

UTILIZAÇÃO DE FEIXE EXPANDIDO DE CONDUTORES APLICADOS A LINHAS DE TRANSMISSÃO NA CLASSE DE 500 kV.

USE OF CONDUCTORS EXPANDED BUNDLE APPLIED TO 500 kV CLASS POWER LINES.

TABOSA, Felipe de Abreu¹
SILVA, Alex de Lima e²

Resumo: Este artigo tem como objetivo difundir a tecnologia e analisar os aspectos técnicos e econômicos da utilização de feixe expandido de condutores, quando aplicados a linhas de transmissão na classe de 500 kV, suas características, aplicações e benefícios.

Palavras-chave: Energia elétrica; Transmissão de energia; Linhas de transmissão; Feixe expandido - FEX; LPNE; Otimização.

Abstract: *This paper has as objective disseminate the technology and analyze technical and economical aspect of the conductor expanded bundle use, when applied to power lines in the 500 kV class, their characteristics, applications and benefits.*

Keywords: *Electrical energy; Energy transmission; Power lines; Conductors expanded bundle; HSIL; Optimization.*

¹Graduando em Engenharia Elétrica – Universidade Santa Úrsula – felipe.tabosa@souusu.com.br

²Mestre em Engenharia Elétrica – Universidade Santa Úrsula – alex.lima@usu.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Nas próximas páginas serão expostas informações e características referentes a um modelo de transmissão de energia elétrica através de feixe de cabos condutores com geometria expandida. Para que a compreensão do assunto seja possível para todos os leitores, é importante uma breve introdução acerca do Sistema Interligado Nacional – SIN e suas características.

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL expõe em seu sítio:

A energia elétrica é um insumo essencial à sociedade, indispensável ao desenvolvimento socioeconômico das nações. No Brasil, a principal fonte de geração é a hidrelétrica (água corrente dos rios), que responde por 62% da capacidade instalada em operação no país, seguida das termelétricas (gás natural, carvão mineral, combustíveis fósseis, biomassa e nuclear), com 28%. O restante é proveniente de usinas eólicas (energia dos ventos) e importação da energia de outros países. As geradoras produzem a energia, as transmissoras a transportam do ponto de geração até os centros consumidores, de onde as distribuidoras a levam até a casa dos cidadãos. Há ainda as comercializadoras, empresas autorizadas a comprar e vender energia para os consumidores livres (geralmente consumidores que precisam de maior quantidade de energia). (ANEEL 2020).

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas, porém com presença de fontes térmicas e eólicas na geração de energia consumida no país e com múltiplos proprietários. (ONS, 2020).

Como o Brasil é um país de extensões geográficas de níveis continentais, o sistema elétrico é dividido em quatro subsistemas interligados (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte), de forma a obter ganhos sinérgicos e permitir a exploração estratégica da geração de energia hidráulica, devido aos diferentes regimes hidrológicos das bacias hidrográficas.

A interligação entre subsistemas é possível graças a uma rede confiável de linhas de transmissão, conhecida como rede básica, que garante a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica para a maior parte do país. Vale ressaltar que parte da região norte ainda possui sistemas isolados que não estão conectados ao Sistema Interligado Nacional – SIN.

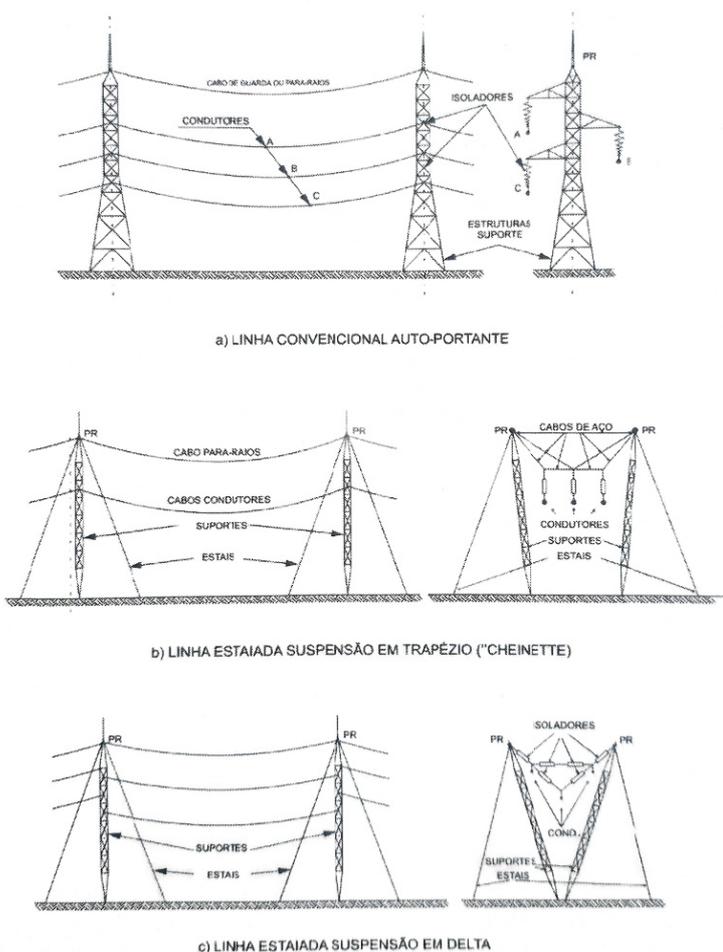
O entendimento básico a respeito da implantação e operação de uma linha de transmissão é necessário para melhor entendimento do tema proposto, desta forma os componentes básicos de uma linha de transmissão aérea serão expostos no início deste artigo.

