

Desafios na implantação de linhas de transmissão aéreas, subaquáticas e subterrâneas

R.T.M MANSUR I.J.S. LOPES

*Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG*

Abstract: This paper presents the feasibility studies and solutions to implement a transmission line with overhead, underwater and underground sections, addressing the challenges and engineering solutions to meet the minimum requirements required both by regulatory bodies and by the engineering areas of the agent of transmission, considering a minimum horizon of 30 years of operation, whose premise is the performance of the system with the mitigation of the probability of serious failures.

Resumo: Este artigo apresenta os estudos de viabilidade e as soluções para implementar uma linha de transmissão com trechos aéreo, subaquático e subterrâneo abordando os desafios e as soluções de engenharia para atender aos requisitos mínimos requeridos tanto pelos entes reguladores quanto pelas áreas de engenharia do agente de transmissão, tendo em vista um horizonte mínimo de 30 anos de operação, cuja premissa é o desempenho do sistema com a mitigação da probabilidade de falhas graves.

Keywords: Transmission line; Underground line; Underwater line; Viability studies; Installation

Palavras-chaves: Linha de transmissão; Linha subterrânea; Linha subaquática; Estudos de viabilidade; Instalação

1. INTRODUÇÃO

A implantação de linhas de transmissão convencionais plenamente aéreas está cada vez mais limitada devido ao crescimento populacional nas regiões metropolitanas e às restrições socioambientais. A utilização de linhas híbridas torna-se uma solução capaz de evitar essas restrições em detrimento dos custos mais elevados. Essa tendência pode ser verificada nos últimos estudos de planejamento de muitas regiões metropolitanas no âmbito do Plano Decenal realizado pela Empresa de Pesquisa Energética do governo federal – EPE. No total, mais de 180 km de linhas com cabos isolados estão indicadas até 2023, sejam elas integralmente subterrâneas ou compostas concomitantemente com trechos aéreos e/ou subaquáticos, com investimentos da ordem de bilhões de reais.

Neste contexto, o presente artigo tem como finalidade apresentar as soluções técnicas empregadas em linhas com acoplamentos aéreos, submarinos e subterrâneos, a fim de superar as dificuldades encontradas durante a fase de projeto e implementação.

2. CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO AÉREO

Na modelagem utilizada em trechos aéreos, a altura dos cabos, as distâncias entre fases e as alturas dos cabos para-raios são agrupados e fixados em função da geometria predominante chamada de torre típica. De maneira geral, as linhas de transmissão aéreas possuem maior flexibilidade

quando comparadas às linhas de transmissão subterrâneas/subaquáticas, uma vez que existe a possibilidade, por exemplo, de recapacitar a linha de transmissão com custos inferiores aos de uma reconstrução ou expansão.

O estudo da diretriz do trecho aéreo deve ser realizado com base na análise de mapas, fotos aéreas e inspeções em campo, onde são coletadas as coordenadas dos pontos notáveis do caminhamento proposto visando o menor percurso, o apoio em áreas de topografia plano-ondulada e o aproveitamento dos acessos existentes, com o objetivo de mitigar os impactos ambientais decorrentes desta implantação. Essa etapa é de fundamental importância, pois nela é identificada a necessidade de desapropriação de áreas particulares, reservas indígenas, preservação permanente, áreas de patrimônio histórico, cultural e arqueológico, dentre outros.

2.1 Seleção do cabo condutor

As condições básicas de projeto selecionadas para os cabos devem limitar as trações que atuam sobre os mesmos a valores que garantam sua integridade mecânica durante toda a vida útil prevista para a linha de transmissão aérea. Os limites adotados levam em consideração tanto as cargas resultantes da ação dos ventos elevados na região como também as deformações que podem ser produzidas nos cabos por vibrações induzidas por ventos uniformes de baixa intensidade. Para as condições elétricas deve-se verificar o

respeito a capacidade de corrente exigida para condições permanentes e de curta duração, potência natural, condições de campos eletromagnéticas (campo elétrico, magnético, ruído audível e radio interferência).

