivado;

Ao meu cunhado, Pedro, pela serenidade e incentivo;

Aos meus eternos amigos: Abuda, Felipe, Igor, Léo, Osvaldo e Vitor, por todo o companheirismo e fraternidade;

Às grandes amizades que fiz na universidade e que espero levar para a vida, pois tornaram minhas metas mais acessíveis e meus dias mais felizes;

Aos meus professores, que além de abrirem as portas da engenharia para o meu futuro, me ensinaram a grandeza e a beleza da busca pelo conhecimento;

À banca examinadora deste trabalho, composta por três mestres que tiveram notável importância não só na elaboração deste estudo, mas também em minha formação profissional;

À empresa Abengoa Brasil, pelo suporte e cessão de conteúdo;

Aos que pretendem encontrar na engenharia soluções que possam beneficiar todos os seres vivos.

Resumo do Projeto Final apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
ASPECTOS TÉCNICOS, ORÇAMENTÁRIOS E CONSTRUTIVOS

Victor Prangiel de Menezes

Agosto/2015

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Curso: Engenharia Elétrica

A expansão do sistema de energia elétrica está diretamente relacionada com o desenvolvimento socioeconômico de um país.

O Sistema Elétrico Brasileiro é formado basicamente por empresas de geração, transmissão e distribuição de energia, sendo um modelo de origem predominantemente hidrotérmica, com múltiplos proprietários, e que foi dividido em quatro grandes subsistemas interligados entre si – Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste e Norte – além de alguns poucos sistemas isolados.

Como grande parte dos recursos naturais renováveis utilizados para a geração de energia elétrica no Brasil está afastada dos grandes centros consumidores, é necessário utilizar e ampliar a rede de transmissão de energia, seja para interligar áreas ainda não conectadas ao sistema ou para elevar a sua confiabilidade.

Este trabalho aborda os aspectos construtivos das linhas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada de médias e longas distâncias, desde as fases de concepção do projeto, passando por análises técnicas e econômicas, até a entrega e finalização de um empreendimento deste porte. Destaca-se no texto a cronologia dos eventos compreendidos neste segmento, assim como a especificação dos materiais e serviços empregados com a finalidade de otimizar os custos e tornar os projetos mais eficientes.

Palavras-chave: Transmissão de energia, Aspectos construtivos de linhas de transmissão.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

**POWER TRANSMISSION LINES
TECHNICAL ASPECTS, BUDGET AND CONSTRUCTION**

Victor Prangiel de Menezes

August/2015

Advisor: Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Course: Electrical Engineering

The electrical power system expansion is directly related to the socio-economic development of a country.

The Brazilian Electric System is formed basically by generation, transmission and distribution companies and it is a predominantly hydrothermal source model, with multiple owners, which was divided into four main interconnected subsystems – Southeast/Midwest, South, North and Northeast and Northeast – beyond a few isolated systems.

As much of the renewable natural resources used to generate electricity are far from major consumer centers in Brazil, it is necessary to use and expand the power transmission network, both to link areas not still connected to the system as to increase its reliability.

This work deals the main aspects of the AC power transmission lines in medium and long distances, since the project design stages, including technical and economic analysis, until delivery and conclusion of a project of this size. In this text it can highlight the chronology of events comprising this segment, as well as the specification of the materials and services in order to optimize costs and make the most efficient projects.

key-words: *Power Transmission, Constructive aspects of transmission lines.*

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	4
1.2	Estrutura do Trabalho	6
2	A Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica no Brasil.....	7
2.1	História.....	10
2.2	A Reestruturação do Setor Elétrico.....	13
2.3	A Rede Básica e o Sistema Interligado Nacional (SIN)	14
2.3.1	Planejamento	17
2.3.2	O Modelo de Concessão	18
2.3.3	Licenciamento Ambiental.....	23
3	Estimativa de Orçamentos	25
3.1	Custos de Instalação.....	26
3.2	Produtividade	29
4	Aspectos Construtivos de Linhas de Transmissão	30
4.1	Definição da Diretriz.....	30
4.2	Engenharia de Projeto	33
4.2.1	Projeto Básico.....	33
4.2.2	Projeto Executivo	34
4.3	Administração local e Canteiro de Obra.....	39
4.4	Obras Cíveis	42
4.4.1	Fundações	42
4.4.2	Abertura de Acessos	46
4.4.3	Limpeza e Faixa de Servidão.....	47
4.4.4	Aterramento	49
4.5	Estruturas	51
4.5.1	Montagem de Estruturas Metálicas	54

4.6	Isoladores	57
4.7	Cabos	59
4.7.1	Condutores.....	59
4.7.2	Para-Raios.....	61
4.7.3	Instalação dos Cabos	62
4.8	Ferragens e Acessórios	66
4.9	Sinalização	67
4.10	Revisão Final.....	68
5	Considerações Finais e Propostas para Trabalhos Futuros.....	69
A.	Apêndice A: Lista de Construção	73
B.	Apêndice B: Plano de Lançamento	74
	Referências Bibliográficas.....	75

Lista de Figuras

Figura 1: Rede de transmissão do Brasil (ONS - 2015)	3
Figura 2: Custo de instalação x Extensão da LT (energy.siemens.com).....	8
Figura 3: Circuito Equivalente - Linha Curta.....	9
Figura 4: Circuito Equivalente - Linha Média	9
Figura 5: Circuito Equivalente - Linha Longa	9
Figura 6: Extensão das linhas de transmissão por nível de tensão (ONS - 2011).....	13
Figura 7: Interligação Geométrica Brasileira.....	17
Figura 8: Fluxograma do processo de outorga de concessão mediante licitação	20
Figura 9: Resumo dos custos dos componentes de uma LT (Cigré)	27
Figura 10: Escopo + Custo + Tempo = Qualidade	29
Figura 11: Diretriz preferencial e coordenadas geográficas (Aneel - 2015)	32
Figura 12: Plotação de torres com o PLS CADD.....	35
Figura 13: Condições de flecha (Furnas – 2012).....	37
Figura 14: Vão de vento e Vão de peso [33]	38
Figura 15: Fundação tipo sapata.....	44
Figura 16: Tubulão e Estacas metálicas	45
Figura 17: Largura da faixa de servidão para LTs de 500 kV	48
Figura 18: Instalação de cabo contrapeso para aterramento.....	50
Figura 19: Aterramento de cercas metálicas (Furnas – 2012).....	51
Figura 20: Estrutura autoportante e estaiada (Furnas – 2012).....	53
Figura 21: Transposição de Fases (Furnas – 2012).....	54
Figura 22: Pré-montagem de estrutura metálica treliçada	55
Figura 23: Montagem mista de estrutura metálica treliçada.....	56
Figura 24: Cadeia dupla de isoladores de vidro	58
Figura 25: Isolador polimérico (Siklowatt – 2014)	58
Figura 26: Cabos ACSR e ACAR	60
Figura 27: Lançamento de cabos sob tensão controlada (Furnas – 2012).....	63
Figura 28: Emenda preformada e emenda à compressão	64
Figura 29: Flecha [33]	65
Figura 30: Espaçadores (PLP – 2015)	67
Figura 31: Esferas de sinalização	68
Figura 32: Lista de Construção – Seccionamento na LT 230 kV Açú II - Açú III	73

Figura 33: Plano de Lançamento - LT 230 kV Ribeiro Gonçalves - Balsas 74

1 Introdução

O desenvolvimento social e econômico de uma nação tem uma forte relação com a expansão do setor elétrico, o que torna a energia elétrica e suas diversas aplicações indispensáveis à sociedade moderna. O progresso de uma região é acompanhado pelo aumento na demanda por eletricidade, tanto pelos fornecedores, que necessitam de mais energia para poderem produzir, quanto por parte dos consumidores, que adquirem mais produtos como eletrodomésticos e eletroeletrônicos. Este crescimento no consumo implica na expansão da oferta e torna necessário o investimento em infraestrutura, que carece de ainda mais energia.

Nesse sentido, além de atrair novas indústrias e mercados, gerando empregos e disponibilizando variados bens e serviços à sociedade, este ciclo de desenvolvimento traz também a responsabilidade e o desafio de ter que atender, com folga, todas as possíveis condições para suprir a demanda. Deste modo, implementar soluções que possam atender ao crescente mercado brasileiro é uma tarefa árdua, mas fundamental.

A vasta extensão territorial brasileira - com cerca de 8,5 km² [1] - aliada à abundância de recursos energéticos, permite ao país dispor de diversas fontes de geração de energia, de caráter predominantemente renovável.

Em 2013, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica no Brasil (englobando centrais de serviço público e autoprodutoras) alcançou aproximadamente 127 GW, com destaque para a geração hidráulica, que corresponde por 64,9 % da oferta interna [2]. Porém, apesar de o potencial hidrelétrico brasileiro estar estimado em 260 GW, apenas 25% deste total é efetivamente utilizado para a geração de energia [3]. O restante remete à existência de parques geradores ainda não explorados na região Norte, seja por entraves ambientais, por projetos ainda inviáveis técnico-economicamente ou simplesmente devido às dificuldades de acesso à região.

Na verdade, a maior parte das usinas hidrelétricas responsáveis pela geração brasileira está afastada dos grandes centros de consumo, tornando primordial viabilizar uma extensa e confiável rede de transmissão de energia elétrica capaz de transportar toda a oferta disponível. Quanto mais distantes estão as fontes de geração das cargas, maior a necessidade de projetar sistemas de transmissão robustos.

Soma-se a isso a importância de integrar outras fontes, tanto as não renováveis (como o carvão mineral, petróleo, gás natural e seus derivados) como as renováveis (eólica, biomassa e solar), que apresentam peculiaridades e grandes desafios de integração ao sistema elétrico. Uma malha de transmissão eficiente é indispensável para unir todos os recursos e otimizar a geração de energia no Brasil.

A complexa rede de transmissão brasileira, exibida na figura 1, tem cerca de 116.000 km [4] e é considerada a maior rede interligada do mundo [5]. O Sistema Interligado Nacional conecta eletricamente todas as regiões do país, exceto pequenos sistemas isolados existentes na Amazônia ou sistemas de natureza particular, que correspondem à pequena parcela de 1,7 % do total instalado [6]. Porém, ainda que a maior parte do país seja atendida por redes de transmissão, a crescente demanda requer a permanente expansão e reforço da malha, para que haja qualidade e confiabilidade no atendimento.

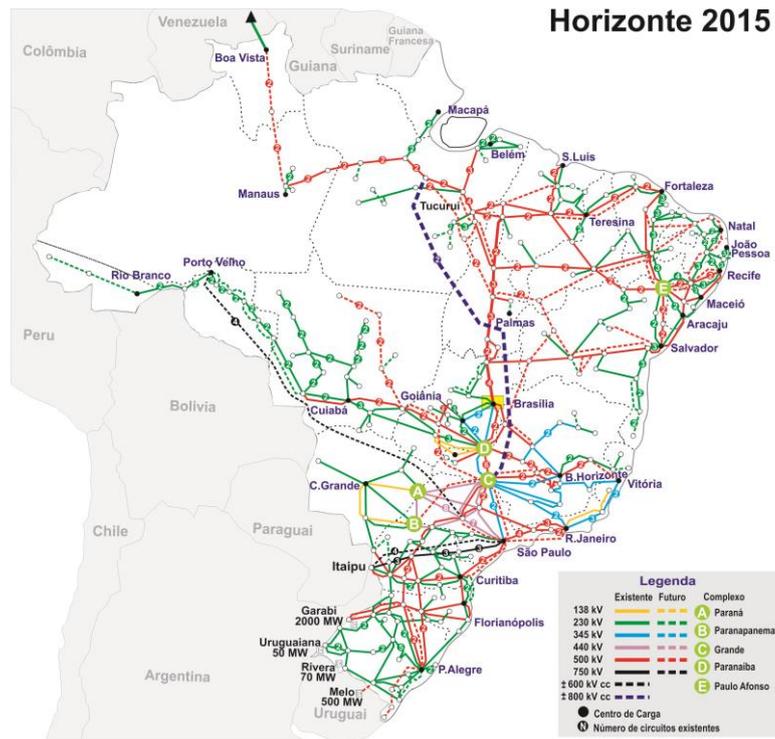


Figura 1: Rede de transmissão do Brasil (ONS - 2015)

A construção de linhas de transmissão, seja para a interligação nacional ou apenas para atender a demandas específicas, é um serviço que exige muitos estudos tanto de viabilidade técnica quanto econômica e visa um melhor aproveitamento da energia. É importante destacar que todas as etapas de projeto e construção de LTs (linhas de transmissão) exigem fortes aportes financeiros, desde a sua concepção até a conclusão. Ademais, depois de construídas, estas linhas necessitam ser operadas e conservadas por equipes qualificadas.

Construir linhas de transmissão no Brasil não é uma tarefa livre, pois é necessário obter autorizações de órgãos governamentais. Sua implantação é uma tarefa bastante complexa, que exige grandes esforços em distintas etapas, como no processo de licenciamento ambiental, no estudo do traçado e na busca por mão-de-obra especializada. Além disso, é necessário solucionar dois grandes desafios de ordem técnica para obter sucesso no projeto: reduzir as perdas elétricas nas linhas e otimizar os custos na construção.

1.1 Objetivos

Este texto tem a missão de contribuir para a disseminação do conhecimento sobre as características técnicas e econômicas do serviço de construção de linhas de transmissão, fornecendo subsídios para a compreensão de metodologias utilizadas nos projetos e colaborando para que entusiastas do assunto entendam a importância deste serviço para o progresso da nação.

Desta forma, é dada a devida importância à história do setor de transmissão de energia no Brasil, incluindo grande parte dos fatos que deram origem ao complexo sistema interligado que o país ostenta. Os instrumentos que regem o segmento e as atribuições dos principais órgãos do setor também são apresentados, auxiliando na compilação de registros e fornecendo uma base substancial para futuros estudos.

O modelo de realização dos leilões de transmissão é abordado de forma detalhada, assim como os procedimentos e documentos existentes na prática de concessão. A questão da parceria público-privada no segmento é desenvolvida, assim como as diversas regras que possibilitam tornar o processo de concorrência benéfico para ambos os setores.

Também são disponibilizadas informações sobre elaboração de custos e orçamentos, que visam facilitar a estruturação de cronogramas e composição de preços de venda desse tipo de serviço. Assim, no decorrer do texto, é possível compreender que a tarefa de estimar preços para um empreendimento deste porte, apesar de bastante complexa devido à infinidade de variáveis, é perfeitamente possível de ser realizada por modelos conhecidos e eficientes.

Em seguida são detalhadas as etapas de execução de obras. A abordagem é realizada cronologicamente, englobando a implantação de LTs desde a sua concepção até a entrega e posterior energização. É importante salientar a interdisciplinaridade presente nestes projetos, que une serviços essenciais de engenharia civil, mecânica e ambiental, além de todos os parâmetros e cálculos presentes no curso de engenharia elétrica.

Assim, com base em todas as informações supracitadas é possível perceber a importância das linhas de transmissão e compreender, de forma mais abrangente, todas as etapas de um projeto desta dimensão. Relacionando os métodos de construção com os custos do empreendimento é possível concluir que o custo final depende essencialmente de como o projeto é idealizado e executado.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos. Neste primeiro é realizada uma análise inicial sobre o sistema elétrico brasileiro, com destaque para a o setor de transmissão de energia. Os objetivos citados posteriormente declaram o foco e as metas deste texto.

No capítulo 2 é desenvolvido todo o contexto histórico que permitiu a composição da Rede Básica até chegar ao modelo de concessão vigente. São citadas as documentações e regras que atualmente direcionam as obras no segmento de transmissão, além dos aspectos relacionados ao licenciamento ambiental, que possuem influência determinante nas etapas que antecedem a construção de linhas de transmissão.

O capítulo 3 trata dos custos associados aos empreendimentos de transmissão. É através da composição destes custos que as transmissoras elaboram os preços que serão ofertados nos leilões de transmissão de energia.

No capítulo 4 são descritas as atividades de construção propriamente ditas. Nesta parte é elaborada toda a cronologia das obras e descritos, detalhadamente, os serviços que compõem todas as etapas da construção. As equipes que constituem cada operação e os materiais utilizados na instalação da LT também são explicitados.

Finalmente, no capítulo 5, é fornecido um breve panorama atual do setor elétrico, são acrescentadas algumas propostas para projetos futuros e o trabalho é, enfim, concluído.

2 A Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica no Brasil

A geração de energia pode ser realizada por distintos tipos de usinas: hidráulica, eólica, térmica, fotovoltaica, etc., até o ponto em que há a conversão na forma de eletricidade. Para conduzir a energia elétrica obtida dessas fontes até o limite dos sistemas de distribuição são utilizadas as linhas de transmissão.

Além de transportar em elevadas tensões toda a energia gerada, estes componentes básicos do sistema elétrico de potência também têm a função de realizar a interligação de múltiplos sistemas de transmissão, possibilitando o intercâmbio de energia e permitindo a continuidade do fornecimento às cargas mesmo em casos de emergência.

A transmissão de energia pode ser realizada através de linhas aéreas, subterrâneas ou subaquáticas. A condução convencional é realizada através de linhas aéreas, que são caracterizadas por utilizarem condutores nus em sua extensão, conectados nas estruturas por isoladores. As linhas subterrâneas, em geral, utilizam cabos isolados e instalados em redes de dutos, sendo uma boa solução para grandes centros urbanos, apesar do custo mais elevado. As linhas subaquáticas, por sua vez, têm grandes limitações técnicas e econômicas, mas são úteis em projetos especiais de travessias de rios e canais com vãos muito grandes, que dificultam a escolha de outra alternativa.

As LTs podem transportar energia em corrente alternada ou corrente contínua. O sistema em corrente alternada (CA) utiliza redes trifásicas com um ou mais subcondutores por fase e é o mais utilizado por ser mais flexível, pois permite gerar, transmitir, distribuir e utilizar a energia elétrica na tensão mais econômica e segura. Já a transmissão em corrente contínua (CC) tem sido aproveitada ultimamente para transportar grandes blocos de potência a elevadas distâncias, através de um ou dois polos com diversos condutores por polo. Neste caso, apresenta menores custos e perdas do que a transmissão CA para uma mesma potência

transmitida. Também podem ser utilizadas para a interligação de sistemas de frequências diferentes, como é o caso do Elo CC em Itaipu que conecta a energia produzida na frequência de 50 Hz ao modelo de geração brasileiro, em 60 Hz.

O que caracteriza a escolha do sistema é o custo de sua instalação. Apesar de o foco desse texto ser a abordagem de linhas aéreas de transmissão de extra-alta tensão em corrente alternada, é importante compreender onde se aplica cada um dos sistemas existentes. A figura 2 exibe um comparativo entre o custo de instalação em função da extensão da linha. A imagem alerta para o fato de que é mais vantajoso investir em linhas CC para comprimentos de linha acima de 600 km e, caso contrário, o investimento em linhas CA é o mais recomendado.

