

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DIOGO SANTOS STELMACH**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

**ESTUDO COMPARATIVO DE CONFIGURAÇÕES  
GEOMÉTRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 500KV**

Porto Alegre  
(2009)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO COMPARATIVO DE CONFIGURAÇÕES  
GEOMÉTRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 500KV**

Projeto de Diplomação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Ruy Carlos Ramos de Menezes

Porto Alegre  
(2009)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIOGO SANTOS STELMACH

## **ESTUDO COMPARATIVO DE CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 500KV**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ruy Carlos Ramos de Menezes, UFRGS  
Doutor em Engenharia pela Universidade de Innsbruck –  
Innsbruck, Áustria

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ruy Carlos Ramos de Menezes, UFRGS  
Doutor em Engenharia pela Universidade de Innsbruck – Innsbruck, Áustria

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS  
Doutor pela Universidade do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Eng. Luiz Osório Flores Cabral, UFRGS  
Engenheiro pela Universidade do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2009

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família, meus pais e minha irmã, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Julio Stelmach e Mara Rozane pela formação, incentivo e apoio ao longo desses anos.

À minha irmã Viviane Stelmach, que me ajudou e incentivou ao longo do curso de engenharia.

À minha namorada Mônica, pelo apoio incondicional, companheirismo, carinho e ajuda na reta final do curso e neste Projeto de Diplomação.

Aos meus colegas de trabalho pela paciência comigo nos momentos difíceis e nervosos nas épocas de provas e no final de curso.

Aos colegas e grandes amigos ao longo deste curso, Daniel Ferreira, Eduardo Marques, Jovani Balbinot, Rafael Rech e Tiago Meirelles. Em especial ao “fiel escudeiro” Leandro Krummenauer, vulgo John, ao longo de toda esta jornada, parceiro de longas noites de estudo e de muita festa.

Ao estimado professor Ruy por me orientar neste trabalho e me motivar em um campo de estudo muito interessante e promissor.

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta um estudo comparativo de diversas configurações geométricas para o arranjo de condutores de uma linha de transmissão de 500kV. São analisados, dentro do conceito de Linha de Potência Natural Elevada – LPNE, as técnicas de compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores, quanto aos aspectos de acoplamentos elétricos e quanto às suas influências nos parâmetros elétricos de seqüência positiva e seqüência zero. O estudo comparativo visa à diminuição da impedância característica e o conseqüente aumento da Potência Natural da linha de transmissão.

**Palavras-chaves:** **Linha de Transmissão, Linha de Potência Natural Elevada, LPNE, Potência Natural, Compactação Entre Fases, Feixe Expandido, Linha Compacta, High Surge Impedance Load, HSIL.**

## **ABSTRACT**

This work presents a comparative study of various geometric configurations for the arrangement of conductors of a transmission line of 500kV. Are analyzed, within the concept of High Surge Impedance Loading - HSIL, techniques of compression between phases and expansion of the bundle subconductors in regard to its electrical coupling and about their influence on electrical parameters of positive sequence and zero sequence. The comparative study aims to decrease the characteristic impedance and the consequent increase of Surge Impedance transmission line.

**Keywords: Transmission Line, High Surge Impedance Loading, HSIL, Surge Impedance, Compression Between Phases, Expanded Bundle, Compact Line.**

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 Motivação .....	13
1.2 Estrutura do Trabalho .....	14
1.3 Objetivos.....	14
1.4 Limitações do Trabalho .....	15
<b>2 CONCEITOS BÁSICOS .....</b>	<b>16</b>
2.1 Diagrama de uma Linha de Transmissão .....	16
2.2 Impedância Característica.....	17
2.3 Potência Natural .....	18
2.4 Resistência .....	20
2.5 Impedância de Seqüência Positiva .....	20
2.5.1 Indutância e Reatância Indutiva .....	21
2.6 Impedância de Seqüência Zero.....	23
2.6.1 Circuito Simples Sem Pára-raios.....	24
2.6.2 Circuito Simples Com 1 Pára-raios .....	25
2.6.3 Circuito Simples Com 2 Pára-raios .....	25
2.7 Capacitância e Capacitância Reativa.....	26
2.7.1 Circuito Simples Sem Pára-raios.....	26
2.7.2 Circuito Simples Com 1 ou 2 Pára-raios .....	27
2.8 Admitância .....	28
<b>3 LINHA DE POTÊNCIA NATURAL ELEVADA .....</b>	<b>32</b>
3.1 Introdução.....	32