2.2 Coordenação de Isolamento

A análise da coordenação de isolamento é exigida para definir as cadeias de isoladores, suas características e o dimensionamento elétrico da cabeça das estruturas, conforme o nível de poluição e ventos da região atravessada pela LT. As cadeias de suspensão, passagem e ancoragem dos condutores devem ser dimensionadas em função do NBI mínimo e da distância de arco de forma a garantir o desempenho adequado do isolamento da LT frente a descargas atmosféricas.

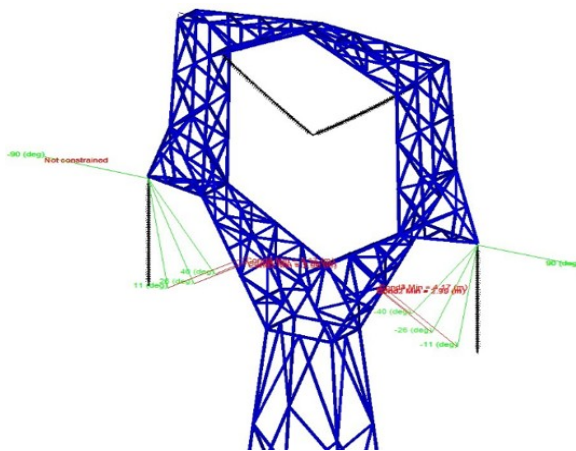


Figura 1. Verificação dos balanços das cadeias devido ação do vento

2.3 Série de Estruturas

As estruturas devem ser projetadas a partir das características dos condutores, cabos para-raios, isoladores, conexões, peso próprio, força devido ao vento e fatores especificados de sobrecarga, resistência e segurança, independentemente da posição que eles são usados dentro da faixa de projeto. É realizado um estudo de hipóteses de cargas para cada uma das estruturas a serem utilizadas no projeto: Cargas transversais, longitudinais, verticais, construção, manutenção e grampeamento e etc.

Para o trecho aéreo, cabe salientar, que outros aspectos podem influenciar os parâmetros da linha de transmissão como, por exemplo: altitude em que a linha é construída, resistividade do solo, condições físicas dos cabos (tempo de uso, presença de corpos sólidos ou irregularidades acentuadas na superfície dos condutores), entre outros.

2.4 Aterramento

Nas linhas de transmissão aéreas uma grande preocupação é alcançar o desempenho a descargas atmosféricas especificada pela concessionária de energia elétrica. Um dos artifícios é considerar a resistência de aterramento das

estruturas limitada a 20Ω . A fase inicial do sistema de aterramento a ser instalada em cada estrutura é definida no decorrer do projeto executivo da linha de transmissão em função dos valores medidos da resistividade, conforme campanha de investigação dos solos.

3. CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO SUBAQUÁTICO

As transmissões em sistemas subaquáticos têm vindo da necessidade, em vários países no mundo, de empregarem energia limpa, como geração eólica offshore dentre outras opções disponíveis de energia exploradas no mar. A opção por geração de energia com fontes renováveis é provocada por fortes pressões de órgãos internacionais que prezam pela sustentabilidade na exploração de fontes energéticas.

Antes do dimensionamento do condutor dos cabos isolados de um trecho subaquático e para a elaboração do projeto diversos levantamentos devem ser feitos no local da instalação: resistividade térmica do solo, batimetria, sísmica de alta resolução, ultrassonografia de varredura lateral e sedimentologia de amostras do solo. A medição de temperatura e resistividade térmica deverá ser realizada com auxílio de mergulhadores para que seja inserida as sondas no fundo do mar.

O levantamento batimétrico da seção subaquática da linha de transmissão é importante para conhecer as profundidades do canal marinho. Ele determina o perfil da linha, o tipo de embarcação e as metodologias que podem ser utilizadas para o lançamento dos cabos.