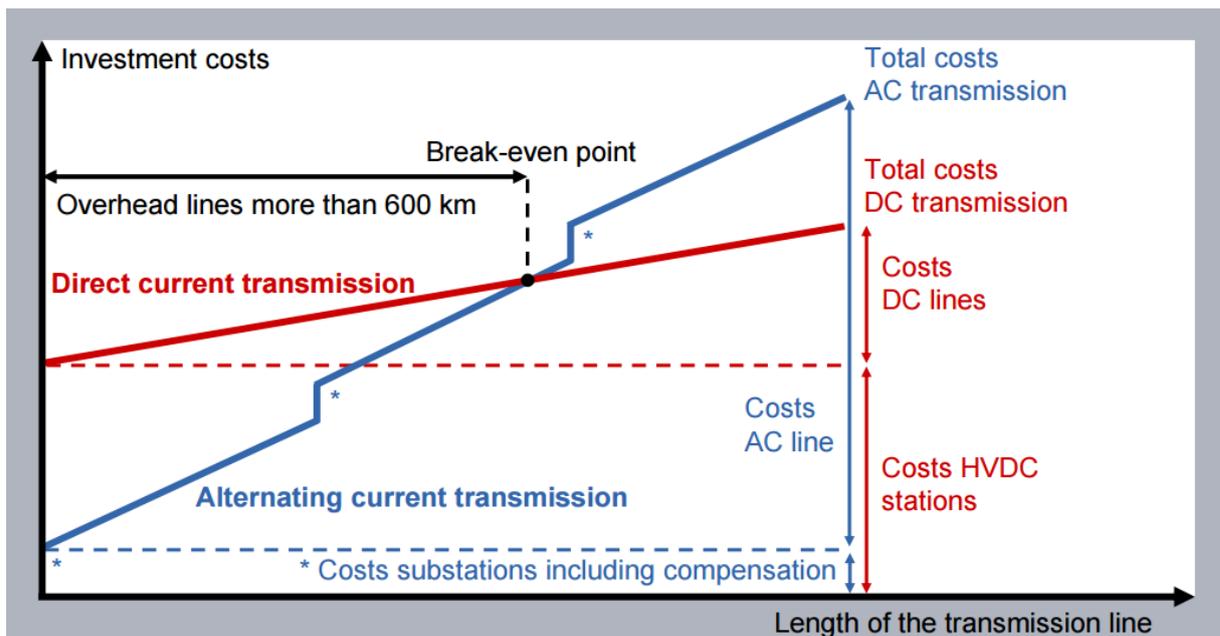


Figura 2: Custo de instalação x Extensão da LT (energy.siemens.com)

As LTs CA podem ser curtas, médias ou longas, se tiverem comprimentos até 80 km, entre 80 km e 240 km e maiores que 240 km, respectivamente.

As linhas curtas são modeladas através dos parâmetros série: resistência e indutância, e são representadas de acordo com a figura 3 [29].

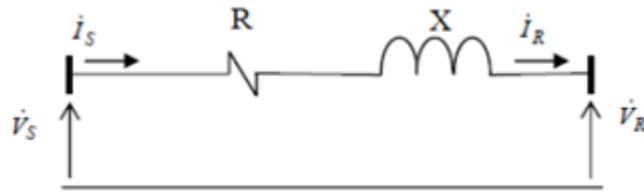


Figura 3: Circuito Equivalente - Linha Curta

Na representação das linhas médias é necessária a inserção da capacitância *shunt* (em paralelo) nas extremidades, conforme mostra a figura 4. Este modelo é denominado π (pi) nominal.

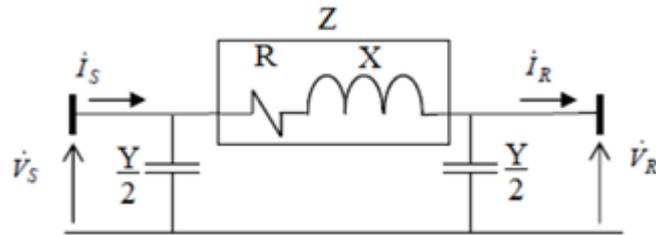


Figura 4: Circuito Equivalente - Linha Média

No modelo π (pi) equivalente, representação mais complexa idealizada para LTs com extensões maiores que 240 km, os parâmetros distribuídos são modelados por equações diferenciais. A figura 5 ilustra o circuito equivalente deste caso.

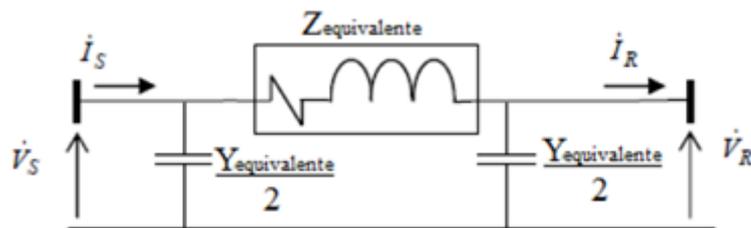


Figura 5: Circuito Equivalente - Linha Longa

Em LTs com comprimentos acima de 400 km é essencial inserir equipamentos de compensação, tais como reatores em paralelo e capacitores em série, a fim de elevar a

capacidade da LT e evitar fenômenos indesejáveis, como o Efeito Ferranti, que faz com que a tensão ao longo da linha de transmissão aumente na ausência de compensação reativa.

Porém, neste trabalho não serão abordadas as linhas de transmissão com compensação, pois, em uma análise econômico-constructiva, os equipamentos de compensação estão relacionados aos custos e técnicas de construção das subestações, que não fazem parte do escopo deste texto.

2.1 História

No fim do século XIX, quando a agricultura era a principal atividade econômica do Brasil e a participação da eletricidade como fonte de energia ainda era pouco efetiva, foi construída em 1883, na cidade de Diamantina (MG), a primeira linha de transmissão do país. Contava com uma extensão aproximada de 2 km e sua finalidade era transportar a energia gerada em uma usina hidrelétrica, constituída por duas rodas d'água e dois dínamos Gramme, que acionava bombas hidráulicas em uma mina de diamantes. Consta que era a linha mais longa do mundo, à época [7].

Somente com o início da industrialização é que o uso da energia elétrica foi impulsionado. Este fato se deve, principalmente, ao aumento da concentração populacional nos centros urbanos e, a partir de 1920, já se verificava a predominância da hidroeletricidade na geração de energia brasileira, representando cerca de 80% da potência instalada (ou cerca de 780 MW) e indo na direção oposta à tendência mundial, onde predominava a termoeletricidade com base no carvão mineral.

O sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro formava uma organização industrial feita por um arquipélago de ilhas elétricas com uma regulamentação ainda incipiente. Era organizado de forma independente e isolado e atendia preferencialmente aos maiores centros urbanos, localizados no entorno das cidades do Rio de Janeiro e São Paulo.

Somente após a Revolução de 1930 é que houve uma intensa intervenção do Estado no setor, atendendo, sobretudo, aos aspectos regionais.

Durante a II Guerra Mundial essas ações intervencionistas traduziram-se na criação de empresas estatais como a Comissão Estadual de Energia Elétrica (CEEE) em 1943, a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) em 1945, a Centrais Elétricas de Minas Gerais (Cemig) em 1952, a Centrais Elétricas de São Paulo (CESP) em 1953 e a Central Elétrica de Furnas em 1957. Merece destaque neste período a criação do Ministério de Minas e Energia (MME) em 1960 e da Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras) em 1961, essenciais para a consolidação da influência do Estado no setor elétrico brasileiro. Também foi anexada ao Estado, em 1964, a concessionária do grupo norte-americano American and Foreign Power Company (Amforp), do qual fazia parte a subsidiária Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), e criada, em 1968, a Espírito Santo Centrais Elétricas S.A. (Escelsa) como parte da Eletrobras.

Estas empresas tiveram participação contundente na implantação dos sistemas de geração e transmissão do Brasil. A Chesf construiu o complexo de usinas de Paulo Afonso no rio São Francisco e introduziu o sistema de transmissão em 230 kV, conectando a Usina de Paulo Afonso I (180 MW) à cidade de Salvador. Furnas, com a missão de construir o que na época seria a maior usina brasileira, inaugurou a tensão de 345 kV entre a usina de Furnas (1216 MW) e Belo Horizonte. O sistema em 440 kV, sob responsabilidade da Cesp, foi concebido para o transporte da energia gerada nas usinas de Jupia (Engenheiro Souza Dias – 1551,2 MW) e Ilha Solteira (3444 MW) com o objetivo de alimentar a cidade de São Paulo. A adoção do sistema em 500 kV só foi ocorrer com a construção da usina de Marimbondo (1440 MW), também por Furnas, e as primeiras linhas energizadas nesse nível de tensão uniam Marimbondo à Araraquara I e II, Araraquara-Poços e Araraquara-Campinas. Já o trecho de

750 kV, que conectava a subestação de Ivaiporã à Tijuco Preto, ficou sob incumbência da Eletrosul e contribuiu para a redução do déficit de energia que existia no Sudeste.

Se até então os sistemas de geração, transmissão e distribuição eram organizados de forma independente e isolados com dois níveis de frequência (50 Hz e 60 Hz), a partir daí a Eletrobras decidiu introduzir um plano de unificação de frequências no padrão de 60 Hz [8]. Desta forma, em 1973, o país foi dividido em quatro regiões geoeletricas: Nordeste, que correspondia aos espaços de atuação da Chesf; Sudeste, Distrito Federal e parte dos estados de Goiás e Mato Grosso, sob responsabilidade de Furnas; Sul, sob domínio da recém criada Centrais Elétricas do Sul do Brasil (Eletrosul), em 1968, subsidiária da Eletrobras; e Norte, responsabilidade da também subsidiária da Eletrobras e recém criada Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte), em 1973.

Uma das dificuldades dessa regionalização do setor elétrico brasileiro era o fato de não haver uma padronização nacional em relação às tensões de transmissão, que operavam em níveis distintos e muito próximos. Esta adversidade dificultava na viabilização de soluções econômicas para expandir as interligações regionais, que iriam otimizar a expansão energética e melhor atender às necessidades do país.

Decidiu-se então pela padronização das tensões de transmissão de acordo com os níveis exibidos na tabela 1.

Tabela 1: Padrão dos níveis de tensão elétrica brasileiro

Classe de Tensão	Tensão Nominal (kV)
Extra Alta Tensão (EAT)	230
	345
	440
	500
	765

Estes são os valores nominais de tensão utilizados até hoje nas linhas de transmissão de corrente alternada no Brasil. Esta tabela desconsidera os níveis de tensão em corrente contínua existentes no país e níveis abaixo de 230 kV que, de acordo com a NBR 5422, se referem a tensões de subtransmissão e distribuição. A exceção fica por conta da tensão de 138 kV, que pode ser utilizada tanto na subtransmissão como na transmissão de energia. Neste último caso, o objetivo é manter a continuidade do fluxo de energia, principalmente em casos de contingências em linhas de tensão superior [9]. A figura 6 indica a extensão das linhas de transmissão presentes no SIN até o ano de 2011, de acordo com o nível de tensão utilizado:

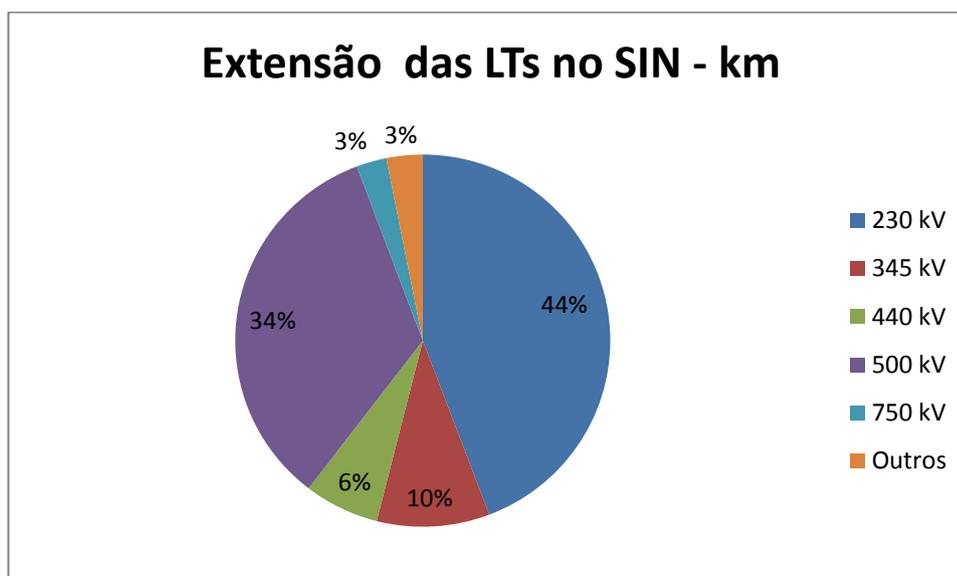


Figura 6: Extensão das linhas de transmissão por nível de tensão (ONS - 2011)

2.2 A Reestruturação do Setor Elétrico

O final do processo de nacionalização do setor elétrico brasileiro foi marcado fundamentalmente por dois acontecimentos: a fundação do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) em 1974, criado com o objetivo de “promover uma infraestrutura científica e de pesquisa, visando ao desenvolvimento, no país, de avançada tecnologia no campo de

equipamentos e sistemas elétricos” e a compra da holding canadense Brazilian Traction, Light and Power, mais conhecida como Light, em 1979 [10].

Na década de 80, devido ao agravamento da dívida externa brasileira, houve uma crise econômico-financeira no setor que gerou cortes de gastos estatais. Este cenário ocasionou atrasos em cronogramas de implantação e elevação dos custos de obras, resultando até em paralisação de obras de geração e transmissão.

Somente a partir dos anos 90 é que alguns projetos de modernização do setor foram postos em prática. Dois atos significativos para viabilizar esta reestruturação foram: a promulgação da Lei nº 8.031/1990 que instituiu o Programa Nacional de Desestatização (PND), que permitiu a retomada de investimentos da iniciativa privada em empresas e serviços até então gerenciados pelo poder público, e a Lei nº 8.631/1993, conhecida como a Lei da Desequalização Tarifária, que estipulava que os níveis das tarifas seriam agora propostos pelo concessionário supridor, que garantiria a prestação de serviços adequados.

A regulamentação dos preceitos de licitação para concessões só foi efetivamente realizada entre os anos 1994 e 1995, dando início à competição no setor elétrico. Outro fato importante desta época foi a autorização de reunião de pessoas jurídicas ou empresas em consórcio para produzir energia elétrica destinada ao comércio, dando origem à figura do Produtor Independente de Energia (PIE), através da aprovação da Lei 9.074, que vigora até os dias de hoje [8].

2.3 A Rede Básica e o Sistema Interligado Nacional (SIN)

A partir de estudos visando o aperfeiçoamento e a evolução do setor elétrico brasileiro, já na segunda metade dos anos 90 a indústria de energia elétrica foi remodelada com as seguintes realizações:

- Os segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia das empresas foram desverticalizados através da separação das parcelas física e comercial da energia, dando origem ao setor de comercialização;
- O segmento de transmissão tornou-se um negócio independente, apesar de totalmente regulado;
- A comercialização de energia elétrica entre geradores e distribuidores de diferentes pontos da rede foi viabilizada com o estabelecimento de condições para o livre acesso à rede de transmissão. Ressalta-se que o modelo proposto trata o acesso ao sistema e sua operação independentemente das transações comerciais de compra e venda de energia elétrica.
- Criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável por coordenar e controlar a operação da geração e da transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN);
- Adoção do regime de concorrência tanto neste novo segmento de comercialização quanto no segmento de geração. Neste último, houve um procedimento particular para a geração hidrelétrica devido à necessidade de otimizar os aproveitamentos de produção de energia nas cascatas;
- Criação do Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE) (que recentemente foi substituído pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE) com a atribuição de regularizar as transações de compra e venda de energia elétrica e efetuar a contabilização e a liquidação de curto prazo [8].

Neste contexto, e após algumas outras resoluções publicadas, chega-se à Resolução Normativa nº 67, que define as premissas básicas para a composição da Rede Básica, da qual fazem parte as seguintes instalações:

- Linhas de transmissão, barramentos, transformadores de potência e equipamentos de subestação com tensão igual ou superior a 230 kV;
- Transformadores de potência que apresentem tensão primária igual ou superior a 230 kV e tensões secundária e terciária inferiores a 230 kV, bem como as respectivas conexões e demais equipamentos ligados ao terciário [11].

Ao mesmo tempo, foram definidas as instalações de transmissão que não integram a Rede Básica, sendo classificadas como Demais Instalações de Transmissão (DIT). Destas fazem parte:

- Linhas de transmissão, barramentos, transformadores de potência e equipamentos de subestação, em qualquer tensão, quando de uso de centrais geradoras, em caráter exclusivo ou compartilhado, ou de consumidores livres, em caráter exclusivo;
- Interligações internacionais e equipamentos associados, em qualquer tensão, quando de uso exclusivo para importação e/ou exportação de energia elétrica;
- Linhas de transmissão, barramentos, transformadores de potência e equipamentos de subestação com tensão inferior a 230 kV, localizados ou não em subestações integrantes da Rede Básica [11].

A Rede Básica compõe o Sistema Interligado Nacional, que atualmente promove a interligação entre todas as regiões do país eletricamente, conforme mostra a figura 7. É importante destacar que o modelo brasileiro é dimensionado pelo critério N-1, ou seja, não deve haver interrupção do fornecimento de energia nem perda de estabilidade do sistema mesmo se houver a saída de um componente (contingência simples) [6].

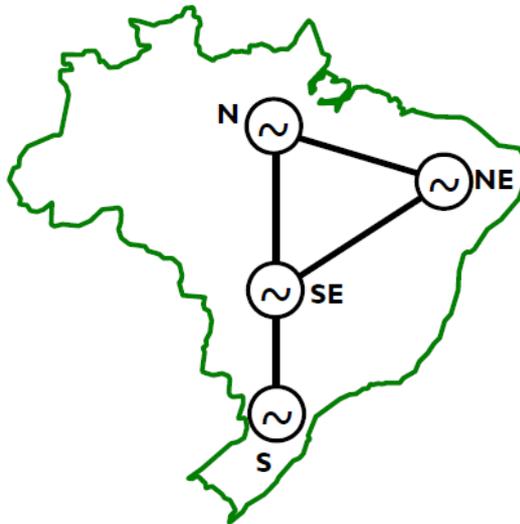


Figura 7: Interligação Geométrica Brasileira

2.3.1 Planejamento

O planejamento da expansão tem o objetivo de traçar metas e definir meios para que o sistema elétrico brasileiro evolua. Com este propósito são simuladas soluções físicas que visam garantir tanto o atendimento da demanda quanto a projeção do seu crescimento, além de prezar pela segurança e qualidade da rede ao menor custo global. Também é importante contemplar nestes estudos as perdas elétricas no sistema.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), criada em 2004 e vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), tem participação ímpar no planejamento energético do país, prestando serviços na área de estudos e pesquisas de energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras [12].