3.2 Histórico no Brasil.....	33
3.3 Capacidade da Linha de Transmissão .....	37
3.4 Fundamentos do Conceito de Linha de Potência Natural Elevada.....	39
3.4.1 Transporte de Energia.....	39
3.4.2 Aumento da Potência Natural.....	39
3.4.3 Compactação entre fases.....	40
3.4.3.1 Torre Raquete .....	41
3.4.3.2 Torre Cross-Rope .....	41
3.4.4 Feixe Expandido .....	42
3.4.4.1 Torre VX-Simétrico.....	43
3.4.4.2 Torre Cara de Gato .....	43
3.4.5 Compactação Entre Fases e Expansão do Feixe.....	44
3.4.5.1 Torre Monomastro.....	45
3.5 Problemas Potenciais .....	45
<b>4 ESTUDO COMPARATIVO.....</b>	<b>47</b>
4.1 Caracterização da Torre de Referência.....	47
4.2 Dados do Cabo Condutor e Cabo Pára-Raios.....	49
4.3 Dados da Linha.....	49
4.4 Compactação Entre Fases .....	49
4.5 Feixe Expandido .....	50
4.6 Compactação Entre Fases e Expansão do Feixe.....	52
4.7 Variação dos Parâmetros de Seqüência Positiva e Zero.....	53
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>
5.1 Sugestão Para Trabalhos Futuros .....	58
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>FIGURA 1</b> - Diagrama de representação de uma linha em estudos de sistemas.....	17
<b>FIGURA 2</b> - Determinação do raio equivalente do feixe de subcondutores. ....	22
<b>FIGURA 3</b> - Arranjo de condutores por fase para linhas de circuito simples. ....	23
<b>FIGURA 4</b> - Faixa de Passagem de uma linha de transmissão.....	30
<b>FIGURA 5</b> - Primeira linha de 230kV com conceito de LPNE.....	34
<b>FIGURA 6</b> - Laboratório de testes de manutenção em linha viva. ....	34
<b>FIGURA 7</b> - Teste da técnica de feixe expandido em 230kV. ....	35
<b>FIGURA 8</b> - Teste de isolamento em 500kV com feixe expandido e 4 subcondutores por fase.....	36
<b>FIGURA 9</b> - Teste em campo do feixe expandido em 500kV na fase direita. ....	36
<b>FIGURA 10</b> - Aspectos da capacidade de uma linha de transmissão.....	38
<b>FIGURA 11</b> - Torre Raquete e arranjo das fases. ....	41
<b>FIGURA 12</b> - Torre Cross-Rope e arranjo das fases. ....	42
<b>FIGURA 13</b> - Torre VX-Simétrico e arranjo das fases. ....	43
<b>FIGURA 14</b> - Torre Cara de Gato e arranjo das fases.....	44
<b>FIGURA 15</b> - Torre Monomastro e arranjo das fases.....	45
<b>FIGURA 16</b> - Topologia de torre VX-Simétrico. ....	48
<b>FIGURA 17</b> - Compactação entre fases e aumento da potência natural.....	50
<b>FIGURA 18</b> - Expansão do feixe de subcondutores e aumento da potência natural. ....	51
<b>FIGURA 19</b> - Compactação Entre Fases, Expansão do feixe de subcondutores e aumento da potência natural.....	52
<b>FIGURA 20</b> - Variação da reatância indutiva de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na compactação entre fases com $n=3$ . ....	53
<b>FIGURA 21</b> - Variação da capacitância de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na compactação entre fases com $n=3$ . ....	54
<b>FIGURA 22</b> - Variação da reatância indutiva de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na expansão do feixe de subcondutores com $n=3$ . ....	54
<b>FIGURA 23</b> - Variação da capacitância de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na expansão do feixe de subcondutores com $n=3$ . ....	55
<b>FIGURA 24</b> - Variação da reatância indutiva de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores com $n=3$ . ....	55
<b>FIGURA 25</b> - Variação da capacitância de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores com $n=3$ . ....	56