2. COMPONENTES BÁSICOS DE UMA LINHA ÁEREA DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE ALTERNADA

O desempenho de uma linha de transmissão de energia elétrica pode ser resumido em duas partes, à capacidade de resistência das estruturas frente aos esforços mecânicos os quais estão submetidas e à suportabilidade elétrica de seus componentes isolantes, assim como seu desempenho técnico do ponto de vista elétrico. Ambos devem ser considerados de forma concomitante. Rubens Dario Fuchs, em seu livro “Transmissão de energia elétrica”, afirma:

Uma linha de transmissão se compõe das seguintes partes principais, a saber: Cabos condutores de energia e acessórios; Estruturas isolantes; Estruturas suporte; Fundações; Cabos de guarda ou para-raios; Aterramentos; Acessórios diversos. (Fuchs, 2015).

Figura 1 – Principais elementos das linhas de transmissão



Fonte: Fuchs, 2015

O fator econômico deve ser considerado de igual importância aos fatores técnicos para a viabilidade de um projeto.

2.1. Condutores

Os cabos condutores de uma linha de transmissão são guias para os agentes de transporte da energia elétrica, que são os campos elétricos e campos magnéticos. A minimização de perdas de energia por efeitos Joule e efeito Corona é de singular importância para a escolha e dimensionamento dos cabos de uma linha, assim como os aspectos ambientais e os esforços mecânicos os quais a linha de transmissão estará submetida.

As condições climáticas do local de construção de uma linha como a temperatura e a incidência de vento atmosférico, afetam as forças axiais necessárias para a suspensão dos cabos condutores. O vento atmosférico também ocasiona vibração nos condutores que podem ocasionar ruptura por fadiga junto aos pontos de fixação ou ancoragem dos cabos.

As equações que regem os cálculos para determinação do dimensionamento das linhas não serão aprofundadas neste trabalho, por não se tratar do seu tema principal, contudo podem ser encontradas na norma brasileira para projetos de linhas de transmissão, NBR-5422.

No Brasil os cabos são especificados pela área de sua seção transversal em milímetros quadrados e pelo número de fios em sua composição. São regulados pelas normas técnicas NBR-7271 e ASTM-B-231 (Cabos de alumínio – CA), NBR-7270 e ASTM-B-232 (Cabos de alumínio com alma de aço - CAA).

Os cabos de alumínio – CA, são designados por nomes de flores na língua inglesa como, por exemplo:

- *Lilac* – Composto por 61 fios de alumínio e uma área de 403,2mm²;
- *Arbustus* – Composto por 37 fios de alumínio e uma área de 403,2mm²;
- *Tulip* – Composto por 19 fios de alumínio e uma área de 170,58mm².

Os cabos de alumínio com alma de aço – CAA são utilizados quando há maior necessidade de resistência mecânica, desta forma o fio ou a camada central do cabo é produzida em aço galvanizado. Nas normas ASTM os cabos são conhecidos por nomes de aves, também na língua inglesa. Por exemplo:

- *Penguin* – Composto por um fio de aço e seis fios de alumínio e uma área de 125,09 mm², tração nominal de ruptura igual a 37,167 kN;
- *Kingbird* – Composto por um fio de aço e 18 fios de alumínio e uma área de 340,25 mm², tração nominal de ruptura igual a 69,823 kN;
- *Rook* – Composto por sete fios de aço e 24 fios de alumínio e uma área de 340,25 mm², tração nominal de ruptura igual a 100,812 kN;
- *Grosbeak* – Composto por sete fios de aço e 26 fios de alumínio e uma área de 374,79 mm², tração nominal de ruptura igual a 135,136 kN;

Os fios de aço galvanizado não são considerados nos cálculos elétricos, pois, não participam da condução de corrente elétrica. Sua função se restringe a sustentação mecânica.

2.2. Isoladores e ferragens

Os isoladores têm por finalidade garantir que os condutores carregados fiquem eletricamente isolados de seus suportes e do solo. Nas linhas aéreas de transmissão o isolamento é garantido pelo ar, desde que sejam respeitadas as distâncias elétricas de segurança. E em suas estruturas, os condutores são ancorados ou suspensos por cadeias de isoladores.