O levantamento sísmico de alta resolução é importante para determinar as camadas do fundo do mar e os tipos de solo. Os equipamentos de emissão e captura de ondas refletidas são posicionados na superfície marinha e puxados por uma embarcação ao longo da rota do cabo. As figuras a seguir ilustram uma região com registro sísmico retirado do levantamento e o respectivo mapa sísmico digitalizado após interpretação dos dados:

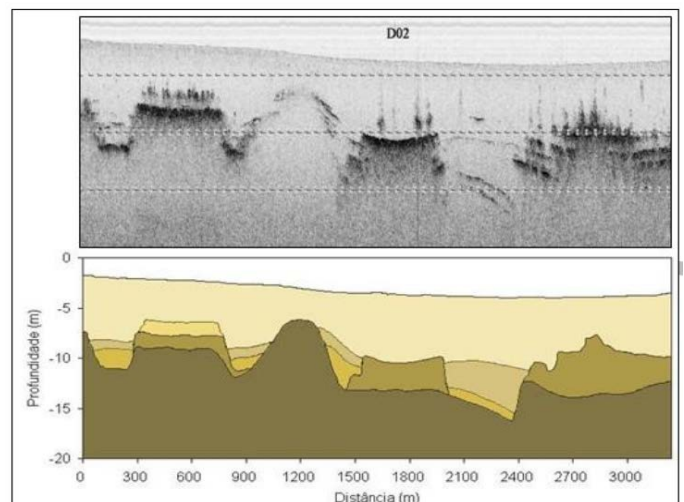


Figura 2. Perfil sísmico

Além da sísmica de alta resolução, para caracterização do solo marinho, é recomendável a coleta de amostras em

diversos pontos ao longo da rota e análises sedimentológicas em laboratório.

Estes dados em conjunto fornecerão subsídio para definição da melhor rota de lançamento dos cabos subaquáticos, analisando as interferências como: rochas, troncos de árvores, embarcações naufragadas, desníveis acentuados, bancos de areia, saliências diversas e outras interferências.

Os condutores utilizados nos cabos subaquáticos são geralmente de cobre e a blindagem de alumínio. A escolha do material além de determinar os parâmetros elétricos, influenciam diretamente no preço do projeto. Usualmente utiliza-se o cabo isolado de cobre pela facilidade de instalação (menor peso, menores bobinas e emendas mais resistentes). Porém, a seção do cabo submarino utilizando o cabo condutor de alumínio está se tornando recorrente devido a uma significativa redução de custos para o projeto. Nas linhas subaquáticas o XLPE apresenta instabilidade de suas propriedades elétricas quando em contato com água. Nesse sentido, os cabos subaquáticos recebem proteção mecânica adicional para que sejam instalados sob a água: normalmente, têm interior de aço e isolamento especial. Eles podem ser metálicos, coaxiais ou ópticos — os mais utilizados atualmente.

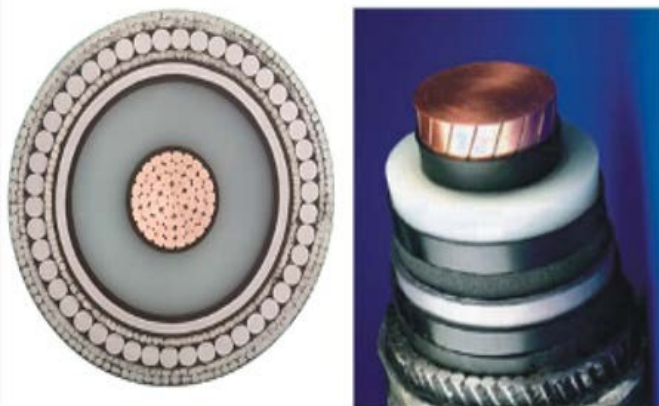


Figura 3. Cabo isolado submarino

As blindagens podem ser aplicadas sobre o condutor e/ou sobre o isolamento do condutor. No primeiro caso, a blindagem ou bainha, como é normalmente conhecida, serve para preencher as irregularidades que o material condutor possa ter. Desta forma, a blindagem evita que o campo elétrico formado no condutor assuma formas distorcidas, o que ocasionaria degradação do condutor, pois haveria esforços concentrados em determinados pontos.