Especificamente na área de transmissão de energia, a EPE atua na elaboração de estudos para o planejamento dos Planos de Expansão da Geração e Transmissão de energia elétrica de curto, médio e longo prazo, no desenvolvimento de estudos de impacto social e de

viabilidade técnico-econômica e socioambiental para todos os empreendimentos no segmento. Além disso, participa de articulações e auxilia na integração energética com os outros países.

O ONS também atua no planejamento do setor elétrico elaborando, dentro do horizonte de estudos da operação, o Plano de Ampliações e Reforços (PAR), que visa garantir a qualidade e a segurança do SIN no horizonte de três anos [8].

2.3.2 O Modelo de Concessão

Com o intuito de definitivamente expandir a capacidade de transmissão brasileira, passou a ser adotado no país o modelo de contratação do serviço público de transmissão mediante outorga de concessão, onde se inclui a construção, montagem, operação e manutenção das instalações que compõem a rede básica do SIN, por um período de 30 (trinta) anos. Devido à flexibilização deste mercado, em conjunto com o crescimento do setor no país, esses empreendimentos atraíram investidores nacionais e internacionais, principalmente de países como Espanha, Itália, Colômbia, Portugal e, mais recentemente, a China.

O processo de licitação é precedido pela publicação de editais e relatórios técnicos, além do estabelecimento, pela Aneel, de custos de investimento baseados em valores estimados por empresas para a realização das obras, além dos custos de referência considerados pela própria agência.

Também conhecidos como leilões de transmissão, a licitação praticada na modalidade de concorrência foi inicialmente conduzida pela Aneel e atualmente encontra-se sob responsabilidade da BM&F BOVESPA. Podem participar do certame empresas nacionais ou estrangeiras, além de fundos de investimentos (isoladamente ou em consórcio) que apresentem garantias financeiras para realizar a proposta. Além disso, as empresas concorrentes devem atender, na fase de habilitação, as exigências de pré-qualificação jurídicas, técnicas, econômico-financeiras e de regularidade fiscal. Vale lembrar que os leilões

são realizados com inversão da ordem de fases, ou seja, somente após a sua realização e a divulgação das propostas vencedoras é que ocorre o juízo de habilitação [13].

Trata-se de um modelo híbrido: primeiramente é apresentada, em envelope lacrado, a proposta financeira de cada um dos participantes previamente divulgados e, caso a diferença entre a menor oferta e as outras propostas seja inferior a 5%, há a segunda fase descendente a viva voz. Vence a disputa aquele que apresentar o maior deságio (diferença entre o valor máximo fixado pelo edital e o lance do vencedor) em relação à máxima Receita Anual Permitida (RAP), estipulada pela Aneel.

A RAP é a receita que a transmissora tem direito pela prestação do serviço público de transmissão aos usuários da rede, a partir da entrada em operação comercial das instalações. Seu preço é atualizado anualmente pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) ou Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e revisado a cada cinco anos, nos termos do contrato de concessão [15].

Finalizado o processo de outorga, o contrato de concessão é assinado e a transmissora inicia o processo de implantação do empreendimento, de acordo com as Resoluções Autorizativas emitidas pela Aneel. O fluxograma exibido na figura 8 resume, em ordem cronológica, todo o processo de outorga de concessão mediante licitação.

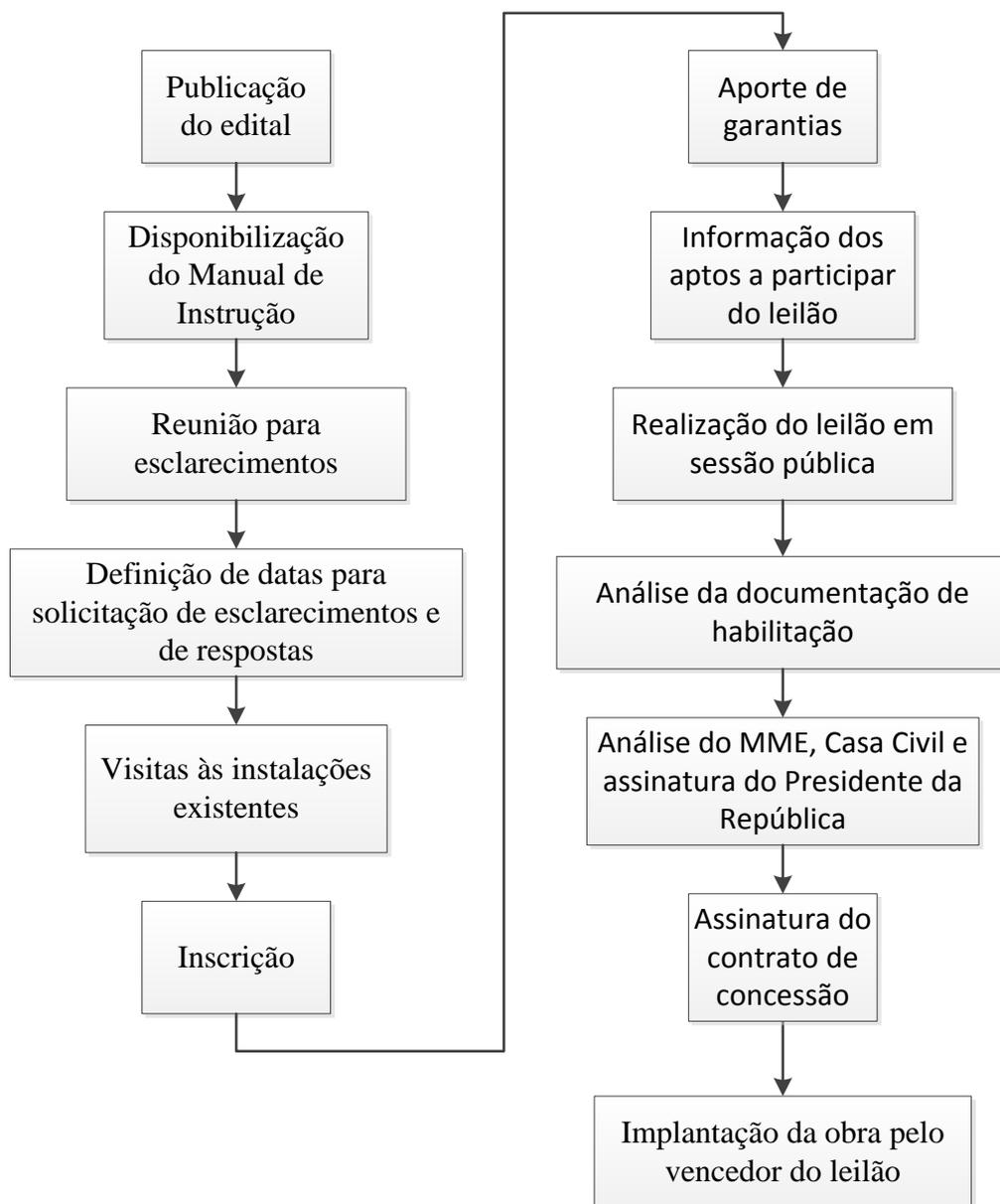


Figura 8: Fluxograma do processo de outorga de concessão mediante licitação

2.3.2.1 Relatórios Técnicos

Conforme citado no tópico anterior, para cada empreendimento licitado são elaborados editais específicos e relatórios complementares, fundamentais para subsidiar as análises efetuadas pela Aneel e Tribunal de Contas da União (TCU) nos processos de outorga de concessão mediante licitação.

Os objetivos principais dos estudos para concepção e detalhamento da expansão da transmissão são apresentados em quatro relatórios, que subsidiam os editais. A saber:

- R1 – Analisa a viabilidade técnico-econômica do empreendimento e tem o objetivo de demonstrar sua competitividade perante outras alternativas. Baseando-se em referências de custos modulares utilizadas no planejamento, estabelece as características básicas preliminares das instalações de transmissão, de acordo com os seguintes estudos:
 - Estudos de fluxo de potência;
 - Estudos de estabilidade de tensão em regime permanente;
 - Estudos de energização em regime permanente;
 - Estudos de rejeição de carga em regime permanente;
 - Estudos de estabilidade eletromecânica;
 - Estudos de curto-circuito;
 - Definição da compensação reativa série e em derivação;
 - Definição da utilização de religamento monopolar;
 - Análise dos aspectos socioambientais;
 - Análise econômica.
- R2 – Os estudos relacionados a esta fase detalham a alternativa de referência, provendo informações necessárias para estabelecer as características técnicas das novas instalações de transmissão e as adequações das instalações existentes da Rede Básica. Abrange aspectos como a definição do condutor econômico e seu desempenho, além de estudos específicos para linhas de transmissão e de transitórios eletromagnéticos. Também são realizados estudos de extinção de arco secundário, com base nos critérios estabelecidos pelos estudos de concepção, quando recomendado no relatório R1.

- R3 – Envolve a caracterização socioambiental do corredor de passagem idealizado nos estudos para a elaboração do relatório R1. Esta avaliação identifica uma diretriz preferencial que, se for realmente a mais viável tanto técnico-economicamente quanto ambientalmente, servirá de subsídio às seguintes etapas de licenciamento ambiental. Este relatório aborda os seguintes tópicos:
 - Caracterização do Meio Físico (climatologia, recursos hídricos e uso da água, geologia/geotecnia, recursos minerais, geomorfologia e solos/aptidão agrícola);
 - Caracterização do Meio Biótico (vegetação, uso do solo, fauna, ecossistemas especiais e áreas protegidas);
 - Caracterização do Meio Socioeconômico e Cultural (população e dinâmica demográfica, economia regional, infraestrutura viária e elétrica, estrutura fundiária e áreas de conflito, educação, saúde, saneamento, populações indígenas, patrimônio arqueológico e histórico-cultural);
 - Análise integrada das caracterizações realizadas para a identificação das áreas mais ou menos sensíveis à implantação do empreendimento do corredor;
 - Indicação da diretriz preferencial para a linha de transmissão e extensão aproximada;
 - Relatórios fotográficos.
- R4 – Este relatório deve conter as características e os requisitos técnicos básicos para que o novo empreendimento opere em conformidade com o previsto. Está mais voltado para a implantação de subestações, apesar de

definir aspectos importantes para a instalação de LTs, como os pontos de entrada e saída de linha nas SEs [14].

Depois de estabelecidos os critérios técnicos dos relatórios supracitados e, além disso, considerados os estudos da EPE e os Procedimentos de Rede, o edital é elaborado. Trata-se do documento mais importante, onde todas as regras da licitação devem estar presentes. Somam-se a ele os anexos técnicos do edital, que apresentam os requisitos para o dimensionamento e especificação dos equipamentos e instalações de transmissão.

É prudente lembrar que as transmissoras têm a liberdade de modificar (dentro das condições mínimas de projeto) certas recomendações dos relatórios técnicos (R`s), porém devem seguir à risca as regras do edital e de seus anexos técnicos.

2.3.3 Licenciamento Ambiental

De acordo com a Lei nº 6.938/81 que estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), o licenciamento ambiental tornou-se parte integrante da política nacional. Este ato tem por objetivo compatibilizar o desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico, essenciais à vida.

Sendo assim, todas as atividades e empreendimentos que utilizam recursos ambientais e que possam causar riscos efetivos ou potenciais de impactos ao meio ambiente precisam obter as devidas licenças do órgão ambiental competente. Desta forma, a instalação, ampliação, modificação ou operação de qualquer projeto, que de alguma forma interfira no meio ambiente, necessita de autorização.

Atualmente, há grandes discussões em torno deste tema, devido aos constantes atrasos na implantação de instalações de transmissão causadas pela demora na obtenção das licenças. Como as obras só podem ter início depois de expedidas todas as licenças necessárias, este

quadro faz com que grande parte dos empreendimentos não sejam entregues dentro do prazo, uma vez que, ao contrário dos leilões de geração onde os empreendimentos ofertados pela Aneel já possuem a licença prévia expedida, nos lotes de transmissão todo o processo de licenciamento é responsabilidade da concessionária.

Há grande burocratização no processo. Como a regulamentação ambiental é implementada de forma diferenciada de acordo com o estado e há inúmeros conflitos de competências, seja pelos órgãos licenciadores (IBAMA, no âmbito federal, e autarquias, ligadas às secretarias municipais e estaduais do meio ambiente) ou pelas crescentes intervenções do Ministério Público, o fato é que se deve chegar a um consenso sobre a melhor forma de desenvolver o país sem deixar de lado a preservação das riquezas naturais e históricas.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 237/97 há três tipos diferentes de licença ambiental no modelo brasileiro que devem ser concedidos à concessionária para que o empreendimento seja implantado:

- Licença Prévia (LP) – É concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade. Atesta a viabilidade ambiental, que inclui sua concepção e a aprovação da localização, estabelecendo todos os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas etapas de implementação.
- Licença de Instalação (LI) – Possibilita a instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados, englobando todas as medidas de controle ambiental e demais condicionantes.
- Licença de Operação (LO) – Autoriza a operação da atividade ou empreendimento, caso esteja em conformidade com o cumprimento das

licenças anteriores. Traz ainda medidas de controle ambiental e condicionantes definidos para a operação [16].

3 Estimativa de Orçamentos

A composição do cálculo orçamentário depende de duas premissas básicas: as quantidades e os custos unitários dos materiais e serviços especificados. Os itens são organizados e relacionados de acordo com o tipo de atividade realizada para alcançar, através de operações algébricas simples, custos parciais e posteriormente o custo total do empreendimento.

Todos os elementos que influenciam no valor final devem ser incluídos. Em linhas de transmissão, na fase de estimativa de custos, são analisadas diferentes possibilidades como alternativas econômicas de cabos condutores, variações viáveis de traçado, redução ou aumento no tempo de obra e/ou na quantidade de equipes, etc., pois há diversas opções aceitáveis sob o ponto de vista construtivo. O objetivo é aliar a melhor solução técnica à econômica para o projeto.

É importante considerar que o custo dos materiais de construção varia de acordo com a localização da obra, tornando-se maiores à medida que os canteiros de obra se distanciam das grandes fábricas. Sendo assim, deve ser definida com os fornecedores a responsabilidade desse serviço, que pode ser realizado de duas formas: CIF (Cost, Insurance and Freight) ou FOB (Free on Board). No primeiro os custos são arcados pelo fornecedor, que repassa o valor ao solicitante, e no segundo o comprador arca com os custos do transporte da carga até o local designado para a entrega. Estas siglas fazem parte dos Incoterms, que são as normas internacionais de comércio.

A tensão de transmissão também é determinante na elaboração de orçamentos de linhas de transmissão. Quanto maior a potência transmitida, maior o módulo da tensão e a

capacidade de transmitir corrente elétrica. Desta forma, aumenta o diâmetro da bitola do cabo condutor e/ou o número de subcondutores por fase, o que influencia diretamente no peso da estrutura e conseqüentemente no quantitativo das fundações. Também há, por norma, o alargamento da faixa de servidão que, dependendo da região, pode elevar o número de desapropriações ou da área de supressão vegetal. Todos esses fatores elevam o custo final do projeto.

A parcela inerente à mão-de-obra também é bastante relevante nos estudos de custo. Com o auxílio das Convenções e Acordos Coletivos de Trabalho, as concessionárias têm acesso aos valores dos salários base e às condições mínimas de trabalho exigidas, de acordo com a região da obra. Estes instrumentos de caráter normativo, firmados entre entidades sindicais ou entre estas e empresas, estabelecem as cláusulas de contrato para todas as categorias e descrevem, além do piso salarial, as condições de horas-extras, alimentação, transporte e todos os benefícios dos trabalhadores. Junto com o preço das máquinas, equipamentos e veículos utilizados na obra (geralmente computados por hora), estes valores somados formam o custo das equipes de trabalho.

Não menos importante, pelo fato de terem um impacto considerável no preço final, os impostos devem ser incididos sobre os materiais e serviços e os encargos sociais contabilizados. Pode-se afirmar que empresas com experiência em serviços de transmissão de energia levam certa vantagem na estimativa de custos, já que possuem bancos de dados com informações de preços e encargos atualizados.

3.1 Custos de Instalação

São divididos em custos diretos, indiretos e eventuais. O somatório destes três itens totaliza o custo final do empreendimento.

Os custos diretos são compostos pelo conjunto de despesas de itens como terrenos e servidões, canteiros de obra, aquisição e inspeção de materiais (estruturas, estais, fundações, cabos condutores, cabos para-raios, isoladores, aterramento, ferragens e acessórios), transporte, seguro, almoxarifado e a construção propriamente dita, onde se inclui a limpeza da faixa de servidão, serviços de topografia, geologia e sondagem, execução de fundações, montagem das estruturas, instalação de cabos e de aterramento, abertura de acessos, administração local, custos ambientais e estudos de engenharia.

Para realizar um cálculo mais preciso, é comum as concessionárias solicitarem frequentemente cotações dos materiais com diversos fornecedores, a fim de obter valores atualizados dos produtos, que variam constantemente e geram um grande impacto no preço final. A figura 9 estima, resumidamente, os custos dos componentes de uma LT de acordo com a parcela de materiais e serviços envolvidos em obras de linhas de transmissão de energia, além do peso que cada item possui no valor final do projeto.

RESUMO DOS CUSTOS DOS COMPONENTES DE UMA LT							
Tipos de LTs	Percentual do		Custo percentual dos materiais				
	Mat. (i)	Constr. (ii)	Cond.	Para-raios	Isolad.	Estrut.	Fund.
LTs entre 150 kV e 300 kV	65.0	35.0	31.0	3.5	9.3	36.0	19.7
LTs acima de 300 kV	62.6	37.4	34.1	3.9	6.9	36.4	18.7
LTs circuito simples	63.6	36.4	33.1	4.2	8.2	35.6	18.8
LTs circuito duplo	63.8	36.2	32.0	3.3	8.1	36.6	19.6
LTs com torres autoportantes	64.1	35.9	31.9	3.9	8.1	36.6	19.6
LTs com torres estaiadas	59.6	40.4	32.8	3.2	8.3	36.0	19.8
LT c/ 1 cond. por fase	64.4	35.6	32.2	4.2	8.5	36.3	18.8
LT c/ 2 cond. por fase	64.6	35.4	32.3	4.0	8.1	36.2	19.4
LT c/ 3 cond. por fase	60.8	39.2	35.1	3.7	7.0	40.3	13.8
LT c/ 4 cond. por fase	61.4	38.6	33.4	2.7	7.6	33.4	22.9
LT c/ cond. CAA 150 kV a	65.1	34.9	31.5	3.7	9.3	35.7	19.8
LT c/ cond. CAL 150 kV a	62.7	37.3	30.9	0.5	10.1	41.3	17.2
LT c/ cond. CAA acima 300 kV	64.3	35.3	34.1	4.0	7.2	35.3	19.3
LT c/ cond. CAL acima 300 kV	57.0	43.0	34.0	3.2	6.0	40.0	16.7
(i) Material / (ii) Construção							

Figura 9: Resumo dos custos dos componentes de uma LT (Cigré)

É possível observar que, independente das características técnicas da LT, o custo final do projeto é fundamentalmente dependente do custo dos materiais e serviços associados aos cabos condutores, estruturas metálicas e fundações utilizadas. Estes itens formam o tripé elementar para o cálculo orçamentário de projetos de linhas de transmissão de energia elétrica.