Basicamente nas linhas de transmissão são aplicados três tipos de isoladores: Isoladores de pino; Isolador tipo pilar ou coluna; E isolador de suspensão.

Para as linhas de transmissão de 500 kV, objeto de interesse deste trabalho, são mais utilizadas cadeias de isoladores de suspensão. Os isoladores de suspensão podem ser do tipo monocorpo ou isolador de disco.

Isoladores do tipo monocorpo são feitos de uma única peça, atualmente fabricado com material polimérico, mas também é possível encontrar isoladores deste tipo fabricados em porcelana ou vidro.

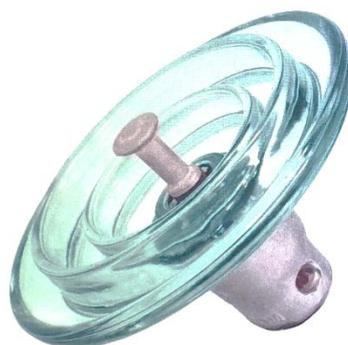
Figura 2 – Isolador polimérico do tipo monocorpo (Shemar)



Fonte: Acervo próprio, 2020

Isoladores de disco são compostos por um corpo isolante cimentado a ferragens, as unidades isoladoras individuais, os discos, são fabricados em vidro (para tensões elevadas) são conectados entre si formando assim uma cadeia de isoladores. Com isso possibilitam maior liberdade de movimento entre as unidades quando comparado aos outros tipos de isoladores.

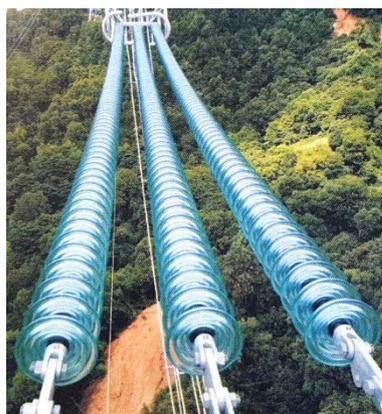
Figura 3 – Isolador tipo disco (Grantel)



Fonte: Acervo próprio, 2020

Este tipo de cadeia de isoladores possui sistemas de engate padronizados por norma, a nível internacional. Estes sistemas de engate do tipo concha-bola e garfo-olhal facilitam a manutenção em linha viva, evitando o desligamento da linha de transmissão.

Figura 4 – Instalação de cadeia de isoladores (Sichuan)



Fonte: Acervo próprio, 2020

Ferragens são um conjunto de peças que completam a cadeia de isoladores, sua função é suportar os cabos que as ligam as estruturas. As ferragens modernas são projetadas de forma a manter sua geometria sem protuberâncias angulosas, a fim de reduzir a ocorrência de

gradientes de potencial que ocasionam o efeito Corona. É importante que o material das ferragens e acessórios sejam compatíveis eletroliticamente com os cabos de alumínio ou suas ligas, para que não ocorra corrosão galvânica.

2.3. Estruturas das linhas

As estruturas das linhas, popularmente conhecidas como torres de transmissão, desempenham duas funções nas linhas aéreas de transmissão. Permitem a fixação dos cabos condutores, através de aparatos isolantes, garantindo as distâncias elétricas de segurança entre os condutores energizados, entre estes e o solo, assim como entre os condutores e a própria estrutura de suporte, também garante a amarração da linha de transmissão ao terreno através de suas fundações, transmitindo ao solo todo esforço ao qual estão submetidas às linhas de transmissão.

Para o dimensionamento das estruturas devem ser considerados os aspectos elétricos e mecânicos, garantindo as distâncias de segurança necessárias por classe de tensão e as dimensões para resistência aos esforços a que são submetidas às linhas aéreas de transmissão.

A disposição dos cabos condutores é outro fator de grande relevância para a definição das dimensões de uma estrutura, entre as três disposições básicas mais utilizadas, podem ser definidos diversos tipos de estruturas. O emprego das disposições dos condutores se resume da seguinte forma:

Disposição em plano horizontal – Todos os condutores ficam alinhados horizontalmente, é a disposição que exige estruturas de menor altura;

Disposição em plano vertical – Nesta disposição os condutores encontram-se alinhados verticalmente, este modelo é mais utilizado em linhas de circuito simples com limitações nas faixas de servidão. Facilmente encontradas paralelas as vias públicas.

Disposição triangular - Os condutores são dispostos nos vértices de um triângulo imaginário, resulta em estruturas e alturas intermediárias, ficando entre os dois modelos anteriores.

Na parte superior de todas as estruturas de uma linha de transmissão, são fixados cabos guarda, ou pára-raios, que quando adequadamente localizados em relação aos condutores reduzem a exposição direta dos condutores às descargas atmosféricas.