A constituição do cabo submarino é muito similar ao cabo subterrâneo, excluindo-se a armação e capa externa em fios de polipropileno. Nesse sentido, a filosofia de cálculo da capacidade é idêntica.

4. CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO SUBTERRÂNEO

Para a elaboração do projeto de um trecho subterrâneo e dimensionamento dos cabos isolados, deverão ser previsto alguns levantamentos de campo: topografia, mapeamento de

interferências, resistividade térmica, resistividade elétrica e levantamentos geotécnicos. O traçado da linha de transmissão subterrânea deve buscar reduzir ao máximo os impactos durante a implantação na região, como:

- Cortes das seções desnecessárias na instalação ao longo do caminhamento da linha de transmissão: MND, túnel e etc.
- Evitar ao máximo as principais interferências e travessias com instalações de outros serviços públicos: água, gás, telefonia e etc.
- Redes básicas próximas ou travessias.
- Grau de incidência de locais com guia rebaixada (entrada e saída de veículos) em virtude de futura locação das caixas de emendas.
- Elevado número de deflexões, fato que causam aumento nos esforços de puxamento dos cabos isolados;

Em trechos subterrâneos é possível várias disposições de cabos: configuração plana horizontal em vala única, configuração plana horizontal com valas separadas, configuração plana vertical em vala única, configuração triangular para trechos em MND, configuração plana horizontal com cabos diretamente enterrados no túnel, configuração plana vertical com os cabos em disposição senoidal no ar, dentro do túnel. Para a escolha da solução ótima é necessário considerar os preços dos cabos e acessórios, os custos das obras de infraestrutura civil e os custos de instalação.

Usualmente a utilização de uma única vala disposta em formação plana vertical para a instalação dos cabos é a mais vantajosa levando em consideração a redução da faixa de modo a distanciar o banco de dutos da calçada de pedestres e redução da intensidade do campo magnético. O aterramento comumente utilizado é o “cross-bonding” de forma a proporcionar menores perdas elétricas.

Para as linhas subterrâneas ou subaquáticas os parâmetros básicos do projeto são os dados oriundos do ambiente e do sistema elétrico utilizados para o dimensionamento do cabo isolado formado pelo condutor, blindagem metálica e a isolamento. O cálculo da capacidade de corrente de cabos isolados é feito com base na norma IEC 60287 que apresenta as fórmulas básicas para o cálculo das resistências térmicas, fontes de calor e determina a capacidade de corrente em regime permanente para um fator de carga cíclica diária de 100%. E da norma IEC 60853 que apresenta as fórmulas para correção da capacidade de corrente para correntes cíclicas com fator de carga inferior a 100%, e capacidade de correntes transitórias. Ressalta-se que atualmente são instalados somente cabos com isolamento extrudada em XLPE.

A metodologia do cálculo de capacidade é desenvolvida com base no fluxograma do modelo simplificado abaixo apresentado na Figura 4:

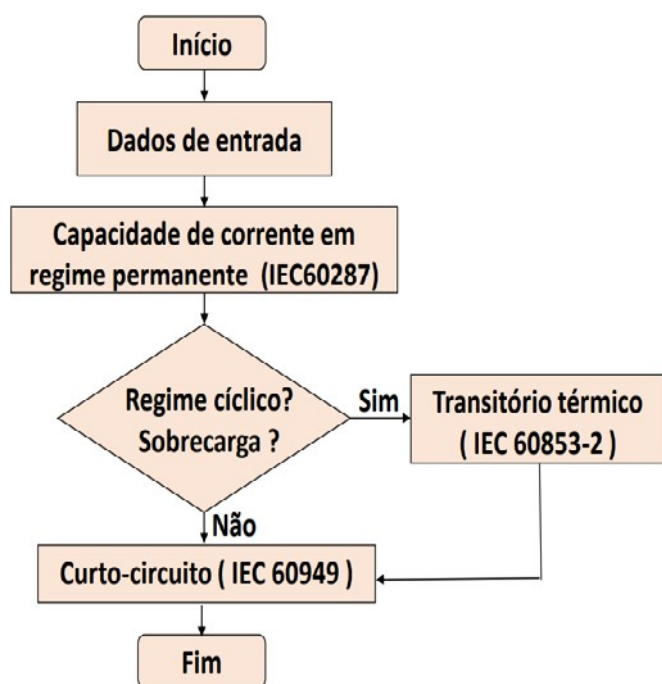


Figura 4. Fluxograma simplificado de Dimensionamento

4.1 Características do cabo isolado

A figura 4 mostra os componentes principais dos cabos de potência da linha de transmissão subterrânea:

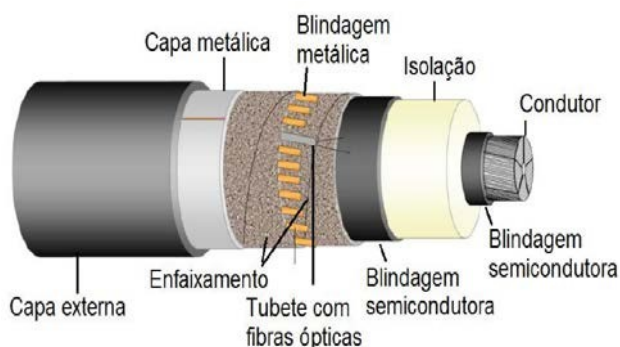


Figura 5. Características do cabo isolado

A isolamento em XLPE, deve ser projetada para tensão máxima de operação da linha de transmissão, apropriada para temperaturas no condutor, considerando os regimes de operação normal e de curto-circuito. A isolamento e as blindagens semicondutoras interna e externa são simultaneamente aplicadas sobre o condutor do cabo. A blindagem metálica a fios de cobre deve apresentar seção compatível para suportar a corrente de curto-circuito monofásico esperada na linha de transmissão. Para proteção do núcleo do cabo contra umidade, uma capa de alumínio laminado é aderida junto à cobertura durante o processo de

fabricação. A capa externa anti-corrosiva é constituída de polietileno de alta densidade contendo grafite para fins de teste elétrico e aditivo contra ação de cupins.

5. TRANSIÇÕES

Para uma linha híbrida é de fundamental importância se atentar a implantação das transições de forma confiável e segura mantendo a premissa de ser manter o conceito de mínimo custo global. Por se tratar de uma transição que apresenta partes energizadas expostas, a concessionária deve prever no projeto que essa área restrita chamada de transição híbrida seja com acesso somente a equipe de manutenção da linha de transmissão.

O projeto de torres e postes de transição devem levar em consideração o método de instalação do cabo na estrutura. As terminações poliméricas são cada vez mais aceitas no mercado por oferecer melhor segurança e desempenho ambiental, além de tornar as torres e postes de transição mais leves.

O dimensionamento das estruturas de suporte dos terminais, dutos, caixas de passagem e caixas de emenda devem prever, necessariamente, as cargas nas condições mais desfavoráveis de montagem e manutenção.

Nas regiões onde existe a presença de térmitas (cupins), os cabos isolados devem ter capa externa que previna e evite a sua perfuração por esses insetos e os possíveis danos associados à corrosão da blindagem metálica e a isolamento com a penetração de umidade.

A Zona de Transição pode ser considerada uma subestação de transição para possibilitar, por exemplo, o acoplamento de um trecho aéreo com um trecho subaquático onde devem ser previstos um pórtico do tipo metálico treliçado para ancoragem da linha de transmissão aérea, para-raios e terminais para realizar os pingados de conexão com os cabos isolados subaquáticos, conforme figuras abaixo:



Figura 6. Transição Híbrida da LT 230kV Biguaçu – Desterro (aérea-subaquática) de propriedade da Eletrosul



Figura 7. Transição Híbrida em Cartagena Colômbia 220kV (aérea-subterrânea) de propriedade da ISA

Para cada empreendimento deve ser estudada uma solução, pois as concepções a serem considerados dependem de várias circunstâncias tais como: terreno disponível, espaços existentes, exigências técnicas necessárias, aspectos ambientais, fundiários e outras mais.