Todavia, para estimar o valor final mais próximo da realidade do projeto, é evidente que todos os itens de instalação, manutenção e operação das LTs devem ser considerados, além dos valores dos encargos financeiros anuais, taxas, despesas para obtenção de financiamentos e juros.

Os custos indiretos são relacionados ao total de despesas que não são alocadas diretamente na execução da obra [27] e compreendem todos os gastos referentes à administração central. Os valores assumidos por este item englobam toda a infraestrutura administrativa do projeto e deve cobrir todos os custos referentes aos departamentos que auxiliam a construção, que variam de acordo com o tamanho da empresa: quanto maior a instituição e seu quadro de funcionários, maior será o custo de indiretos.

Desta forma, todos os gastos com água e energia, comunicação, segurança patrimonial, materiais de higiene, limpeza, despesas postais e frete, tanto da sede da empresa quanto do canteiro de obras, devem ser cobertos. Além disso, salários, benefícios e encargos da equipe administrativa (diretores, gerentes, engenheiros, assistentes, vigias, etc.), que atuem na sede da empresa ou no campo também são computados, assim como seus respectivos desembolsos com aluguel de residência, transporte e seguro.

Além das inúmeras despesas já citadas, devem ser somados os custos de todos os possíveis imprevistos e riscos associados. Com isso, são contabilizadas as eventualidades que podem vir a ocorrer durante as obras como desvios de estradas, indenizações, realocação de linhas existentes, etc., para totalizar o preço de venda do empreendimento.

3.2 Produtividade

Tempo, junto com escopo e custo, forma o tripé que define a qualidade de um projeto, conforme mostra o triângulo das restrições, ilustrado na figura 10. Desta forma, é imprescindível nortear qual a expectativa que a contratante e a contratada têm para a entrega do empreendimento.



Figura 10: Escopo + Custo + Tempo = Qualidade

Em obras de linhas de transmissão ofertadas pela Aneel são definidas tanto as datas de assinatura do contrato quanto as datas em que as LTs devem entrar em operação. Sendo assim, as transmissoras devem se planejar para realizar não só a construção, mas também a mobilização, desmobilização e licenciamentos dentro deste prazo.

Para atingir todos os objetivos dentro do período determinado é fundamental esboçar cronogramas compatíveis com a quantidade de equipes de trabalho. A taxa de produção de um bem ou produto efetuado por um recurso (mão-de-obra ou equipamento) em um intervalo de tempo, de acordo com os fatores de produção utilizados é denominado produtividade [27].

Quanto maior a eficiência na transformação de energia (e tempo) em produto, maior a produtividade e, conseqüentemente, são geradas mais unidades de produto em um determinado espaço de tempo. É um dos indicadores mais eficazes para aferir o desempenho de uma atividade e impacta diretamente no custo final do empreendimento.

4 Aspectos Construtivos de Linhas de Transmissão

A construção de linhas de transmissão de energia elétrica é de suma importância para o desenvolvimento do Brasil, não somente porque transporta a energia necessária aos centros de carga, mas também porque oferece diversas possibilidades de emprego direto nos canteiros de obra, nas empresas transmissoras de energia e, indiretamente, nas indústrias e empresas fornecedoras de materiais, equipamentos e serviços.

Trata-se de uma atividade bastante complexa, que exige diversos estudos preliminares, além da execução de inúmeras atividades de campo, onde é necessária organização e planejamento para que a entrega do empreendimento seja realizada dentro do prazo e com a qualidade esperada.

Dentre as atividades desenvolvidas, são observados serviços jurídicos e de engenharia, obras civis e montagens eletromecânicas, além de gerenciamento e supervisão do projeto.

4.1 Definição da Diretriz

A elaboração dos documentos básicos para a implantação de uma LT prescinde de um minucioso levantamento de campo, a fim de propiciar o conhecimento do meio físico, biótico e antrópico que o corredor de estudo atravessa. Também é fundamental levantar dados meteorológicos, geotécnicos e históricos da região para definir a melhor alternativa.

Em visitas técnicas que antecedem os leilões de transmissão, ainda na fase de estudos, as transmissoras têm a possibilidade de mapear alternativas de traçado para a futura LT. Apesar de a Aneel sugerir a diretriz principal através do relatório R3, fornecendo inclusive as coordenadas dos vértices, é possível realizar modificações em busca do menor custo para o empreendimento.

Algumas premissas básicas são fundamentais para a escolha do melhor traçado. A principal delas é a definição da menor extensão total possível, reduzindo assim a quantidade

de torres e de materiais e serviços associados a elas. Além disso, devem ser evitadas deflexões fortes, pois quanto mais agudos os ângulos entre duas estruturas, maiores os esforços nas torres e fundações, obrigando assim a instalação de ancoragens mais robustas e caras.

No entanto, percursos retilíneos nem sempre são possíveis. Sob o aspecto ambiental, deve ser assegurado o distanciamento de Áreas de Proteção Permanente (APPs) e de regiões com fragmentos de vegetação nativa. A faixa de servidão, inclusive, precisa estar afastada de, no mínimo, 10 km de raio das reservas indígenas e aldeias quilombolas [30].

Na vistoria de campo devem ser analisados, ainda, os relevos favoráveis à alocação das estruturas, o que evita a utilização de torres com alturas elevadas ou vãos de comprimento reduzido. A escolha de solos apropriados à execução de fundações normais também é fundamental para a redução do preço final do projeto.

Outra verificação que deve ser realizada, a fim de evitar custos de obra elevados, é a existência de travessias no percurso da LT. Assim, o cruzamento dos cabos com grandes obstáculos naturais ou artificiais (como rios, rodovias, ferrovias, outras LTs, etc.) deve ser evitado sempre que possível, já que a existência destes exige a implantação de estruturas especiais com alturas elevadas e, conseqüentemente, maiores gastos.

Em contrapartida, há conveniência em implantar o corredor da linha em locais próximos a rodovias e ferrovias a fim de facilitar o apoio logístico e a chegada de materiais e equipamentos nos canteiros de obra, simplificando também o acesso dos trabalhadores à construção. É vantajoso, ainda, manter o paralelismo da faixa de servidão com linhas de transmissão existentes, pois seguramente já existem acessos construídos que podem ser aproveitados. A figura 11 exhibe a diretriz preferencial adotada para a LT 500 kV Miracema - Lajeado (CS) e LT 230 kV Lajeado - Palmas (CD), assim como as coordenadas geográficas dos vértices.

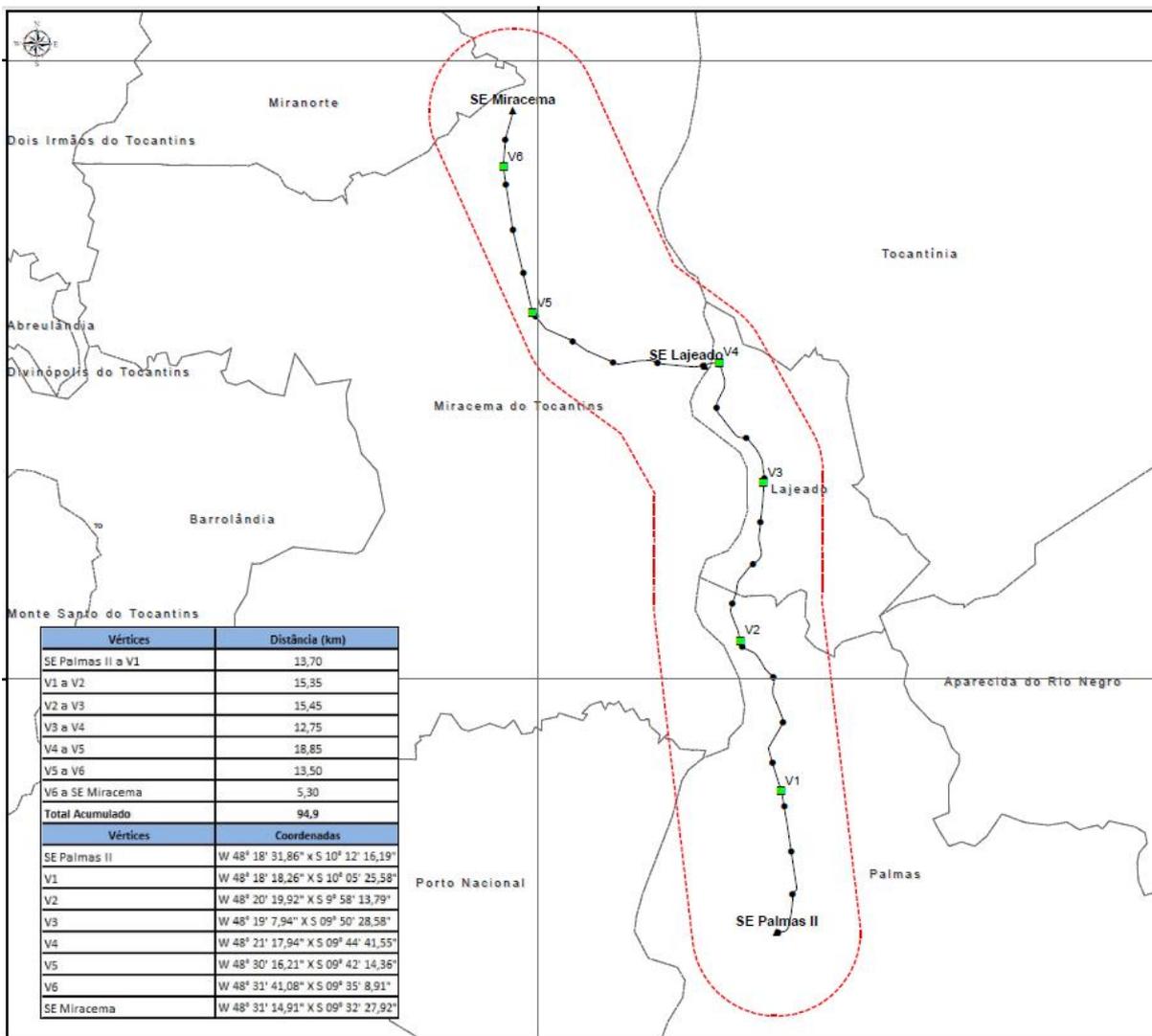


Figura 11: Diretriz preferencial e coordenadas geográficas (Aneel - 2015)

Nesse sentido, a escolha da melhor diretriz, além de propiciar a redução do custo final do empreendimento, favorece as concessionárias nas posteriores fases de construção e de operação do empreendimento.

Após esta etapa, são elaborados os desenhos de Planta e Perfil através do levantamento topográfico e são estimadas as coordenadas do traçado dentro deste corredor com os futuros pontos de deflexão do trecho. Porém, é importante destacar que se trata de uma estimativa, podendo ocorrer eventuais adequações na etapa de implantação, em função de possíveis adversidades não observáveis nesta fase.

4.2 Engenharia de Projeto

A Engenharia de Projeto é uma importante área responsável por implantar soluções tecnológicas nos diversos estágios do empreendimento ao estabelecer um conjunto de procedimentos e especificações que resultam em algo concreto ou em um conjunto de informações.

Desta forma, todo o conteúdo gerado por esses estudos técnicos torna-se um manual para o projeto, a partir do qual os parâmetros elétricos, mecânicos e ambientais são definidos e utilizados como base para a execução da obra. É dividido em projeto básico e projeto executivo e envolve uma série de atividades que visam obter desempenhos operacionais satisfatórios de acordo com normas, equações e procedimentos comprovadamente confiáveis.

Os projetistas responsáveis pela elaboração destes projetos devem possuir enorme familiaridade com os cálculos de todos os parâmetros envolvidos e, atualmente, também é importante que tenham conhecimento sobre as ferramentas computacionais e softwares que auxiliam e otimizam o trabalho.

4.2.1 Projeto Básico

O projeto básico consiste em um documento que revela todos os elementos técnicos necessários para caracterizar a obra ou serviço, com um nível de detalhamento suficiente para possibilitar o entendimento completo da solução proposta. Nesse sentido, o escopo do projeto, as características e quantidades de todos os materiais e equipamentos utilizados, os estudos de impacto ambiental e a declaração de responsabilidades devem estar presentes neste documento.

Tendo em vista a necessidade de determinar algumas premissas fundamentais à estruturação da obra, nos projetos básicos de linhas de transmissão devem constar a série de torres utilizada, a especificação completa dos cabos condutores e para-raios, tipos de

isoladores e todos os componentes empregados na construção, servindo de base para a compra dos materiais, para a elaboração dos estudos ambientais e para o desenvolvimento do Projeto Executivo [31].

A tabela 2 exibe os principais itens normalmente descritos, com riqueza de detalhes, em um projeto básico de linhas de transmissão.

Tabela 2: Composição do Projeto Básico

Normas Técnicas Utilizadas
Dados Climatológicos, Velocidades do Vento e Carregamentos devido ao Vento
Condutor e Para-Raios
Estudo Mecânico do Condutor e Para-Raios
Distâncias de Segurança para Alocação das Estruturas
Largura da Faixa de Servidão
Coordenação de Isolamento
Isoladores e Ferragens
Séries de Estruturas e Hipóteses de Carregamento
Programa dos Ensaios de Carregamento
Fundações Típicas
Sistema de Aterramento
Sistema de Proteção contra Vibrações Eólicas
Diretriz Selecionada
Documentação Técnica das Estruturas Existentes
Estudo das Travessias

4.2.2 Projeto Executivo

Consiste no serviço de engenharia responsável pelo detalhamento de todas as instruções necessárias à execução da obra. Neste documento são compilados os desenhos e especificações que serão utilizados na construção, juntamente com a descrição de montagem dos equipamentos.

Esta etapa inicia assim que os trabalhos de levantamento topográfico e os desenhos de planta e perfil são concluídos. Assim, o gabarito de plotação e a posterior alocação das estruturas no perfil podem ser preparados. Neste momento, com a família de estruturas e

cabos (condutores e para-raios) já definidos, pode ser realizada a plotação sobre o desenho topográfico na escala adequada com o auxílio do software PLS CADD, como ilustra a figura 12.

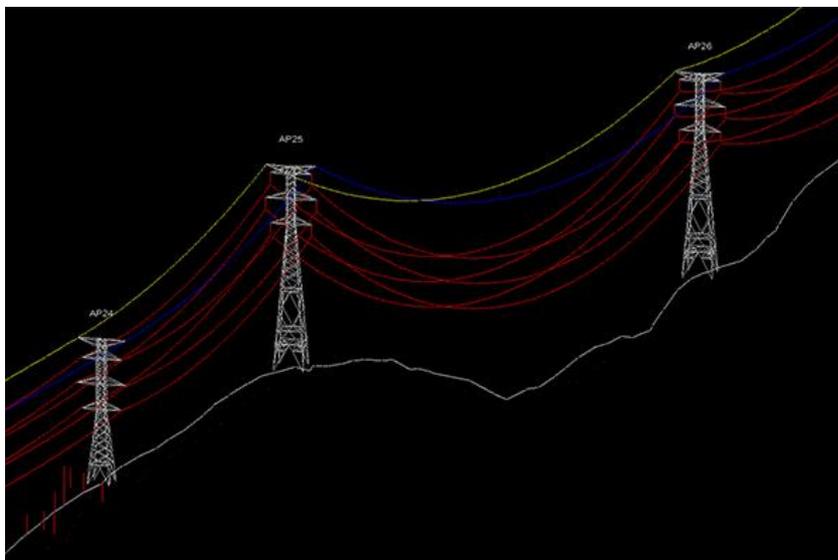


Figura 12: Plotação de torres com o PLS CADD

Verifica-se que a flecha visualizada na figura corresponde ao estado final de deformação do cabo condutor, à temperatura máxima, de modo que a distância cabo-solo seja a menor possível. Quando esta temperatura mais elevada dos cabos é somada ao efeito térmico das correntes elétricas, tem-se a condição de flecha máxima e é através dessa condição que a altura das estruturas é determinada.

Além da observação da condição mencionada acima, os seguintes aspectos também devem ser avaliados para que as plotações preliminar e final sejam definidas, respeitando as normas vigentes:

- A condição EDS (Every Day Stress) deve ser determinada considerando uma percentagem da carga de ruptura do cabo (que varia entre 16% e 20% de acordo com o tipo de cabo estudado) e a temperatura média da região. Trata-se

do estado de tração que o cabo experimenta durante o maior período de sua vida útil [32].

- Quando submetidos por longos períodos às condições de EDS, o cabo sofre um alongamento permanente denominado fluência (ou creep), que deve ser acrescido aos alongamentos originados por acréscimo de carga e variação de temperatura. Esta condição é devida à acomodação da cordoalha ou à deformação plástica transversal do cabo e afeta diretamente nos cálculos de tração e flecha [19].
- Na condição de máximo carregamento há a atuação de ventos de máxima intensidade na LT, podendo atingir 50% da carga de ruptura, à temperatura local.
- Quando a LT está sujeita a menor temperatura absoluta e não há ocorrência de ventos, a condição de flecha mínima deve ser considerada, podendo atingir até 33% da carga de ruptura.
- A condição de máximo deslocamento dos cabos e das cadeias de isolamento também faz parte das condições básicas para a plotação das torres e sua pior circunstância é quando a temperatura do vento é mínima.

Seguindo os critérios de tensão máxima que o condutor pode ficar sujeito, constrói-se, então, o “gabarito” do cabo, que é a reprodução das curvas do cabo nas condições de projeto.

A figura 13 exibe três curvas para um mesmo tipo de cabo:

1. Curva de flecha mínima, correspondente à temperatura mínima de uma região;
2. Curva de linha de terra, que corresponde à altura do cabo ao solo em condições de temperatura média;
3. Curva de flecha máxima, correspondente à temperatura máxima de projeto.