2.3.1. Classificação das Estruturas

As estruturas de suporte podem ser classificadas em função das cargas atuantes sobre as mesmas e quanto a forma de resistir aos esforços a elas submetidos.

Quando classificadas em função das cargas atuantes, existem seis tipos de suportes:

- Tipo suspensão ou alinhamento;
- Tipo terminal ou ancoragem total;
- Tipo ancoragem intermediária;
- Tipo ângulo ou deflexão;
- Tipo para transposição de fases.

A classificação quanto à forma das estruturas resistirem, se divide em dois tipos:

- Estruturas autoportantes;
- Estruturas estaiadas.

Figuras 5 e 6 – Exemplos de estrutura estaiada e autoportante (LT 500 kV Ibicoara – Sapeaçu)



Fonte: Acervo próprio, 2020

3. LINHAS DE TRANSMISSÃO NÃO CONVENCIONAIS

Na década de 90, iniciaram-se no Brasil estudos para viabilizar a transmissão de energia gerada na região norte do Brasil, com grande potencial hídrico, para os grandes centros de consumo localizados na região sudeste do país.

Foi através destes estudos que surgiram as idéias de linhas de transmissão não convencionais, maximizando a potência transmitida e fixando valores para a reatância série das linhas, característica importante para a operação e confiabilidade do sistema.

Um dos tipos de linhas de transmissão não convencionais utiliza feixe de cabos condutores no lugar de um único condutor por fase, de forma que os fenômenos eletromagnéticos envolvidos maximizem o potencial transmitido.

Porém, como elucida Pierre Mendonça em sua tese “Otimização dos feixes de condutores de linhas de transmissão em corrente alternada”:

A determinação de feixes ótimos de condutores envolve uma série de características relacionadas aos seus cabos como: suas alturas em relação ao solo, distâncias entre si, número de condutores e suas bitolas. A configuração do feixe de condutores é fator determinante de muitas características relevantes em uma linha de transmissão, de forma que estas podem ser usadas tanto como critério de otimização quanto como restrições de projeto. (MENDONÇA, 2002).

Devido a este fato, para o desenvolvimento deste artigo serão realizados estudos de casos onde as características envolvidas no projeto da linha de transmissão já são conhecidas.

4. LINHA DE POTÊNCIA NATURAL ELEVADA - LPNE

“O conceito básico da tecnologia LPNE é maximizar o campo elétrico superficial em cada um dos subcondutores das fases da linha de transmissão. Em geral os arranjos otimizados apresentam os sub-condutores das fases, expandidos e uma aproximação das fases.” (DART, 2005).

Por suas características, este tipo de linha de transmissão é aplicado para o transporte de muita energia por longas distâncias, permitindo uma interligação robusta entre os subsistemas e garantindo maior confiabilidade ao Sistema Interligado Nacional – SIN.

As linhas de transmissão com a tecnologia LPNE apresentam reatância série reduzida, o que gera impacto positivo na estabilidade transitória.

Além da reatância série reduzida, as linhas de transmissão com a tecnologia LPNE apresentam aumento na potência natural ou *Surge Impedance Loading* - SIL, Os fatores que

influenciam no acréscimo do SIL ou diminuição da reatância indutiva são: O aumento do número de subcondutores do feixe; A redução do espaçamento entre as fases; Expansão do feixe; Aumento do diâmetro do condutor.

4.1. Potência natural ou *Surge Impedance Loading - SIL*

O aumento da potência natural ocorre quando a impedância própria da linha é reduzida e a impedância mútua é elevada. Com uma potência natural mais alta as linhas de potência natural elevada apresentam ganhos quando comparadas as linhas de transmissão tradicionais.

Tabela 1 – Comparativo por classe de tensão entre a potência natural em linhas de transmissão tradicionais e linhas LPNE.

Tensão (kV)	SIL – LT tradicional (MW)	SIL – LPNE (MW)
69	9-12	10-40
138	40-50	50-120
230	120-130	130-440
500	950-1000	1000-2000

Fonte: Dart, 2005

4.2. Feixe expandido - FEX

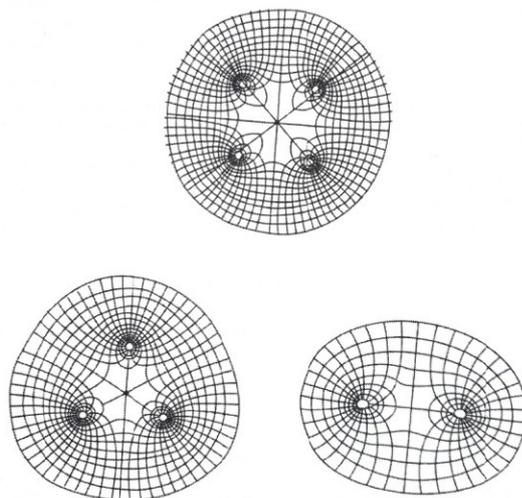
Em relação a cabos condutores para linhas em extra alta tensão – EAT. Rubens Dario Fuchs, em seu livro “Transmissão de energia elétrica”, escreveu:

Em 1908, Thomas A. Edison sugeriu o emprego de mais de um condutor por fase, montados paralelamente entre si a pequenas distâncias. Com isso seria possível uma redução substancial da impedância das linhas, em especial de sua reatância, permitindo uma melhoria substancial em sua regulação. Os condutores utilizados seriam de fabricação normal, existentes no mercado e mantidos separados entre si por meio de vãos espaçadores adequados. Verificou-se que o grau de redução da sua reatância indutiva dependia do número de subcondutores e do espaçamento entre eles. O feixe, assim formado comportava-se como se fosse utilizado um cabo de diâmetro muito alto, o que o levou a concluir que os campos magnéticos individuais dos subcondutores se compunham para formar um único, semelhante àquele devido a um cabo único de grande diâmetro, suspenso no centro em lugar do feixe. O mesmo acontece com os campos elétricos, resultando em um elevado aumento na capacitância das linhas. (FUCHS, 2015).

Por questões de estabilidade mecânica, os subcondutores são montados igualmente espaçados sobre a periferia de um círculo. O uso de cabos múltiplos não ficou limitado a linhas de extra

alta tensão – EAT, existem muitas linhas de 230 kV empregando mais de um cabo por fase no Brasil.

Figura 7 – Campos elétricos de condutores múltiplos



Fonte: Fuchs, 2015

O termo feixe expandido é utilizado para diferenciar feixes de condutores com espaçamento maior entre eles, nas três fases de uma linha de transmissão em corrente alternada.

Linhas de transmissão da classe de 500 kV tradicionais apresentam feixe de quatro condutores por fase. A maioria dos condutores disponíveis no mercado, quando dispostos na forma de quadro para o feixe de quatro condutores por fase adequam-se a faixa de 700 a 1000MW de potência.

Segundo o Engenheiro Sebastião Cavalcante em seu informe técnico “Adequação e otimização integrada ao sistema, do projeto a operação, utilizando-se novas técnicas no atendimento aos processos licitatórios”, somente três arranjos de condutores alcançam a resistência ôhmica mínima para linhas de transmissão de 1,2 GW, solicitada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL a época. A saber:

- Feixe de quatro condutores: CAA 4. *Rail*;
- Feixe de quatro condutores: CAAL 4. *Rail*;
- Feixe de três condutores: 3. *Bunting*.

Ainda em seu informe, Cavalcante sugere a alternativa de feixe expandido com três condutores por fase em geometria triangular para o atendimento a potência natural de 1,2 GW e economia com os custos de implantação:

O trinato solicita 14% menos carga de vento às torres que o 4. CAAL ~Rail, par ao mesmo peso de feixes, na mesma altura e vão, e 16% menos de peso e vento que o clássico 4.CAA Rail, no mesmo SIL e perdas. A relação de peso/vento do 3.CAAL (que dimensiona a faixa) é igual à do 4.CAA (o 4.CAAL é 20% maior) e a possibilidade de corrosão é menor. (CAVALCANTE, 2001)

Os custos de implantação de uma linha de transmissão são calculados caso a caso e desta forma não é simples formular um modelo geral, contudo é possível observar na tabela a seguir, baseada nas condições expostas anteriormente, uma tendência de menor custo para o feixe expandido quando comparado a demais feixes instalados no mesmo tipo de estrutura (*cross-rope*), com a maior altura útil e locada em terreno plano, cada feixe ajustado para a potência de 1,2 GW e resistência ôhmica muito semelhante. Valores da tabela referentes a março de 2001, corrigidos para setembro de 2020, através do IGP-M.

Tabela 2 – Custo comparativo em R\$1000/km, cadeias tipo IVI

Condutores Nº x Código	Resistência ôhmica (Ω/km)	Material + Mão de obra	% em relação ao feixe 4.Rail
11 x Linnet	189E-7	1750,78	139,6
6 x Grosbeak	184E-7	1452,16	115,8
4 x Rail	186E-7	1253,81	100,0
6 x Dove	180E-7	1335,26	106,5
5 x Tern	166E-7	1362,18	108,6
3 x Bunting	189E-7	1182,04	94,3

Fonte: Adaptada de Cavalcante, 2001

“Ressalva-se sempre que a otimização conjunta só é aplicável partindo dos parâmetros elétricos planejados e considerando as condicionantes específicas de cada LT e Empresa. ” (Cavalcante, 2001).