De qualquer forma, para realizar qualquer transição é necessário atentar ao respeito dos critérios eletromagnéticos: campo elétrico, campo magnético, ruído audível e radio interferências. Outro ponto de extrema importante é os aspectos mecânicos, que muitas vezes são bastantes complexos devido à altura que os terminais são instalados que podem chegar de 7 a 10 metros gerando uma preocupação também para a manutenção já que os cabos isolados pesam em torno de 33kilos em cada metro.

6. RELIGAMENTO

Para as linhas híbridas, o religamento deve ser mantido no trecho aéreo se for o predominante em extensão, no caso de novo empreendimento ou se esse recurso operativo já for previsto. As linhas subterrâneas, assim como os transformadores, possuem isolamento não regenerativo. Portanto, caso não se avalie adequadamente a duração desta condição operativa, as condições de sobrecarga podem resultar em degradação do isolamento e consequente redução da vida útil. Atualmente, não existe um critério bem definido para o dimensionamento de cabos isolados em sobrecarga, sendo recomendado apenas que se observem as normas técnicas internacionais no dimensionamento.

7. REGIME DE OPERAÇÃO NORMAL E EM EMERGÊNCIA

Um aspecto a ser considerado no estabelecimento das capacidades operativas em linhas subterrâneas refere-se à duração e intervalo de tempo suportável pelos cabos isolados em condição de sobrecarga (emergência ou curta duração). A distinta natureza dos equipamentos e seus isolamentos

impõem maiores limitações aos que possuem isolamento não regenerativo, pois geralmente estão associados a um limite de tempo de permanência.

Apesar das linhas subterrâneas e subaquáticas possuírem confiabilidade muito superior às linhas aéreas, na ocorrência de defeito, os tempos de reparo típicos são consideravelmente superiores, podendo variar entre poucos dias até várias semanas ou meses em condições mais adversas. Entre a ocorrência de defeito permanente nos cabos isolados e o retorno à operação, diversas etapas deverão ser percorridas, tais como a investigação do defeito, intervenções urbanas no tráfego, escavações, remoção do trecho com cabos danificados, montagem das emendas, testes, recuperação do espaço público afetado etc. Portanto, um critério de dimensionamento ideal deve levar em consideração que uma linha subterrânea ou subaquática sob defeito poderá ficar indisponível por um longo prazo.

De acordo com as recomendações técnicas internacionais, não é razoável definir um critério geral sobre regime de curta duração para linhas subterrâneas, dadas as diferentes formas como as redes de transmissão são concebidas e operadas entre os países. Portanto, a definição de um critério de sobrecarga deve levar em consideração as particularidades de cada país ou região.

8. DESAFIOS E SOLUÇÕES

O desenvolvimento de um projeto com concepções de linhas híbridas apresenta inúmeros desafios. Para viabilizar a linha de transmissão devem ser empregadas soluções inovadoras ou pouco usuais em projetos de linhas de transmissão convencionais.

O primeiro desafio é com relação aos custos do empreendimento. A escolha de um cabo para um projeto de linha de transmissão, seja aérea, subterrânea ou subaquática, exige pesquisa entre os melhores fabricantes em busca de bons materiais condutores e isolantes, bem como cálculos de dimensionamento. O planejamento da expansão deve apresentar relatórios de análises técnicas (fluxo de potência, estabilidade e curto-circuito), estudos complementares (transitórios eletromagnéticos, otimização dos condutores, perdas elétricas e parâmetros elétricos) e todo o detalhamento socioambiental com a caracterização básica das instalações de forma a apresentar um custo competitivo com a alternativa em linha aérea. As corretas considerações das condições topográficas e socioambientais é um dos itens fundamentais nos estudos, devido a influência que as mesmas possuem no custo, prazo e consequentemente na viabilidade de implantação nos empreendimentos de transmissão, fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico.