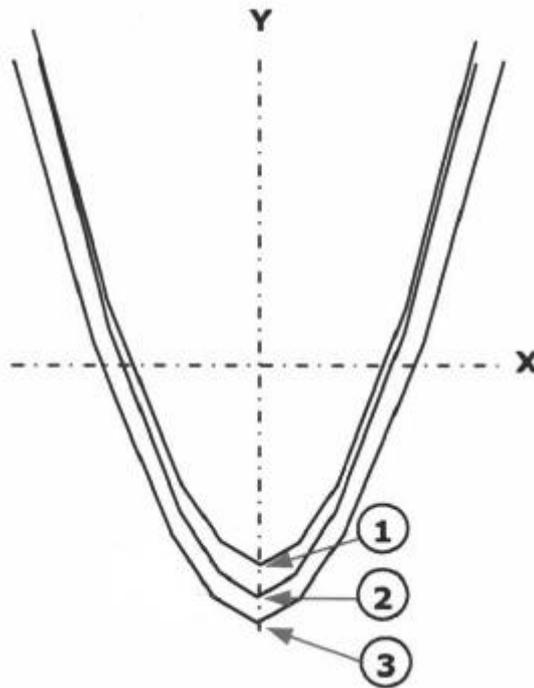


Figura 13: Condições de flecha (Furnas – 2012)

Considerando a condição de flecha máxima, são definidas as torres a serem plotadas. Deste modo, e sempre que viável tecnicamente, escolhe-se aquelas que possuem as menores alturas úteis possíveis, ou seja, as que apresentam as menores distâncias entre o ponto de suspensão do cabo condutor e o solo. A escolha por torres estaiadas geralmente é priorizada, devido aos menores pesos e conseqüente preço reduzido.

O efeito de arrancamento (ou cálculo da capacidade de carga à tração) também deve ser verificado. Tanto esta possibilidade quanto incompatibilidades da torre escolhida em relação aos vãos de vento e de peso são analisadas facilmente pelo software PLS-CADD, que alerta para incongruências na alocação caso a estrutura determinada não seja compatível com o terreno, com o vento ou com o carregamento atribuído ao peso do cabo. O software otimiza a distribuição das estruturas, procurando a melhor uniformidade de vãos possível, de acordo com as condições do projeto.

Algumas definições que facilitam a compreensão acerca dos vãos de vento e vão de peso são explicitadas na figura 14 abaixo e nas equações e definições subsequentes:

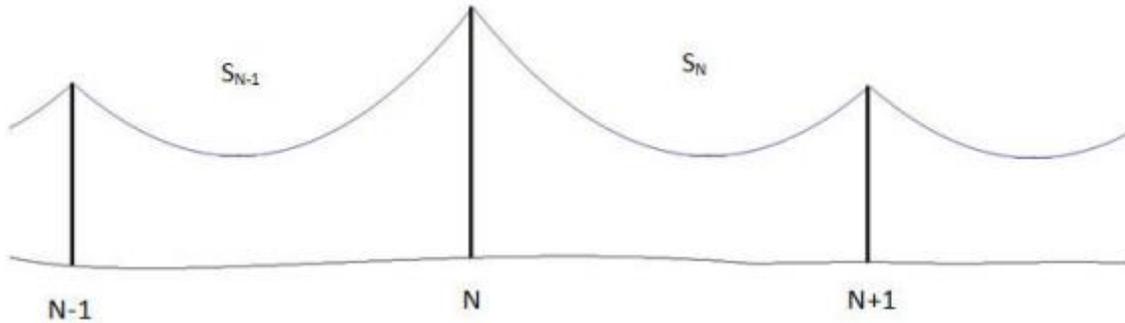


Figura 14: Vão de vento e Vão de peso [33]

$$V_V = \frac{S_{N-1} + S_N}{2}$$

$$V_P \cong L_{N-1} + L_N$$

Como V_{N-1} e V_N são os comprimentos dos vãos entre as torres N-1 e N e entre as torres N e N+1, respectivamente, a média aritmética dos vãos adjacentes é denominada de vão de vento (V_V). A soma do comprimento do cabo, desde a estrutura até o ponto mais baixo dos vãos adjacentes à estrutura, é intitulada de vão de peso (V_P).

Outro item importante no projeto executivo, que demanda bastante atenção devido à elevação do custo e às potenciais implicações técnicas, é o projeto de travessias. Nele constam informações como: ângulo de cruzamento, altura dos cabos ao solo e outras particularidades, de acordo com as normas específicas. Caso sejam verificadas travessias sobre LT's ou outros obstáculos como rodovias, ferrovias, edificações, etc., as licenças devem ser previamente solicitadas ao órgão responsável.

Além dos itens citados, são enviados à obra os projetos executivos dos diferentes tipos de fundação normais e especiais, desenhos de construção e montagem com especificidades de diversas ferragens, acessórios, itens de aterramento e de montagem, além das especificações, instruções e a lista de construção do projeto. Dentre estes, a lista de construção talvez seja o documento de maior relevância para o engenheiro responsável pela obra da LT, pois reúne dados como os números das torres, tipos, alturas, comprimento das pernas e extensões, comprimento dos vãos, tipos de fundação, arranjo das cadeias, etc., sendo todas essas informações necessárias para que os indispensáveis cuidados sejam tomados e as tolerâncias da construção sejam respeitadas. Um modelo de lista de construção, utilizado em um seccionamento da LT 230 kV Açu II – Açu III, é mostrado no Apêndice A.

Finalizando as entregas importantes nesta etapa, elabora-se a Tabela de Flechas e a Tabela Off-set. Na primeira os cálculos são realizados após a distribuição das estruturas sobre a planta e perfil e é considerado o vão equivalente (ou vão regulador) do trecho, ou seja, o vão fictício situado em um trecho entre duas ancoragens consecutivas. Têm-se então uma tabela de flechas e tensões para cada tipo de cabo e para cada condição específica de projeto. A segunda tabela é útil quando o traçado da LT atravessa regiões onde há ocorrência de aclives e declives acentuados no terreno, fazendo com que os cabos acumulem-se nos pontos mais baixos e resultando em flechas maiores ou menores, de acordo com o tamanho do vão. A tabela de off-set, nestes casos, auxilia no processo de grampeamento dos cabos.

4.3 Administração local e Canteiro de Obra

Os canteiros de obras são as áreas de trabalho onde são desenvolvidas as operações de apoio e logística do projeto. Trata-se de instalações fixas e temporárias que absorvem uma parcela considerável do custo total do empreendimento.

Dependendo da extensão da linha de transmissão, pode ser realizada uma fragmentação do traçado por trechos de linha (ou tramos) e, neste caso, é estipulado um canteiro de obra para cada tramo previamente delimitado, cada um com gerenciamento próprio e independente. Normalmente é definido, em local estratégico, um canteiro principal que atue dentro de um raio de 50 km, porém no caso de trechos menores podem ser utilizados canteiros de obra auxiliares com infraestrutura compacta, que possuem efetivo menor de empregados e custo reduzido, mas que são aptos a atender a demanda da construção.

De acordo com a norma NR 18, os canteiros de obra devem dispor de:

- Instalações elétricas;
- Instalações sanitárias;
- Vestiário;
- Alojamento;
- Local de refeições;
- Cozinha, quando houver preparo de refeições;
- Lavanderia;
- Áreas de vivência e de lazer;
- Ambulatório, quando se tratar de frentes de trabalho com 50 (cinquenta) ou mais trabalhadores;
- Sinalização de Segurança. [20]

Antes da adequação e montagem do canteiro deve ser calculado o quantitativo de toda a equipe que fará uso das instalações (mão-de-obra, materiais e equipamentos), tomando como base a previsão do efetivo constante e no pico de obra. De posse desses dados, são determinadas as edificações mínimas necessárias durante todo o período de construção,

período este definido por um cronograma, onde é estimado o tempo necessário para a mobilização total do canteiro.

O efetivo deve atender às necessidades operacionais, administrativas, bem como de segurança e higiene do trabalho. Assim, todos os custos relativos à EPI, ferramental, miúdo, refeições e encargos sociais devem ter seus cálculos discriminados. Também deve ser incluída uma verba adicional para a aquisição de vestimentas e realização de treinamentos de normas específicas, como NR-33 (Segurança e Saúde no Trabalho em Espaços Confinados), NR-35 (Trabalho em Altura) e NR-10 (Instalações e Serviços em Eletricidade), visando atender aos funcionários que fazem jus ao adicional de periculosidade.

É necessário que o custo do transporte de todo o material previsto para a execução do empreendimento esteja presente no orçamento do projeto, inclusive os valores de carga e descarga. Além disso, deve ser computado o custo dos equipamentos e veículos necessários à operação do canteiro e ao deslocamento da mão-de-obra, assim como as despesas extras com móveis e utensílios, comunicação e informática, material de escritório e limpeza.

Soma-se a isso o preço inerente à confecção de placas da obra e à elaboração de toda documentação necessária para regularização da construção. Os documentos que merecem maior atenção são:

- Anotação de Responsabilidade Técnica (ART);
- Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional (PCMSO);
- Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA);
- Programa de Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção Civil (PCMAT);

Com o término da construção é realizada a desmobilização do canteiro de obras, onde são previstas todas as demolições e limpezas no terreno, tal como o transporte de todos os

materiais e equipamentos remanescentes que possam ser devolvidos ou reaproveitados em outros locais.

4.4 Obras Civas

A construção de LTs é uma tarefa multidisciplinar, onde engenheiros e demais trabalhadores de distintas áreas participam desde a fase de concepção do projeto até a conclusão da obra.

Desta forma, engenheiros civis são peças fundamentais para que as instalações sejam implantadas, pois atuam diretamente no cálculo de todas as cargas possíveis de serem suportadas pelas estruturas, participam de estudos que detalham as características geotécnicas do terreno e elaboram os projetos de fundação, dentre outras atividades. Não menos importantes, os operários da construção civil executam serviços de campo como: sondagem e resistividade, marcação de cavas, fabricação de blocos pré-moldados, escavações, concretagens, desformas e reaterros, primordiais para que as linhas de transmissão possam transmitir energia com confiabilidade em relação às estruturas que as sustentam.

Sendo assim, o detalhamento das atividades de construção civil que empregam grande parte da mão-de-obra da construção, além de consumir uma parcela considerável do tempo e investimento do projeto, é uma tarefa obrigatória.

4.4.1 Fundações

Toda obra de engenharia assentada diretamente no solo necessita de estruturas de transição que resistam adequadamente às tensões que são causadas pelos esforços solicitantes. O suporte que transfere as cargas das estruturas ao terreno é denominado fundação.

Para um correto dimensionamento das fundações utilizadas em um projeto é necessário compreender as características geotécnicas do terreno. É essencial, por exemplo,

que o solo seja resistente e rígido o suficiente para que não sofra qualquer tipo de ruptura nem apresente deformações exageradas ou diferenciais. Neste cálculo são consideradas todas as cargas que possam vir a atuar na estrutura e o objetivo é escolher o modelo de fundação mais adequado ao tipo de terreno estudado.

As fundações podem ser executadas externamente à superfície, em camadas superficiais ou em camadas mais profundas do solo, sendo, portanto, classificadas como rasas ou profundas.

A fundação rasa, também denominada superficial ou direta, é utilizada quando a carga é transmitida ao terreno predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base da fundação e possui uma profundidade de assentamento, em relação ao terreno adjacente, inferior ao dobro da sua menor dimensão em planta [23]. As principais fundações rasas empregadas em LTs são: grelhas, sapatas e blocos.

Grelhas são fundações superficiais constituídas de perfis metálicos, aplicadas em terrenos secos. A rapidez de execução na escavação, montagem e reaterro e a facilidade de transporte, principalmente em locais de difícil acesso para o uso do concreto, são algumas vantagens deste tipo de fundação. Em contrapartida, a possibilidade de corrosão é uma desvantagem considerável. Já as sapatas são alternativas viáveis quando as fundações estão situadas em níveis próximos à superfície do terreno, sendo geralmente utilizadas em solos de boa qualidade. São constituídas por uma placa de concreto armado (geralmente quadrada) encimada por um pilar também de concreto armado, conforme mostra a figura 15, e sua instalação exige serviços de escavação total e posterior reaterro. Os blocos também são de concreto armado e se aplicam em terrenos de difícil escavação manual, cuja resistência ideal encontra-se a pequenas profundidades. Um caso particular para o uso de blocos é quando o solo é predominantemente rochoso e não escavável manualmente, sendo a construção de blocos simples insuficiente para suportar o arrancamento. Neste caso são utilizados blocos

ancorados em rocha, que possuem excelente custo-benefício e cuja instalação é bastante simplificada com o auxílio de perfuratrizes ou simples britadeiras [24].

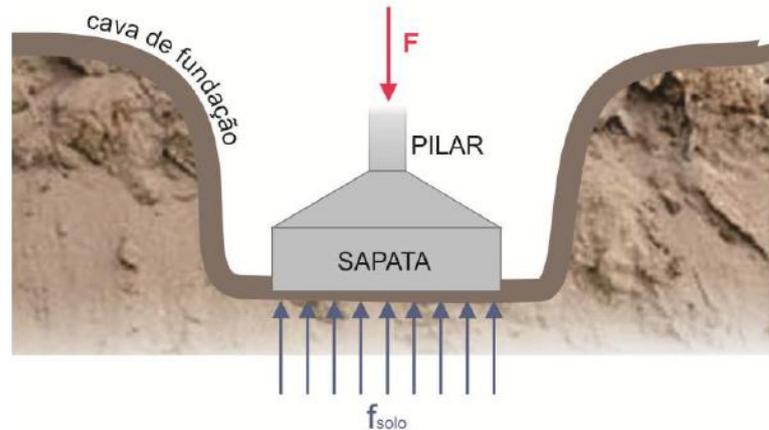


Figura 15: Fundação tipo sapata

As fundações profundas podem transmitir as cargas ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas. Têm como característica elementar o assentamento em profundidades superiores ao dobro de sua menor dimensão em planta. Nesta categoria destacam-se, em obras de linhas de transmissão, o tubulão e as estacas metálicas.

Tubulão é uma fundação profunda de concreto armado, em geral sob a forma cilíndrica e escavada a céu aberto, que pode ser instalado com ou sem base alargada, tanto manualmente quanto mecanicamente. O solo para esta fundação deve ter o mínimo de coesão a fim de possibilitar a escavação sem necessidade de escoramento, com profundidade entre 3 e 10 metros. Por sua vez, as estacas metálicas são constituídas por peças de aço laminado ou soldado em formas de “T” ou “H”. Podem ser cravadas em quase todos os tipos de terreno, inclusive em solos de baixa qualidade ou com presença de água, suportando grande capacidade de carga e grandes profundidades, porém a principal desvantagem deste tipo de

fundação é seu custo elevado de instalação. As fundações profundas supracitadas são ilustradas na figura 16.



Figura 16: Tubulão e Estacas metálicas

Desta forma, infere-se que o estudo do traçado, as atividades de sondagem e o cálculo de resistividade do terreno são as bases de definição das fundações das linhas de transmissão, que devem ser dimensionadas para resistir a distintas hipóteses de carga, que podem ser classificadas em:

- Verticais - quando as solicitações são devidas ao peso próprio da estrutura, dos cabos condutores e para-raios, cadeias de isoladores e ferragens, ou de sobrecargas acidentais. Também podem ser oriundas da montagem e manutenção dos equipamentos eletromecânicos.
- Horizontais - quando as solicitações são provenientes do tensionamento dos condutores, da variação de tensões devido à variação de temperatura, ação de ventos, sobrecarga de montagem, rompimento de condutores, etc.
- Arrancamento – quando as solicitações atuam na vertical, no sentido de baixo para cima, e estão presentes na ancoragem de estais e em estruturas no fundo de depressões dos terrenos, por exemplo.

É importante destacar que os esforços de compressão sempre são maiores (ou da mesma ordem de grandeza) que os de tração, a menos que se esteja diante de uma hipótese fortíssima de arrancamento, em que os esforços dos cabos para cima superem os pesos.

Por todo o exposto, conclui-se que os estudos e projetos de fundação devem ser realizados com extremo cuidado e devem garantir, através de cálculos e ensaios, confiabilidade. Tal preocupação se justifica pelo fato de ser muito mais demorada, trabalhosa e custosa a recuperação de uma estrutura de linha de transmissão que apresente danos na fundação do que simplesmente remontar uma estrutura metálica danificada.

4.4.2 Abertura de Acessos

Representa todos os serviços envolvidos na abertura de estradas e caminhos de acesso para cada uma das torres de transmissão. O objetivo é viabilizar vias para transporte de materiais, mão-de-obra e de inúmeros equipamentos pesados, necessários à construção da LT.

Os acessos são construídos somente quando necessário, pois em determinadas áreas já existem estradas que facilitam a execução das obras. Já em locais onde o acesso é precário ou inexistente, é indispensável construir caminhos que interliguem as áreas de alocação das estruturas às estradas mais próximas e, em alguns casos, a realização de algumas obras de apoio como pontes, mata-burros, etc. é inevitável. Geralmente as estradas de acesso são construídas com largura de quatro metros, suficiente para permitir a passagem de caminhões e equipamentos de grande porte.

Sendo assim, se trata de uma tarefa que exige cuidados especiais com o meio ambiente, de modo que a mitigação de possíveis danos torna-se uma obrigação da concessionária do empreendimento. Além disso, a transmissora deve adotar medidas de proteção, preservação e segurança de encostas, torres e da própria estrada para garantir a

segurança do local. Para isso são utilizados dispositivos de drenagem, recomposição da camada vegetal, contenções e outros artifícios.

Quando o caminho até a área da torre é inviabilizado por dificuldades técnicas, fundiárias ou restrições ambientais que impossibilitam a abertura de estradas podem ser utilizados alguns transportes alternativos como mulas, balsas, teleféricos ou helicópteros para possibilitar a construção. Também é importante evitar quaisquer transtornos aos proprietários de terras próximas.

4.4.3 Limpeza e Faixa de Servidão

A faixa de servidão é uma faixa de terreno que acompanha o traçado da linha de transmissão, onde estão contidas a área da torre e o pátio de lançamento de cabos da LT.

A largura da faixa de segurança da linha é determinada com base em três parâmetros: efeitos elétricos, balanço dos cabos devido à ação do vento e posicionamento das fundações de suportes e estais. Respeitando os critérios de segurança, deve ser prevista uma faixa limpa e com largura suficiente que permita a implantação, operação e manutenção da linha.

No caso de uma LT única, a largura mínima da faixa de segurança é determinada pela seguinte equação: [11]

$$L = 2 (b + (f + l)\text{sen}\beta + d)$$

Onde:

L = Largura da faixa de servidão [m];

b = Distância da linha de centro da estrutura predominante ao ponto de fixação das fases [m];

f = Flecha do cabo condutor para vão típico [m];

l = Comprimento da cadeia de isoladores e ferragens [m];

β = Ângulo de balanço do condutor e da cadeia;

d = Distância, em metros, igual a $V_{\text{máx}}/150$ e $V_{\text{máx}}$ é a tensão máxima de operação da LT [kV].