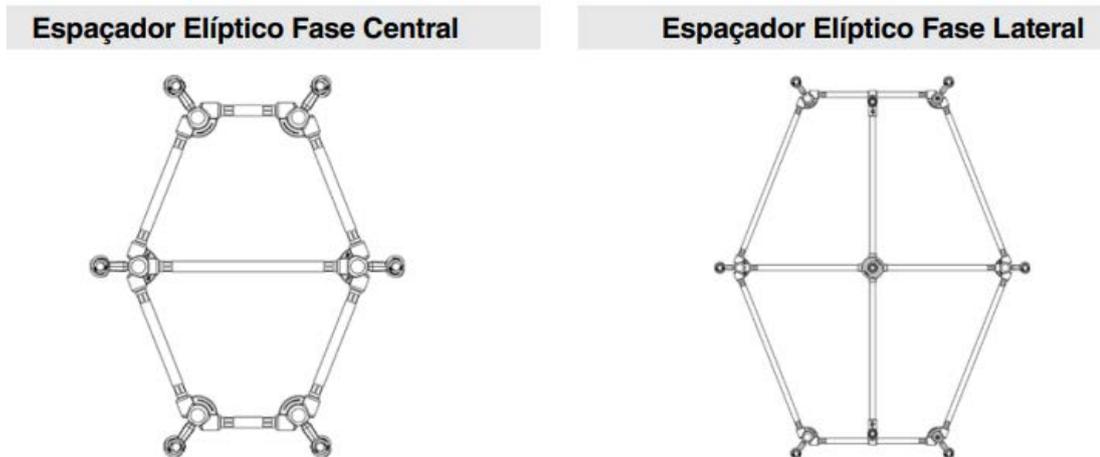
A separação e estabilidade do feixe de subcondutores são garantidas através da instalação de espaçadores que atenuam as oscilações e vibrações causadas por ventos atmosféricos, além de manter sua equalização elétrica.

Figura 8 – Espaçador amortecedor preformado (PLP)



Fonte: PLP Brasil, 2020

Figura 9 – Espaçador amortecedor preformado para feixe expandido (PLP)



Fonte: PLP Brasil, 2020

4.3. Elevação da potência natural em novas linhas de transmissão e alternativas

Estudos mais recentes para a expansão e planejamento do setor elétrico propuseram a implementação de linhas de transmissão da classe de 500 kV com potência natural na ordem de 1600 MW em pontos estratégicos da rede básica.

Segundo o Engenheiro André Hoffmann em seu informe técnico “LPNE de 1670 MW com subfeixes de condutores (Splitfex)”:

“As linhas tipo LPNE de 500 kV com SIL (*Surge Impedance Loading*) de 1670MW e feixe de seis cabos, foram concebidas para uso de torres tipo crossrope, as quais são apropriadas para terrenos planos e solos de boa resistência mecânica.” (Hoffmann, 2019).

Devido à extensão continental do país, diferentes tipos de relevo estão presentes ao longo do traçado de uma linha de transmissão, o que dificulta a locação deste tipo de torre (crossrope) em todos os pontos, necessitando a utilização de torres autoportantes mais pesadas, sendo assim mais onerosas ao projeto, para a garantia da potência transmitida (SIL).

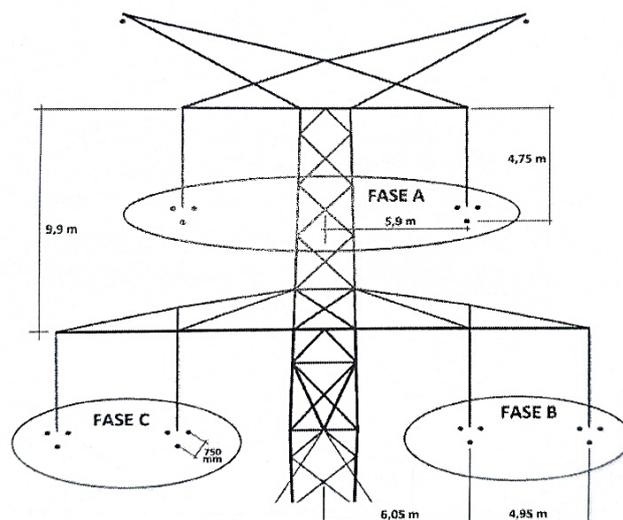
Desta forma a comunidade científica e as empresas atuantes no setor de transmissão, estão desenvolvendo novas tecnologias para contornar as dificuldades encontradas na implementação deste tipo de LPNE.

Como exemplo temos umas das novas tecnologias propostas como alternativa, denominada *Splitfex*.

Hoffmann propõe a substituição do feixe elíptico tradicional por uma nova configuração onde os feixes são divididos em dois ou mais subfeixes de dimensões menores. Com isso é viabilizado o uso de uma nova série de estruturas onde as cadeias de isoladores são conectadas diretamente a torre, o que anula o balanço assíncrono dos feixes e facilita os serviços de manutenção de condutores e cadeias, garantindo o SIL elevado e menores dimensões de faixa de servidão.

Possibilitando a locação de estruturas em terrenos mais acidentados e reduzindo os custos fundiários da construção da linha, assim como a redução do impacto ambiental com a redução da faixa de passagem.