Outro desafio é consolidar a utilização de condutores de alumínio ao invés de cobre nos cabos isolados. Para trechos subterrâneos este tipo de material para o condutor tem sido utilizado sem restrições nos últimos dez anos. Entretanto para o trecho submarino, ainda há forte reação uma vez que muitos países ainda se restringem a utilização do cobre no condutor. A solução utilizando o cabo de alumínio pode

trazer grandes ganhos competitivos devido a significativa redução de custos para o projeto.

Para trechos submarinos tem-se o desafio de desenvolver toda a logística de recebimento do cabo e realizar seu transbordo. É importante ressaltar que embora existam empresas no Brasil com conhecimento de trabalhos marítimos para o setor de exploração de petróleo, óleo e gás em alto mar, no continente sul-americano não existem empresas com experiência neste tipo de serviço em águas rasas. A contratação de empresas estrangeiras, principalmente norte americanas ou europeias pode representar um elevado custo para o empreendimento. As soluções empregadas devem buscar a menor movimentação possível do solo marinho durante o lançamento e enterramento dos cabos e evitar qualquer aproximação com a área de preservação ambiental.

Para um trecho subterrâneo, o grande desafio está direcionado a execução das obras civis de construção do banco de dutos onde serão instalados os cabos isolados. É necessário atenção especial para preservar a segurança das obras, trabalhadores e principalmente da população que transita no entorno.

Outro ponto de atenção, nos trechos com linhas subterrâneas ou subaquáticas o subdimensionamento da seção do cabo condutor pode ocasionar uma restrição na capacidade de corrente e o sobredimensionamento onera a instalação de forma desnecessária.

Por fim, a definição de uma metodologia de dimensionamento para linhas híbridas é uma necessidade, uma vez que os custos de instalação são mais elevados que os de uma linha de transmissão aérea convencional.

9. REFERÊNCIAS

- A.J. de Oliveira Lima, W.J. Lee, F.G de Oliveira. (2009). *Transição de Linhas de Transmissão Aérea para Subterrânea: para cada instalação uma solução diferente*. Encontro regional Ibero-Americano do CIGRÉ - XIII ERIAC. Argentina.
- CIGRÉ BRASIL – Grupo de Trabalho B1.05. (2016). *Acoplamento de Linhas de transmissão aéreas e subterrâneas-Recomendações - Técnicas para as Concessionárias Brasileiras*. Rio de Janeiro.
- Eduardo K. F., Waldir G., Roberto D. T. J., Sérgio L. C., (2009). *Ramal de transição aéreo x subterrâneo alimentação da subestação Recreio em 138kV*. Encontro regional Ibero-Americano do CIGRÉ - XIII ERIAC.
- EPRI. (1982). *Transmission line reference book, 345 kV and above.. 2 edition. Pittsfield : Electric Power Research Institute*.
- IEC 60287-1-1.(2006). *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100% load*

factor) and calculation of losses - general, Edition 2.0, Amendment 1.

IEC 60287-2-1. (2015). *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2-1: Thermal resistance – calculation of thermal resistance, Edition 2.0.*

IEC 60287-3-1. (2017). *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 3-1: Operating conditions – Site reference conditions, Edition 2.0.*

IEC 60853-2. (2008). *Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables – Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30(36) kV and emergency ratings for cables of all voltages, Amendment 1*

IEC 62067. (2011). *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150kV (Um = 170kV) up to 500kV (Um = 550kV) – Test methods and requirements, Edition 2.0.*

Joao H. M. A., Dourival S. C. J.; Sergio F. F. L.; Fabiano S.; Carlos B. C. C. (2019). *Linhas de transmissão com cabos isolados de alta e extra alta tensão no Brasil: uma realidade com demanda crescente*. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - XXV SNPTEE, Belo - Horizonte, MG.

Vinicius S. L., Emmanuel P. M.; José V. P. J., Chander P. M. S., Thiago M. V. P., Paulo E. A. J. (2019). *Flexibilização do sistema elétrico em região litorânea de forma compacta: adotando linha de transmissão mista (aérea + subterrânea)*. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. XXV SNPTEE, Belo -Horizonte, MG.