Devem ser analisadas também algumas normas de segurança necessárias para implantar uma LT em determinada região. Deste modo, a largura da faixa de passagem deve respeitar critérios que estipulam distâncias seguras em relação ao campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência presentes nas linhas de transmissão de energia elétrica. Normalmente, para linhas de 230 kV são utilizadas faixas de servidão com largura de 40 metros, enquanto para linhas de 345 ou 500 kV considera-se 60 metros de faixa, conforme ilustra a figura 17.

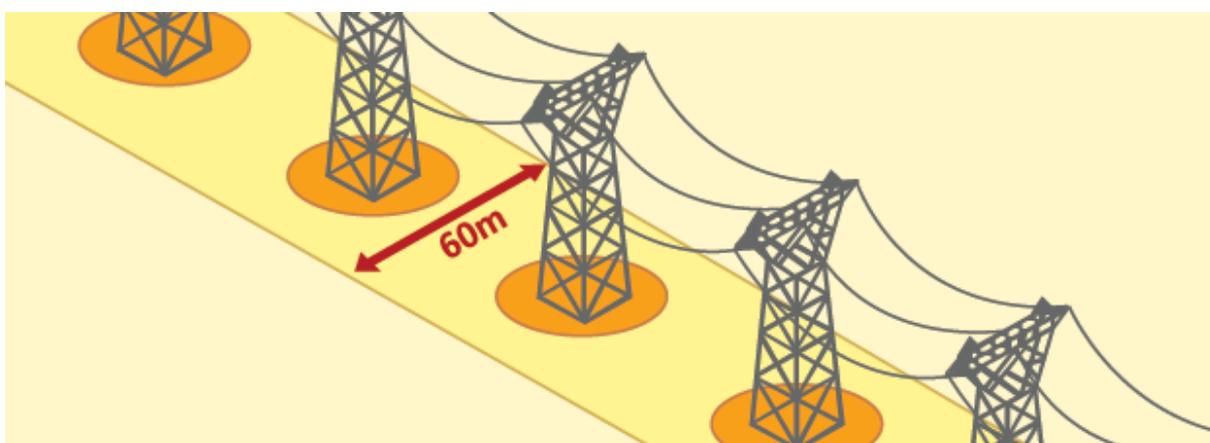


Figura 17: Largura da faixa de servidão para LTs de 500 kV

Não menos importante, deve haver uma atenção especial aos aspectos ambientais inerentes à instalação da faixa de servidão, de modo que a supressão vegetal neste espaço seja reduzida ao mínimo estritamente necessário para assegurar condições satisfatórias de construção, operação e manutenção da linha. Também é oportuno que seja efetuado, sempre que possível, o corte seletivo do revestimento vegetal presente na área, pois dessa forma o corte integral da região é reduzido. Em áreas onde a preservação é permanente, por exemplo, só podem ser abertas clareiras que permitam a alocação e montagem das estruturas.

O custo da atividade de implantação da faixa de passagem e a consequente limpeza da área é bastante elevado e muitas vezes difícil de ser mensurado, sendo comum a existência de contratos de compensação ambiental entre a concessionária e o órgão ambiental responsável,

com o objetivo de mitigar o impacto ambiental na região explorada. Em geral, procura-se cortar o mínimo possível de árvores, retirando-as apenas numa extensão de três metros no eixo da LT, que é para a passagem do cabo piloto no lançamento dos cabos. Porém, em regiões onde existem culturas em que são processadas queimadas periodicamente, as árvores ou plantações devem ser erradicadas para não comprometer a segurança da energia transmitida pela LT. Árvores de altura elevada e crescimento rápido, como o eucalipto, também devem ser erradicadas para que não haja contato com os cabos condutores.

Após a montagem da LT é permitida a utilização do terreno da faixa para plantio, desde que seja mantida uma distância segura entre o topo das culturas e o condutor na condição de flecha máxima, sem vento.

4.4.4 Aterramento

O sistema de aterramento é composto por cabos contrapesos e impedâncias instaladas tanto nos pés das torres de ancoragem quanto nas bases do mastro central e estais de estruturas estaiadas. São componentes essenciais ao desempenho de um circuito de transmissão, protegendo o sistema de descargas atmosféricas, indução de corrente de LTs próximas e acidentes como ruptura da cadeia de isoladores ou rompimento do cabo condutor. Tal sistema consiste em um mecanismo que faz escoar o excesso de cargas elétricas oriundas de perturbações, sendo instalado após a abertura das cavas e antes da montagem das torres.

Um sistema de aterramento ineficiente pode causar distúrbios indesejáveis à transmissão de energia, como redução da eficiência da LT, formação de arcos elétricos entre a estrutura e o condutor ou, até mesmo, resultar no desligamento de toda a rede conectada ao ponto de defeito.

O cabo contrapeso é constituído por um fio, cabo de aço ou fita metálica, enterrado longitudinalmente ao longo da faixa de servidão em uma profundidade determinada pelo

projetista (normalmente entre 50 e 90 cm), no alinhamento das torres e acoplados às mesmas por conectores (conector contrapeso-torre, conector entre contrapesos e conector contrapeso-estai), para em seguida ser reaterrado e compactado convenientemente, conforme ilustra a figura 18. Para efeito de composição de custos, é estimada uma média de 400 metros de cabo contrapeso por torre, mas o comprimento real do cabo por estrutura é fornecido na lista de construção, que também indica o esquema adotado.

O estudo do arranjo pelo qual o cabo contrapeso será instalado no solo, assim como o seu comprimento, depende de parâmetros como a resistência de aterramento requerida para a linha e a resistividade do solo. O primeiro leva em consideração as condições de segurança das pessoas e animais nas proximidades das estruturas, de modo que não cause danos relacionados a choques elétricos em virtude de correntes de descarga ou defeitos no próprio sistema, enquanto o segundo é uma constante medida e determinada nos serviços preliminares.



Figura 18: Instalação de cabo contrapeso para aterramento

Além do aterramento correto e confiável das estruturas, o projetista deve assegurar que todas as cercas metálicas situadas nas proximidades do corredor da linha de transmissão sejam aterradas de acordo com o estipulado pela norma e conforme ilustrado na figura 19. O objetivo também é manter a segurança de pessoas e animais que possam tocá-las, já que as cercas que cruzam ou atravessam LTs podem ser energizadas pelo efeito de indução eletromagnética. Através do aterramento, qualquer corrente elétrica induzida é descarregada para a terra, evitando a propagação.

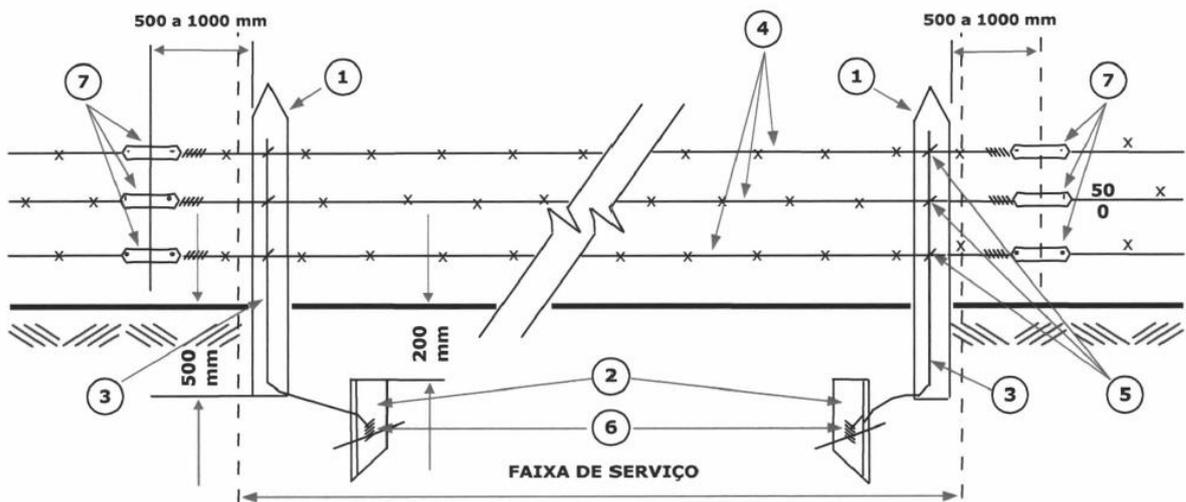


Figura 19: Aterramento de cercas metálicas (Furnas – 2012)

4.5 Estruturas

São componentes básicos da rede de transmissão fabricados em material metálico (aço ou alumínio), madeira ou concreto armado e que possuem duas funções de extrema importância para o sistema: sustentar fisicamente o circuito elétrico e manter um espaçamento ideal entre cabos condutores e para-raios. Junto com os cabos e fundações, as estruturas formam o que tem de mais custoso na construção de linhas aéreas de transmissão.

As estruturas metálicas de aço treliçadas são as mais utilizadas na construção de linhas de extra-alta tensão, principalmente devido a sua grande flexibilidade, já que podem variar altura e peso de acordo com a necessidade do projeto, além de oferecerem aos condutores a possibilidade de se organizarem na disposição vertical, horizontal ou triangular, tanto em circuito simples quanto em circuito duplo. O alumínio, apesar de mais leve e menos corrosivo que o aço, tem um custo de fabricação ainda elevado, prejudicando o seu uso em grande escala. Por sua vez, tanto a madeira quanto o concreto armado têm aplicações mais habituais em linhas de distribuição de energia, devido a limitações elétricas e físicas como peso e comprimento.

Há diversas formas de classificar as estruturas das linhas de transmissão. Quando a transferência dos esforços das torres para o solo é realizada diretamente através das fundações de pé da torre, elas são classificadas como autoportantes. Se os esforços são divididos entre as cargas de tração e de compressão, transmitidas ao terreno através das fundações dos cabos de estais e mastros, respectivamente, são intituladas estaiadas.

Também podem ser classificadas pelo tipo de sustentação que oferecem aos cabos condutores, sendo, portanto, de suspensão quando a finalidade é basicamente dar apoio aos cabos condutores, suportando esforços de tração basicamente no sentido vertical e mantendo-os afastados do solo e entre si. As ancoragens, por sua vez, caracterizam-se por resistirem a esforços maiores de tração no sentido horizontal, além de suportarem maiores deflexões e evitarem uma indesejável queda sucessiva dos suportes em efeito cascata. Por serem mais robustas, as torres de ancoragens possuem pesos maiores que as suspensões, para uma mesma altura.

As torres autoportantes são observadas tanto em estruturas de ancoragem quanto de suspensão. São normalmente instaladas em locais acidentados, de difícil acesso, em praças de montagem com largura restrita ou em locais pantanosos. Em torres terminais (ou fim de linha)

há a obrigatoriedade de empregar estruturas de ancoragem, assim como em vértices com deflexões acentuadas. As estaiadas, por sua vez, são utilizadas exclusivamente em suspensões, geralmente em trechos com terreno plano e pequenos ângulos. Seu uso tem sido bastante intensificado e recomendado sempre que possível tecnicamente, já que sua formação com um mastro central e quatro estais torna-se mais leve e, portanto, mais econômica que as autoportantes. Apesar de existirem inúmeras configurações de silhuetas de estruturas autoportantes e estaiadas, a figura 20 ilustra dois modelos possíveis, com a respectiva descrição dos componentes das torres.

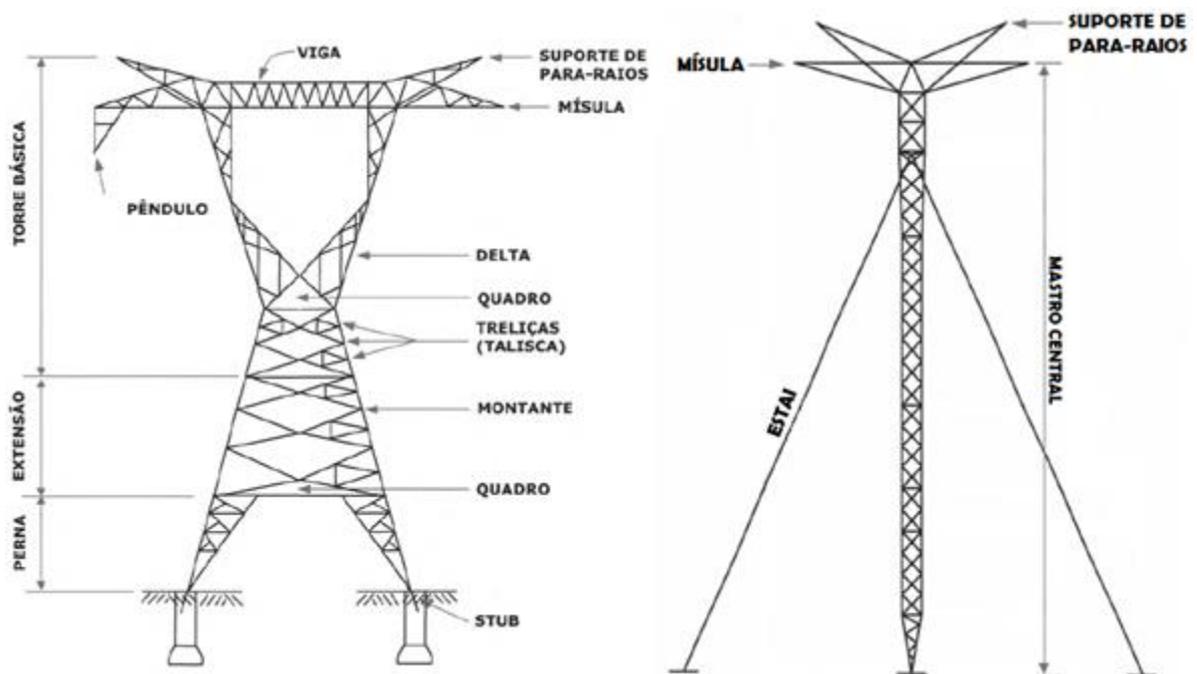


Figura 20: Estrutura autoportante e estaiada (Furnas – 2012)

Além das classificações supracitadas, deve ser considerada no projeto de construção de LTs a inserção de estruturas de transposição. Estas estruturas autoportantes com silhuetas diferentes das demais são utilizadas quando há a necessidade de inverter as posições das fases de um circuito. Tal imposição é consequência da configuração assimétrica das fases da LT, que origina indutâncias diferentes em cada fase. Como não existe simetria elétrica entre as mesmas, mesmo com as cargas equilibradas, as quedas de tensão nas três fases são

desequilibradas e essa inconveniência pode ser solucionada alternando as posições entre os condutores em intervalos regulares ao longo da linha, como exhibe a figura 21.

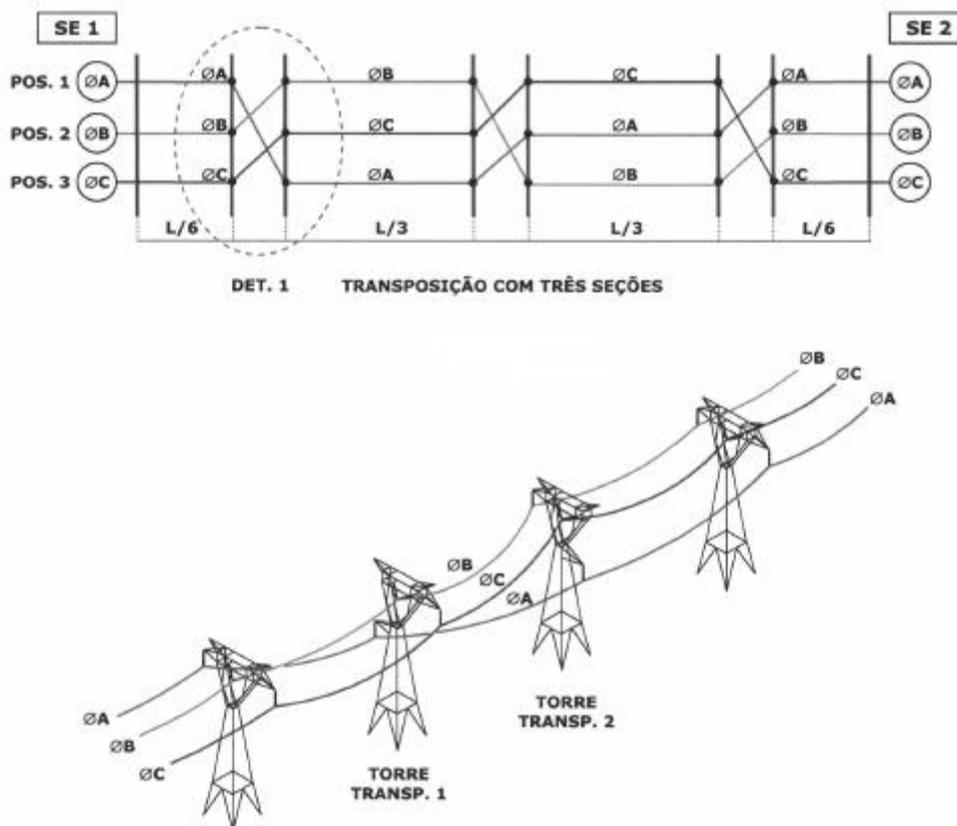


Figura 21: Transposição de Fases (Furnas – 2012)

4.5.1 Montagem de Estruturas Metálicas

As estruturas são transportadas até o canteiro de obras, normalmente por meio de caminhões, em lotes de peças que são separados de acordo com seu tipo.

Depois de armazenadas em locais limpos e seguros é elaborado o Plano de Montagem, que descreve todas as atividades aplicadas no procedimento, incluindo o método de trabalho, controle de qualidade, a produção esperada e a composição das equipes, além de todas as técnicas de içamento e estaiamento provisórios. Este planejamento também deve ser bastante cuidadoso quanto ao aspecto ambiental, de modo que todas as normas e recomendações têm de ser respeitadas a fim de evitar impactos degradantes.

A montagem pode ser realizada por meio de três métodos tradicionais: montagem manual, montagem com guindaste e montagem mista. Em circunstâncias especiais pode ser observada a montagem através de helicópteros em áreas de difícil acesso ou que apresentem rígidas restrições ambientais. Este último método é bem mais custoso e com aplicações bem esporádicas no Brasil.

A montagem manual é dividida em três etapas: pré-montagem, montagem propriamente dita e revisão da torre, compostas por equipes de encarregados, montadores e ajudantes.

A pré-montagem nada mais é do que o espalhamento e posicionamento das peças da torre sobre o solo e tem o objetivo de facilitar o içamento das torres no momento da montagem propriamente dita, conforme mostra a figura 22. Feito isto, outra equipe inicia o içamento dos montantes (com o auxílio de um trator sobre rodas, no caso de conjuntos mais pesados) e este procedimento é repetido diversas vezes até que todas as peças da torre sejam fixadas aos conjuntos, de acordo com a especificação do projeto. Trata-se de uma tarefa de grande risco aos montadores, que precisam estar, a todo o momento, conectados à estrutura através de equipamentos de proteção individual e coletivos (EPI's e EPC's) necessários a sua segurança, para realizar o perfeito engate das peças a alturas elevadas.