Figura 10 – Configuração em *Splitfex* para 500 kV e 1670 MW



Fonte: Hoffmann, 2019

A necessidade de alternativas aos desafios encontrados para a implementação deste tipo de linha de transmissão abre portas para o estudo da transmissão de energia elétrica sob diferentes pontos de vista, o que agrega valor ao setor e aumenta a competitividade no mercado.

5. ESTUDO DE CASO

Para demonstrar na prática as teorias expostas foi realizado um estudo sobre a definição dos cabos condutores a serem utilizados nas linhas de transmissão dos lotes um a quatro da licitação 013/2015 do leilão de transmissão da ANEEL, sendo estas:

- LT 500 kV Sapeaçu – Poções;
- LT 500 kV Poções – Padre Paraíso;
- LT 500 kV Padre Paraíso 2 – Governador Valadares 6.

Em complemento foi realizada visita técnica na região da Subestação Poções, na cidade de Poções, estado da Bahia, onde foram realizados registros fotográficos destas mesmas linhas.

Os parâmetros que justificam a utilização do feixe de seis condutores nas linhas foram o SIL mínimo da ordem de 1780 MW e reatância de no máximo $0,192 \Omega/\text{km}$.

Uma alternativa a utilização do feixe sêxtuplo, seria a utilização de um feixe quádruplo que permitiria a obtenção dos mesmos parâmetros. Esta alternativa poderia gerar uma expressiva economia nos custos das linhas de transmissão, visto que os cabos condutores representam o maior custo na construção. Contudo a utilização do feixe de quatro condutores foi descartada devido aos seguintes fatores:

Para que a capacidade térmica fosse mantida e não houvesse excessiva redução no gradiente da superfície dos condutores, a seção dos condutores deveria ser aumentada por volta de 10%, o que encareceria o custo por quilometro da linha de transmissão.

Para que a alternativa alcance os parâmetros de SIL e reatância solicitados, o feixe deveria ser expandido, aumentando assim o espaçamento entre as fases e garantindo as distâncias elétricas, por questões de segurança. No entanto o distanciamento entre fases ocasiona redução no SIL e aumento da reatância, causando efeito contrário ao desejado.

A tabela a seguir compara os valores referentes ao feixe de seis condutores por fase com alternativas de quatro condutores por fase.

Verificando a tabela é possível notar, que mesmo com um significativo aumento no lado do feixe quádruplo, não foi possível chegar aos valores referenciais de reatância máxima e potência mínima, tornando economicamente inviável a utilização de feixe com quatro condutores por fase.

Tabela 3 – Valores comparativos para casos de expansão de feixes quádruplos

Lado do hexágono – referência (mm)	Diâmetro do Feixe (mm)	Reatância X1 (Ω/km)	Potência SIL (MW)	Espaçamento entre fases (m)
1063	2126	0,189	1681	6,50
Lado do feixe quadrado (mm)	Diagonal do quadrado (mm)	Reatância X1 (Ω/km)	Potência SIL (MW)	Espaçamento entre fases (m)
1500	2121	0,211	1513	6,50
2000	2828	0,203	1579	7,21
2500	3536	0,197	1626	7,92

Fonte: Nolasco, 2016

A região de abrangência do corredor determinado pelos relatórios de análise socioambiental da ANEEL, no interior do estado da Bahia, apresenta relevo majoritariamente plano ou levemente ondulado, o que permite uma maior exploração do uso de estruturas estaiadas do tipo *crossrope*, que possuem menor custo relativo quando comparado aos demais tipos de estruturas autoportantes. Isso somado a dificuldade na utilização do feixe de quatro condutores por fase, confirmou a escolha pelo feixe expandido de seis condutores por fase.

Durante a visita foi observada a robustez das estruturas autoportantes para garantir a resistência aos esforços demandados, assim como a complexidade de suas cadeias de isoladores e ferragens que mantém as distâncias de segurança conforme projeto.

Na área ao redor da Subestação Poções foram observados pontos de cruzamentos entre linhas de transmissão com seis condutores por fase, na figura 10 é possível ver ao fundo uma estrutura autoportante de altura significativa aguardando o lançamento de seus condutores para a entrada na subestação.

Durante a visita foi notado vento atmosférico constante no local de observação e a atuação dos amortecedores de vibração do tipo *stock bridge* nos cabos condutores, garantindo pouca oscilação nos feixes de cabos condutores e para raios. A intensidade de ruído audível também foi notada, mas com intensidade menor que o esperado, não foram realizadas medições de ruído audível.

Em trechos com maior presença de estruturas estaiadas do tipo *crossrope* quando observado de certa distância, tem sua beleza cênica preservada quando comparados a trechos de estruturas autoportantes, a esbeltez de suas formas reduz o impacto visual, o que pode ser percebido na figura 15.