Figura 22: Pré-montagem de estrutura metálica treliçada

Durante a montagem os parafusos não são apertados com o torque requisitado no projeto - são apenas ajustados suficientemente para garantir a estabilidade da estrutura -, assim, após a montagem uma nova equipe faz o aperto final com o auxílio de um torquímetro e verifica se todas as peças estão corretamente instaladas. Somente após uma verificação criteriosa, desde a parte inferior da torre até as mísulas superiores, é que o palnut (dispositivo que impede o afrouxamento dos parafusos) é inserido, juntamente com a tinta de alumínio anticorrosiva.

Há também a montagem com guindaste, que é feita de modo semelhante à montagem manual, porém aumenta-se a produtividade e eleva-se o custo com o equipamento. A montagem mista, por sua vez, é a combinação da manual com a mecânica, sendo utilizada em casos onde a lança do guindaste não alcança os pontos mais altos da torre, exigindo, por isso, que os dois métodos sejam intercalados, conforme mostra a figura 23. A análise quanto à técnica mais vantajosa cabe à gerência do projeto.



Figura 23: Montagem mista de estrutura metálica treliçada

As estruturas estaiadas, por sua vez, possuem um processo de montagem que difere um pouco das autoportantes, pois faz uso de estais e mastros provisórios para posteriormente realizar o içamento dos materiais definitivos. E, após o içamento da estrutura, estando ela já revisada e com os parafusos apertados com os torques indicados no projeto, se observa ainda as atividades de tensionamento dos estais e nivelamento das torres, para que haja um correto equilíbrio de forças entre os quatro estais.

4.6 Isoladores

O desempenho das linhas de transmissão está diretamente relacionado com o comportamento dos seus isoladores. Estes equipamentos têm a função de sustentar os cabos e mantê-los eletricamente isolados das estruturas.

Em linhas aéreas, os cabos são suspensos e isolados da torre por cadeias de isoladores que estão sujeitas a forças verticais e horizontais. O número de isoladores por cadeia é determinado de acordo com a tensão da linha e o isolamento deve suportar tensões maiores que a tensão normal de operação, resistindo, inclusive, a surtos atmosféricos e surtos de manobras.

Podem ser fabricados em material cerâmico, como porcelana vitrificada ou vidro temperado, ou baseados em compostos poliméricos, como a borracha de silicone em torno de um núcleo de fibra de vidro. Ambos os materiais são dielétricos e visam garantir a confiabilidade do sistema, tanto no isolamento entre os condutores e a estrutura, quanto na sustentação e fixação dos cabos, suportando os esforços mecânicos.

Atualmente os isoladores de vidro são os mais utilizados em linhas de transmissão de extra-alta tensão (EAT) devido ao seu menor custo de manutenção e experiência de funcionamento comprovada, conforme mostra a figura 24. Os isoladores de porcelana, apesar

de serem bastante vistos em linhas de distribuição, possuem limitações de comprimento para uso em tensões muito elevadas.

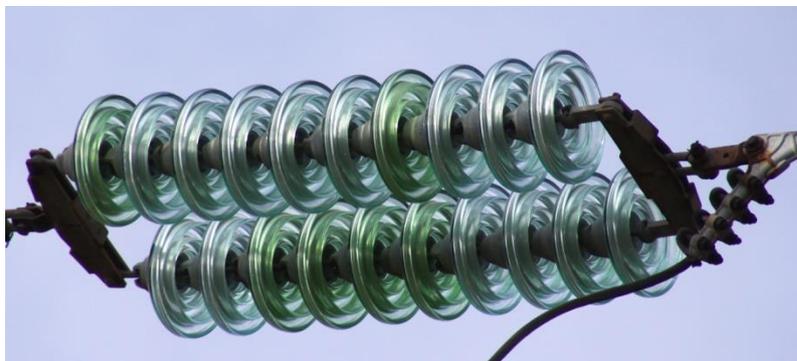


Figura 24: Cadeia dupla de isoladores de vidro

Os isoladores poliméricos são fabricados em uma só peça para qualquer classe de tensão. Apesar de serem mais leves (e, portanto, mais fáceis de manusear e transportar), além de possuírem um menor custo imediato em relação à cadeia completa de isoladores de vidro, ainda possuem elevado custo de manutenção, pois as técnicas de inspeção desses materiais é cara e ainda pouco confiável. Apesar disso, têm excelente desempenho tanto em áreas com níveis elevados de poluição quanto em regiões marítimas e são bastante utilizados em áreas suscetíveis a vandalismo. A figura 25 ilustra a composição de um isolador polimérico e suas ferragens associadas.

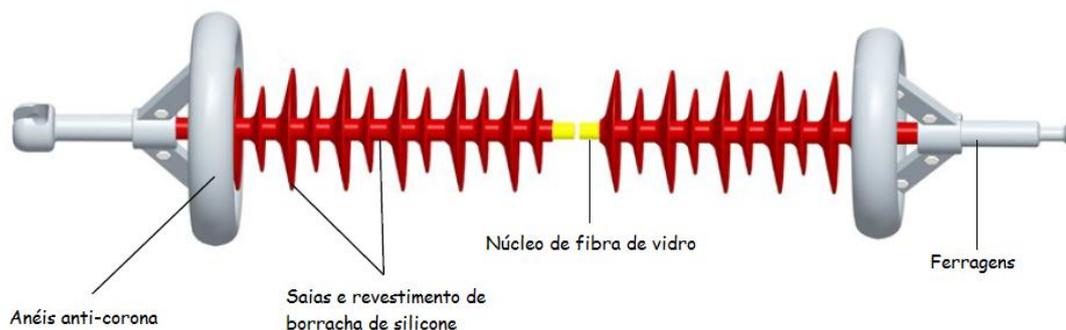


Figura 25: Isolador polimérico (Siklowatt – 2014)

Os isoladores também podem ser classificados quanto à sua forma de utilização, sendo divididos em suspensão e ancoragem. As cadeias de suspensão sustentam o peso do condutor e podem ser observadas na forma de “I” ou “V”, enquanto as cadeias de ancoragem, além de suportarem o peso do condutor, resistem às forças de tração do cabo, tolerando fortes deflexões.

Os isoladores são equipamentos frágeis e qualquer dano físico à sua estrutura pode gerar fuga de energia ou, no pior dos casos, o rompimento da isolação. Por isso, devem ser tomados cuidados especiais tanto no armazenamento quanto no transporte e montagem destes materiais. Desta forma, é recomendável armazená-los em locais cobertos e secos, além de proteger as embalagens do contato direto com o solo ou da aproximação de roedores. No içamento em direção às estruturas, devem ser amarrados através de suas ferragens e levantados verticalmente até a fixação na torre, mas, depois de instalados, não devem servir de apoio para escadas ou para os próprios montadores [34].

4.7 Cabos

Os cabos das linhas de transmissão são formados por um conjunto de fios metálicos encordoados que interligam as subestações de energia elétrica e caracterizam-se por possuir alta condutibilidade e resistência mecânica satisfatória, podendo ser classificados como condutores ou para-raios.

4.7.1 Condutores

São os elementos ativos propriamente ditos das linhas de transmissão. É através deles que as cargas elétricas se deslocam, transmitindo a energia da geração até os centros de carga.

O cobre foi a matéria-prima utilizada nas primeiras LTs devido a sua elevada condutividade, mas, atualmente, as linhas aéreas utilizam condutores compostos basicamente

de alumínio, tanto em forma de liga ou em conjunto com o aço, o que se deve principalmente ao seu menor custo em relação ao cobre ou qualquer outro material condutor.

Os condutores de alumínio nu com alma de aço (formados por um grupo de fios de alumínio dispostos concentricamente em torno de um fio de aço) são os mais utilizados nas LTs do Brasil devido a sua elevada condutividade e boa resistência mecânica. Apesar de possuírem resistência mecânica regular, o uso das ligas de alumínio tem se intensificado, pois apresentam boa condutividade e maior resistência a ambientes agressivos, além de menor custo [35]. Apenas em sistemas de cabos subterrâneos ainda se utiliza o cobre como material condutor, porém a transmissão subterrânea ainda se mostra desprezível em termos de quilometragem em comparação a linhas aéreas [25]. A figura 26 exhibe imagens de condutores com alma de aço (ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced) e alumínio (ACAR – Aluminium Conductor Alloy Reinforced), respectivamente [35].



Figura 26: Cabos ACSR e ACAR

Além dos materiais já citados, algumas inovações têm sido aplicadas em instalações específicas, como os condutores em alumínio reforçado por compósito ou os formados com alma de fibra de carbono. Estas soluções, apesar de possuírem um custo bastante superior aos cabos tradicionais, possuem algumas características particulares vantajosas como o baixíssimo peso e a elevada carga de ruptura, que permite uma redução de flecha considerável mesmo em altas temperaturas, além de alta condutividade e resistência à corrosão, sendo uma opção concebível para grandes travessias [36].

A seleção adequada do condutor é uma das tarefas mais significativas e complexas em um projeto de linhas de transmissão, já que provoca um impacto direto na escolha da torre, na isolação empregada e nos esforços mecânicos envolvidos, tanto nas estruturas quanto nas fundações. Também interfere consideravelmente nos custos e nas perdas ao longo da vida útil da LT.

O objetivo é encontrar o condutor ótimo, ou seja, aquele que apresenta todos os pré-requisitos necessários para atender às solicitações de geração e carga ao mesmo tempo em que minimiza os custos globais das instalações de transmissão. Normalmente os custos dos cabos são considerados em função de seu peso, expressos em valor unitário por quilo (ou tonelada) e seu preço final depende da cotação dos metais na Bolsa de Londres (LME – London Metal Exchange), da variação cambial e do custo de industrialização (prêmio).

Como nem sempre um só condutor satisfaz a demanda de energia requisitada pelo projeto, por vezes é necessário utilizar mais de um condutor por fase. Esta solução evita a utilização de cabos com diâmetros exagerados, o que acentua os esforços nas estruturas, nas fundações e conseqüentemente no custo final do empreendimento.

As características que definem os cabos condutores são sua bitola, seção transversal, diâmetro, peso, carga de ruptura, resistência elétrica, raio médio geométrico, reatância e ampacidade. Algumas condições externas que interferem em seu desempenho como temperatura ambiente, pressão barométrica da região, velocidade do vento, emissividade e absorção solar são parâmetros que também influenciam consideravelmente na escolha do condutor.

4.7.2 Para-Raios

Ocupando a parte superior das estruturas, acima dos condutores das fases e com diâmetro muito menor, existem cabos eletricamente conectados à torre e, portanto, ao mesmo

potencial da terra. Estes cabos são chamados de cabos para-raios (ou cabos guarda) e protegem o circuito das descargas atmosféricas, descarregando-as para o solo e evitando que causem danos e interrupções ao sistema [7].

Sua localização nas estruturas, em relação aos cabos condutores, é fundamental no grau de proteção oferecido à linha, sendo inclusive alvo de estudos específicos de coordenação de isolamento de linhas de transmissão para indicar qual a configuração ótima para a instalação.

Normalmente são utilizados cabos de aço que são conectados à torre através das ferragens de fixação e, deste modo, as eventuais descargas atmosféricas circulam pelo cabo de aço, pela torre e pelo sistema de aterramento (cabo contrapeso). Porém, nos últimos anos, diversas transmissoras têm adotado a estratégia de substituir um dos cabos para-raios por cabo OPGW (Optical Ground Wires). A utilização destes cabos óticos, apesar de seu preço ser, em alguns casos, quatro vezes mais caro que os tradicionais, agrega valor ao sistema devido à capacidade da fibra ótica de transmitir voz, dados e imagens a altas taxas por meio digital, aumentando a confiabilidade da rede e facilitando o gerenciamento do sistema de transmissão, além de possibilitar o envio de sinais de telecomunicação e telecontrole [26].

4.7.3 Instalação dos Cabos

Após a montagem das estruturas é iniciada a etapa de instalação dos cabos para-raios e condutores, que compreende as atividades de lançamento, emenda, flechamento e grampeação de acordo com as especificações técnicas e normas de segurança.

O lançamento dos cabos é realizado com base no Plano de Lançamento. Nele são avaliadas todas as condições e obstáculos do traçado da LT, com o objetivo de encontrar a melhor distribuição das bobinas no campo para que a instalação dos cabos seja realizada sem desperdício de material e o aproveitamento da atividade ocorra de forma otimizada. É

elaborado com base nas informações de planta e perfil e lista de construção, além das tabelas das bobinas disponíveis, conforme o modelo exibido no Apêndice B.

Depois de estipulados os locais de início e fim do lançamento em cada trecho, ordem de posicionamento das bobinas, locais de emendas, vãos de controle de flechas e locais das proteções nas travessias sobre rodovias, ferrovias ou outras LTs/LDs, é iniciado o lançamento. Primeiro são lançados os cabos para-raios, que se situam em um plano mais alto, e posteriormente são lançados os condutores.

Normalmente, em linhas de transmissão de extra alta tensão, os cabos são lançados sob tensão controlada, ou seja, há primeiramente o lançamento de um cabo de aço (cabo piloto) de menor peso que os cabos estipulados em projeto, para uma posterior conexão destes no piloto através de um balancim (arraia). Os cabos são puxados por um guincho localizado na extremidade do tramo denominada praça do guincho, enquanto que, na outra extremidade (praça do freio) os cabos saem das bobinas e passam pelo freio, onde é feito o controle da tensão do lançamento, conforme ilustra a figura 27.

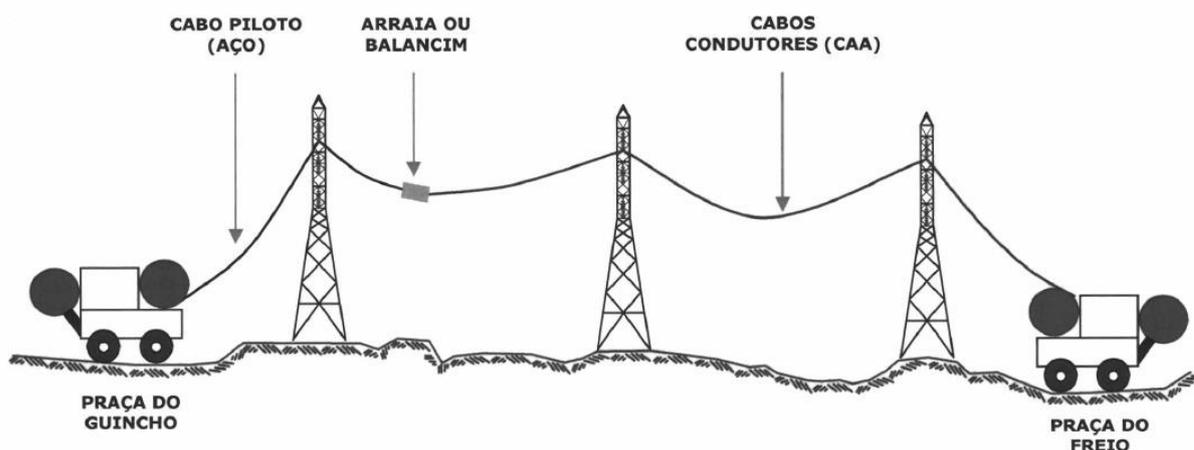


Figura 27: Lançamento de cabos sob tensão controlada (Furnas – 2012)

A quantidade de bobinas utilizadas na construção depende da extensão da LT e são enroladas, geralmente, em suportes de madeira com capacidade de transportar 2000 metros de cabo. Em linhas de transmissão com comprimento maior que uma bobina, devem ser

realizadas emendas continuamente para conectar dois segmentos de cabos. Para esse serviço são utilizadas luvas, confeccionadas de acordo com a matéria-prima do cabo, com o cuidado de adicionar uma pasta antioxidante no caso do condutor possuir alma de aço. As emendas, exibidas na figura 28, podem ser preformadas, que são instaladas manualmente, ou à compressão, que utilizam o auxílio de uma prensa hidráulica para a instalação. A emenda do cabo OPGW, diferentemente das demais, é realizada dentro da caixa de emenda, que são acessórios fixados na própria estrutura metálica a cada 5000 metros de fibra ótica.



Figura 28: Emenda preformada e emenda à compressão

Depois de lançados, tanto os cabos condutores como os para-raios devem possuir os valores de flechas compatíveis com o estipulado no projeto básico. A flecha é a maior distância vertical entre a linha que liga os pontos de apoio dos cabos e o ponto mais baixo da curva, conforme exibido na figura 29 e demonstrado na equação subsequente. Para que o valor real seja idêntico ao predeterminado, é efetuado o fechamento através dos serviços de regulagem dos cabos.

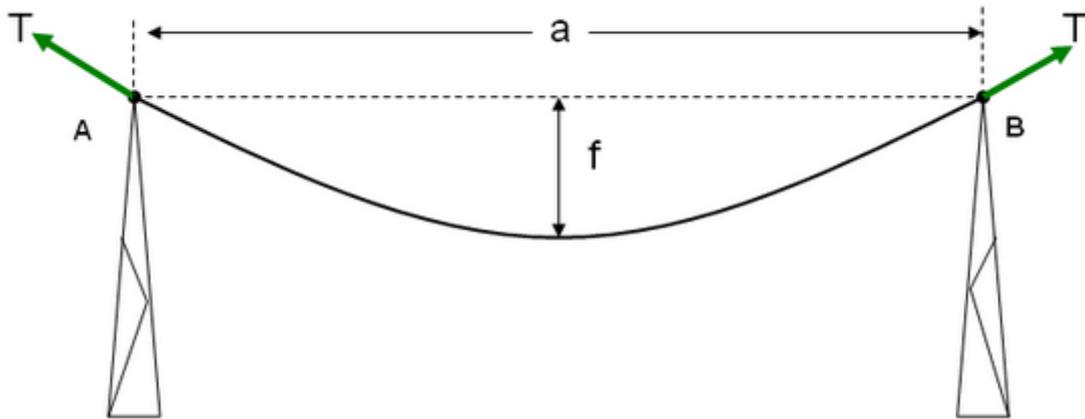


Figura 29: Flecha [33]

$$f = \frac{T_0}{p} \left[\cosh \left(\frac{a}{2 \cdot \frac{T}{p}} \right) - 1 \right]$$

Onde:

T = tração com direção tangente à curva [kgf];

f = flecha pela equação da catenária [m];

p = peso unitário do condutor [kgf/m];

a = vão [m].

Finalizado o flechamento e com os cabos devidamente regulados, as roldanas utilizadas para o lançamento (suspensão provisória) são substituídas pelos grampos de suspensão (suspensão definitiva), dando início à grampeação dos cabos. Como após o lançamento os condutores estão ancorados provisoriamente no solo em “mortos”, há, nesta última etapa, a transferência destes cabos do solo para a torre de ancoragem, em uma operação trabalhosa e perigosa, já que os cabos encontram-se tensionados. Então, obedecendo a flecha do vão, e após as pontas do cabo estarem atracadas na torre, aplica-se uma tensão por intermédio de catracas, finalizando a atividade. Nesta última fase é importante que seja

realizado o seccionamento dos cabos através de “jumpers”, para que a continuidade elétrica do circuito seja mantida.

4.8 Ferragens e Acessórios

As ferragens das linhas de transmissão são constituídas de elementos metálicos, como o aço e o alumínio e são projetadas tanto para resistir aos esforços eletromecânicos quanto para reduzir efeitos elétricos, como rádio interferência (RIV) e corona.

Existem diversos tipos de ferragens com funções específicas nas linhas de transmissão, mas suas especificações e desenhos dependem do fabricante, que deve atender aos requisitos normativos.

Os grampos realizam a interligação mecânica entre a cadeia de isoladores e a estrutura, além de transmitirem cargas distintas às torres. São utilizados tanto nas cadeias de suspensão como nas de ancoragem e, de acordo com o engate, podem ter as extremidades em formato de bola, concha, elo, gancho, garfo ou olhal.

As ferragens nas cadeias de suspensão, além de sustentarem os condutores, transmitem à estrutura o peso dos cabos e das cargas devidas ao vento, em uma disposição vertical e em forma de “I” ou “V”. Já as ferragens de ancoragem, através de uma disposição horizontal, transmitem para a estrutura a carga de tração dos cabos, além das cargas devidas ao vento.

Além das ferragens de cadeia supracitadas, alguns acessórios são imprescindíveis para o bom funcionamento das linhas de transmissão. As luvas de emenda, por exemplo, destinam-se a unir mecânica e eletricamente duas extremidades de condutores, enquanto que as luvas de reparação restabelecem a integridade eletromecânica de um condutor parcialmente danificado.

Já para limitar os efeitos mecânicos da ação do vento sobre os condutores e para-raios são utilizados espaçadores, amortecedores e espaçadores-amortecedores, instalados após o flechamento e grampeação dos cabos condutores e exibidos na figura 30. A função dos

espaçadores é manter distâncias seguras entre os subcondutores, impedindo o choque, enquanto os amortecedores têm a missão de absorver a vibração dos cabos, evitando assim danos por fadiga. Os espaçadores-amortecedores conjugam as funções de ambos em um único acessório, sendo normalmente utilizados em linhas onde há mais de um condutor por fase.

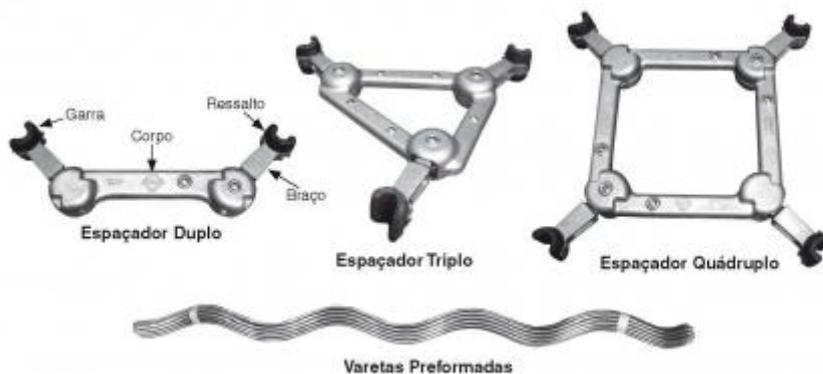


Figura 30: Espaçadores (PLP – 2015)

4.9 Sinalização

A instalação dos itens de sinalização é responsabilidade da empreiteira e tem o objetivo de garantir a segurança, identificar e alertar para as particularidades do projeto. Esta etapa é iniciada após o término da instalação dos cabos e deve seguir os critérios estabelecidos pela NBR 6535 de 2005.

As esferas de sinalização são instaladas nos cabos para-raios de acordo com a definição de projeto, sendo geralmente necessárias em áreas de travessias ou em regiões próximas a aeródromos ou heliportos. O trabalho de fixação é realizado por montadores especializados que se apoiam nos cabos condutores e, com o auxílio de uma corda, puxam os cabos para-raios para baixo para aparafusar as esferas.

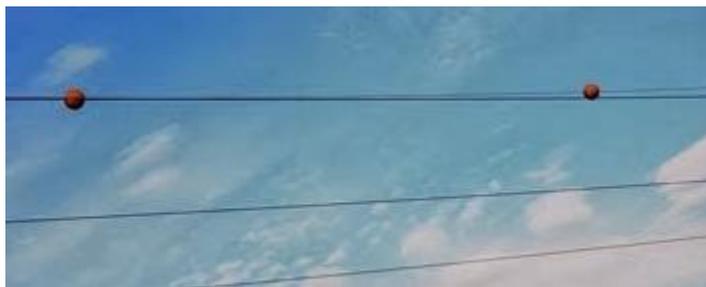


Figura 31: Esferas de sinalização

As esferas possuem diâmetro de 600 mm e um espaçamento máximo de 30 metros entre elas. Sua pintura é feita nas cores laranja ou vermelha e tem o objetivo de auxiliar os pilotos de aeronaves, representando, respectivamente, uma advertência ou um obstáculo iminente. Também com o intuito de prevenir acidentes aéreos, são realizadas pinturas nos suportes das estruturas quando há cruzamentos de duas ou mais LTs, em deflexões acentuadas entre duas torres ou na saída de ramais de linhas [22].

Já a sinalização por placas é realizada após a grampeação dos cabos condutores e possui diferentes objetivos que variam de acordo com seu tipo, mas substancialmente servem como advertência ou orientação para trabalhadores da obra e transeuntes. As placas mais usuais são: placa de numeração, placa de identificação de fases, placa de perigo e placa de identificação. Sinalizadores de estais também são comumente utilizados para identificar os cabos de estais, prevenindo acidentes.

4.10 Revisão Final

Realizada simultaneamente com a revisão do solo, esta é a última etapa que conta com a participação de operários antes da entrega do empreendimento. Como o lançamento dos cabos condutores e a instalação das sinalizações são realizados progressivamente, esta fase inicia à medida que os condutores são grampeados e ancorados nas estruturas durante o trecho. Esta

tarefa envolve colaboradores com funções variadas, capazes de verificar e corrigir toda e qualquer falha que porventura seja observada: peças faltantes, defeitos de galvanização, reaterro, contrapeso, limpeza de faixa, estradas de acesso, aterramento de cercas, verticalidades das cadeias, etc.

Depois de medidos os níveis de aterramento e fechados os jumpers entre os isoladores de ancoragem, inicia-se os testes de energização. Os pontos críticos, que exigem atenção especial, estão na inspeção das cadeias de isoladores e acessórios, pois estes equipamentos localizam-se em regiões de difícil acesso depois que a LT é energizada.

A obra termina assim que o documento denominado *as built* (como construído) é assinado e, depois disso, a linha de transmissão já está pronta para ser energizada e entrar em operação.

5 Considerações Finais e Propostas para Trabalhos Futuros

O setor elétrico brasileiro vem crescendo significativamente nos últimos anos com a expansão do segmento de transmissão de energia.

Para confirmar essa expectativa, o governo federal anunciou recentemente, no dia 11 de agosto de 2015, um pacote de medidas que prevê o leilão de 37,6 mil quilômetros de linhas de transmissão nos próximos anos. Os investimentos declarados de R\$ 70 bilhões (dos quais R\$ 39 bilhões devem ser executados até 2018) tornam possíveis tanto a expansão do setor elétrico, possibilitando mais robustez ao sistema brasileiro, quanto o desenvolvimento socioeconômico, com o aumento na geração de empregos e a movimentação de diversos setores da economia.

A construção de linhas de transmissão de energia elétrica é de suma importância para o progresso de uma nação e é através do conhecimento das formas, etapas, atividades e

valores aplicados nesta atividade que se torna possível desenvolver novas técnicas e modelos ainda mais seguros, confiáveis e eficientes. Como os métodos construtivos de LTs citados neste trabalho são bastante eficazes e possuem comprovada aplicabilidade, este texto pode se tornar, inclusive, uma oportuna base de informação para estudos de caso em trabalhos futuros.

Esta metodologia também é bastante conhecida pelas grandes transmissoras, apesar de ainda haver escassez de mão-de-obra especializada para realizar grande parte dos serviços de construção, principalmente de montagem de estruturas, já que a oferta de escolas técnicas direcionadas à construção de linhas ainda é insuficiente no Brasil. Da mesma forma, encontrar engenheiros de projeto com formação dirigida a linhas de transmissão também não é uma tarefa simples, o que limita o desenvolvimento de novas tecnologias para o setor.

Desta forma, apesar do aumento na demanda por projetos de transmissão, as práticas de implantação e os tipos de equipamentos utilizados no Brasil não têm sofrido mudanças significativas ao longo dos anos. O modelo de licitação pelo menor preço praticado nos leilões de linhas de transmissão limita, de certo modo, os investimentos das transmissoras em novas tecnologias, já que a inserção de inovações que poderiam tornar as LTs mais eficientes e menos impactantes ao meio ambiente normalmente torna o custo inicial mais elevado, o que desestimula esta prática. Apesar disso, existem diversos estudos no sentido de ampliar a capacidade de transmissão das linhas existentes e dos futuros empreendimentos, aliando o aperfeiçoamento técnico na segurança, confiabilidade e eficiência à redução de custos e mitigação dos impactos ambientais.

As linhas de transmissão que transportam grandes blocos de potência por longas distâncias já são realidade no modelo brasileiro. Em 2014 e 2015, inclusive, foram leiloados os dois bipolos em corrente contínua que transportam energia sob tensão de ± 800 kV da usina de Belo Monte, no Pará, até os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, contribuindo para o acréscimo de 8 GW ao Sistema Interligado Nacional. Estas linhas têm características

construtivas diferenciadas em relação às tradicionais, pois utilizam estruturas metálicas de alturas mais elevadas que as convencionais, devido ao maior *clearance* exigido, além de 6 cabos por polo. Outras possibilidades para a transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias também são avaliadas, mas estão mais distantes da realidade de implantação em curto prazo, que são os casos da transmissão CA em meia onda e dos sistemas multifásicos, que podem vir a ser soluções reais futuramente.

Uma inovação que já vem sendo aplicada é a recapitação de LTs, com a readequação dos espaçamentos e cadeias de isoladores, conversão de circuitos duplos em circuitos simples de tensão mais elevada, recondutoramento de trechos pouco eficientes, etc. Esta prática evita a construção de novas linhas paralelas àquelas já existentes e objetiva o aumento da potência transmitida.

A utilização de linhas compactas também é uma concepção que tem sido bem aceita no modelo brasileiro e consiste na alteração da estrutura da torre de modo a aproximar as fases. Esta alternativa permite, além de elevar consideravelmente a relação de potência transmitida por metro da faixa de passagem, a redução (ou até mesmo eliminação) da compensação série que por ventura tenha sido especificada para linhas convencionais. Sua implantação exige, contudo, uma rigorosa análise em relação aos isolamentos elétricos, campos eletrostáticos e eletromagnéticos, além do dimensionamento mecânico das estruturas.

Outro conceito que já foi utilizado no Brasil na LT 500 kV Cachoeira Paulista - Adrianópolis, por exemplo, mas que é constantemente objeto de novos estudos, é a tecnologia de Linha de Potência Natural Elevada (LPNE), que propõe modificações radicais na geometria das fases e feixes dos condutores. Teoricamente, esta solução demonstra que a equalização e maximização dos campos elétricos superficiais de todos os subcondutores levam à otimização da potência natural da linha. Porém, apesar de outros testes realizados no país com este modelo, chegou-se a conclusão de que a técnica de Feixe Expandido (FEX) é

menos onerosa que a LPNE em seu conceito original, com um aumento de 15% a 30% de potência natural em relação às linhas convencionais. Esta aplicação quebrou o paradigma da distância tradicional de 0,457 metros (ou 18 polegadas) entre os subcondutores.

Basicamente, além da proposta de manter a continuidade nos estudos das novas tecnologias empregadas na transmissão, é interessante buscar o aperfeiçoamento nos modelos que contemplam variações na potência transmitida, distâncias na transmissão e do nível de tensão. Todos esses esforços visam aperfeiçoar tecnologias que permitem às LTs transportarem energia com qualidade, confiabilidade, segurança e baixo custo, beneficiando a todos que dela usufruem.

A. Apêndice A: Lista de Construção

Nº	Estruturas		Angulo de Deflexão				Desn. Condutor (m)	Vãos			Localização		UTM (23K-UTM/WGS-84)		TPO DE FIXAÇÃO		AMORTECEDOR DE VIBRAÇÃO (CONDUTOR)	Observações			
	Estrutura	H util	G	M	S	D		Vante (m)	Médio (m)	Do Peso (m)	CONDUTOR	Progressiva (m)	Colado Terreno (m)	EAST	NORTH	COND			PR	R	V
131/3	HLA60	15,00	45	49	12	D	11,7	424,76	372,05	233,00	268,00	0,00	55,40			A	A	-	2		
132/1	HEESI	18,00					20,3	306,91	365,84	273,00	301,00	424,76	64,06			S	S	2	2		DERIVAÇÃO PARA A SE AÇU III
132/2	HEESI	27,00					-21,6	334,48	320,70	634,00	540,00	731,67	75,36			S	S	2	2		
132/3	HLA40	15,00	22	22	12	D	13,8	510,52	422,50	204,00	266,00	1066,16	65,74			A	A	2	3		
133/1	HEESI	27,00					-4,4	372,00	441,26	533,00	510,00	1576,89	67,58			S	S	3	2		
133/2	HEESI	21,00					-11,8	276,68	324,34	397,00	379,00	1948,67	69,14			S	S	2	2		
134/1	HLA60	15,00	53	15	36	D	-7,6	263,19	269,93	223,00	220,00	2225,35	63,30			A	A	2	2		TRAÇÃO REDUZIDA: 15% DA C.R. NO EDS; FINAL
134/2	HLA60	15,00					-0,3	151,99	207,59	157,00	174,00	2489,54	55,65			A	A	2	2		TRAÇÃO REDUZIDA: 10% DA C.R. NO EDS; FINAL
SE AÇU II	PORTICO	15,00					-	-	76,00	73,00	74,00	2640,53	55,34			A	A	1	1		

Figura 32: Lista de Construção – Seccionamento na LT 230 kV Açu II - Açu III

Referências Bibliográficas

- [1] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, “Anuário Estatístico do Brasil”, Anuário, 2011.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, “Balanço Energético Nacional,” MME – Ministério de Minas e Energia, BEN, 2014.
- [3] Dias, Robson Francisco da Silva, “Derivação ou injeção de energia em uma linha de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda por dispositivo de eletrônica de potência,” Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Março de 2008.
- [4] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, “Anuário Estatístico de Energia Elétrica,” MME – Ministério de Minas e Energia, Anuário, 2014.
- [5] Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobras, “Como a energia elétrica é transmitida no Brasil,” disponível em: <<http://www.eletrobras.com.br/elb/natrilhadaenergia/emergia-eletrica/main.asp?View={05778C21-A140-415D-A91F-1757B393FF92}>>. Acesso em: 14 jul. 2015.
- [6] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 14 jul. 2015.
- [7] Fuchs, R.D., “Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas,” Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- [8] Gomes, Roberto, “O Gestão do Sistema de Transmissão do Brasil,” Editora FGV, 2012.
- [9] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Atlas de Energia Elétrica do Brasil,” MME – Ministério de Minas e Energia, Atlas, 2002.
- [10] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Eletrobras CEPTEL, disponível em: <<http://www.cepel.br>>. Acesso em: 14 jul. 2015.
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica: Procedimentos”, 1985.
- [12] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, disponível em: < <http://www.epe.gov.br/acessoainformacao/Paginas/institucional.aspx>>. Acesso em: 14 jul. 2015.
- [13] Paulo, Goret Pereira, “A Utilização de Leilões em Modelos de Expansão da Rede de Transmissão de Energia Elétrica,” Tese de Doutorado, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2012.
- [14] Frontin, O. Sergio, “Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas,” Brasília, 2013.

[15] Caputo, Geovane Anselmo Silveira, “Um Estudo de Planejamento da Expansão da Transmissão em Sistemas de Potência Considerando a Incerteza,” Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, Julho de 2009.

[16] Anais do XII Congresso Brasileiro de Energia, “Desafios do Setor Energético Brasileiro,” Volume III, 2008

[17] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, “Relatório R3 – Definição da Diretriz e Análise Socioambiental” MME – Ministério de Minas e Energia, 2014.

[18] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, “Estudos Para a Licitação da Expansão da Transmissão – Detalhamento da Alternativa de Referência: Relatório R2” MME – Ministério de Minas e Energia, 2014.

[19] Burin, Flávia de Souza, “Modelagem do Comportamento Mecânico de Cabos Suspensos Através de Métodos Analíticos e Numéricos,” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, julho de 2010.

[20] Ministério do Trabalho e Emprego - MTE, “NR 18 – Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção”, 1978.

[21] Plena Transmissoras, “Transmissão de Energia Elétrica – Curso Básico”, Março, 2008.

[22] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 6535 – Sinalização de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica com Vistas à Segurança da Inspeção Aérea: Procedimento”, Julho, 2005.

[23] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 6122 – Projeto e Execução de Fundações”, Maio, 1996.

[24] Rosa, Marcelino, “Linha de Transmissão: Critérios de Projetos e Definição do Tipo de Fundação,” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2009.

[25] Jr., William D. Stevenson “Elementos de Análise de Sistemas de Potência,” Mc Graw Hill, 4ª edição 1974.

[26] Duarte, Fábio Terra Passos, “Redução de Perdas por Indução em Cabos Para-Raios de Linhas de Transmissão Dotadas de um Cabo Para-Raios OPGW e Outro EHS,” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, setembro de 2007.

- [27] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Relatório do Programa para Orçamentos de Linhas de Transmissão – O L T,” Divisão de Engenharia de Transmissão – Eletrobras S/A, Fevereiro, 2005.
- [28] Mattos, Aldo Dórea, “Como Preparar Orçamentos de Obras”, Editora Pini, São Paulo, 2006.
- [29] BORGES, Carmen Lucia Tancredo. Análise de Sistemas de Potência - UFRJ, 2005.
- [30] Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - Ibama, “Portaria nº 421,” Outubro, 2005.
- [31] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, “Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão,” 2013.
- [32] Power Line Systems Inc., 2008.
- [33] Bezerra, Flavius Vinicius Caetano, “Projeto Eletromecânico de Linhas Aéreas de Transmissão de Extra Alta Tensão,” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, novembro de 2007.
- [34] Balestro, “Guia de Manuseio de Isoladores”.
- [35] Nexans, “Catálogo de Condutores de Alumínio Nu”.
- [36] 3M, “ACCR – Condutor em Alumínio Reforçado por Compósito”.
- [37] Siklowatt, “ACCR – Condutor em Alumínio Reforçado por Compósito”.