Figura 11 – Estrutura autoportante de ângulo com feixe expandido de condutores nas proximidades da SE Poções



Fonte: Acervo próprio, 2020

Figura 12 – Cruzamento entre linhas de transmissão com feixe expandido de condutores



Fonte: Acervo próprio, 2020

Figura 13 – Estrutura autoportante de suspensão com feixe expandido de condutores.



Fonte: Acervo próprio, 2020

Figura 14 – Estrutura estaiada de suspensão do tipo *crossrope*, com feixe expandido de condutores.



Fonte: Acervo próprio, 2020

Figura 15 – Detalhe dos espaçadores para feixe expandido de condutores instalado em uma estrutura estaiada do tipo *crossrope*



Fonte: Acervo próprio, 2020

Figura 16 – Detalhe do relevo levemente ondulado com a presença da LT 500 kV Ibicoara – Poções ao fundo



Fonte: Acervo próprio, 2020

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), as linhas de transmissão de 500 kV representavam aproximadamente 36% da rede básica do SIN (Sistema Integrado Nacional) no ano de 2019, ficando atrás somente das linhas de transmissão de 230 kV que representavam 38% no mesmo período. Em um horizonte de cinco anos, existe a expectativa que as linhas de transmissão de 500 kV passem a representar 41% da rede básica, tornando-se assim a maior parcela dentro do SIN no ano de 2024, desta forma, torna-se necessário o aprimoramento de tecnologias existentes e novas soluções para a implantação destas linhas previstas no planejamento de ampliações e reforços do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.

A utilização do feixe expandido de condutores, apesar de já estar inserido na comunidade científica e grupos de estudos ligados ao setor de transmissão de energia elétrica, ainda é motivo de muitos debates técnicos e questionamentos quanto a sua viabilidade técnica e econômica, garantindo oportunidade de estudo e trabalho para os novos engenheiros que pretendem seguir carreira na transmissão de energia elétrica.

Todo e qualquer avanço tecnológico no setor elétrico, traz consigo benefícios a população brasileira, que vem crescendo. Junto a este crescimento temos o aumento da demanda por energia elétrica e a saturação da malha elétrica nas proximidades de grandes centros urbanos, desta forma o setor de transmissão de energia, assim como os demais dentro do Sistema Elétrico de Potência - SEP, apresenta grande importância social para o desenvolvimento e o crescimento sustentável do país.

REFERÊNCIAS

ABNT, **NBR 5422 NB 182**. Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, mar. 1985.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Leilões de Transmissão**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/transmissao4>>. Acesso em: 09 de março de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Saiba mais sobre o setor elétrico brasileiro**. Disponível em:<<https://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 04 de outubro de 2020.

CAVALCANTI, Sebastião J. Gusmão. **Condutores nus em feixes para LT EAT / UAT: Adequação e otimização integrada ao sistema, do projeto à operação, utilizando-se novas técnicas no atendimento aos processos licitatórios**. In: Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 16, 2001, Campinas. p. 1 – 6.

DART, Fernando C.. **Projetos de linhas de transmissão não convencionais – Uma alternativa a ser considerada no planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro**. In: Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 18, 2005, Curitiba. p. 1 – 8.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Programa de Expansão da Transmissão (PET/PELP)**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/programa-de-expansao-da-transmissao-plano-de-expansao-de-longo-prazo-pet-pelp>>. Acesso em: 11 de março de 2020.

FUCHS, Rubens Dario. et al. **Transmissão de energia elétrica**. Uberlândia: EDUFU, 2015.

HOFFMANN, André. **LPNE de 1670 MW com subfeixes de condutores (splitfex)**. In: Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 25, 2019, Belo Horizonte. p. 1 – 7.

LABEGALINI, Paulo Roberto. et al. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. São Paulo: Edgard Blücher2, 1992.

MACHADO, Vanderlei Guimarães. **LT 500 kV interligação norte / sul III – Trecho 2: Solução estrutural com torre estaiada monomastro e feixe expandido**. In: Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 19, 2007, Rio de Janeiro. p. 1 – 8.

MENDONÇA, Pierre Novis. **Otimização dos feixes de condutores de linhas de transmissão em corrente alternada**. (Tese de mestrado)In: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002, Rio de Janeiro. p. 1 – 101.

NOLASCO, João F.**Estudo preliminar comparativo entre os feixes de condutores 6xCAA795(Tern), 6xACAR850(30/7) e 6xCAL833(37Fios) para LTs 500kV Sapeçu - Poções, Poções - Padre Paraíso e Padre Paraíso 2 – Governador Valadares 6**. In: Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A., 2016, Rio de Janeiro. p. 1 – 13.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano da operação elétrica 2019/2020 - PEL 2018.** Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/acervo-digital/documentos-e-publicacoes>>. Acesso em: 11 de março de 2020.

PLP BRASIL. **Catálogo de produtos.** Disponível em: <<http://plp.com.br/area-de-downloads/>> Acesso em: 11 de outubro de 2020.