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Potência Natural (em MW) de linhas de transmissão típicas .....	19
<b>Quadro 2</b> - Valores típicos de razão de eficiência.....	30
<b>Quadro 3</b> – Comparação entre valores típicos de potência natural .....	39
<b>Quadro 4</b> – Medidas da topologia de cabeça de torre VX-Simétrico.....	48
<b>Quadro 5</b> – Dados do Cabo Condutor .....	49
<b>Quadro 6</b> – Dados do Cabo Pára-raios .....	49
<b>Quadro 7</b> – Dados da Linha.....	49
<b>Quadro 8</b> – Potência Natural (em MW) em função da compactação entre fases e número de subcondutores por fase. ....	50
<b>Quadro 9</b> – Potência Natural (em MW) em função da expansão do feixe e número de subcondutores por fase. ....	51
<b>Quadro 10</b> – Potência Natural (em MW) em função da expansão do feixe, e número de subcondutores por fase. ....	52

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

CEPEL: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CHESF: Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

HSIL: High Surge Impedance Loading

LPNE: Linha de Potência Natural Elevada

SIL: Surge Impedance Loading

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

*“Um dos dilemas que tem preocupado os governos e as concessionárias hoje é como suprir grandes quantidades de eletricidade para uma população e demandas crescentes, sendo eficiente e com um mínimo de impacto ambiental. Em alguns países como Brasil, China e Índia, o grande desafio é conectar os centros urbanos de consumo com a geração a milhares de quilômetros.”*

*International Symposium on International Standards for Ultra High Voltage, Beijing, China, 18-27 Julho de 2007*

O Atual modelo do Setor Elétrico Brasileiro aponta para a otimização do sistema de transmissão buscando a redução de impactos ambientais e de custos tornando-o mais confiável e competitivo.

Observa-se a necessidade crescente de se transportar grandes blocos de energia e aproveitar a energia que pode ser produzida em regiões com recursos hidráulicos abundantes, porém distantes dos principais centros de consumo.

Por outro lado, devido às restrições ambientais, torna-se cada vez mais difícil a expansão do sistema de transmissão para atender a demanda dos grandes centros e regiões remotas. Neste contexto a busca de novas tecnologias de transmissão que unam confiabilidade, redução de custos e atendimento às restrições ambientais, tem sido uma preocupação constante de diversas empresas do setor elétrico.

A solução que vem se tornando uma alternativa real para o melhor aproveitamento das faixas de servidão, tanto na construção de novas linhas, como também na recapacitação de linhas de transmissão existentes, é a de Linha de Potência Natural Elevada (LPNE), também conhecida como HSIL (do inglês *High Surge Impedance Load*).

## **1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho está dividido em 5 Capítulos numerados e distintos, incluindo este introdutório, o qual é composto pela motivação, objetivos e limitações do trabalho

O Capítulo 2, denominado Conceitos Básicos, apresenta toda a teoria básica para o cálculo dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão.

O Capítulo 3, Linha de Potência Natural Elevada, conceitua esta técnica, mostrando um histórico da evolução no Brasil, a aplicação das técnicas de compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores e os problemas potenciais associados a ela.

O Capítulo 4, por sua vez, fala sobre o Estudo Comparativo propriamente dito, onde é analisada a aplicação das técnicas de Linha de Potência Natural Elevada comparando os ganhos no aumento da potência natural.

Por fim, o Capítulo 5, intitulado Conclusões, encerra o trabalho com as conclusões do estudo realizado e propostas para trabalhos futuros.

## **1.3 OBJETIVOS**

O presente trabalho visa realizar um estudo comparativo dos benefícios gerados através da aplicação da técnica de Linha de Potência Natural Elevada em uma topologia típica de linha de transmissão de 500 kV. Através apenas de rearranjos na distancia entre as fases e a expansão do feixe de subcondutores de cada fase objetiva-se o aumento da Potência Natural da linha de transmissão através da redução da sua impedância característica.

Pretende-se comprovar que o uso destas técnicas é muito atrativo tanto em projetos de novas linhas, como na recapacitação de linhas já existentes.

#### **1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Neste estudo comparativo algumas questões não serão abordadas e serão listadas como limitações do trabalho, conforme segue:

- Não serão abordadas as questões relacionadas à otimização do campo elétrico na superfície dos subcondutores;
- Não serão abordadas as questões relacionadas à coordenação do isolamento, como também à manutenção em linha viva, fatores que se agravarão com as técnicas de compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores;
- Serão utilizadas para os cálculos dos parâmetros elétricos expressões simplificadas, baseadas na bibliografia, para as impedâncias de seqüência positiva e zero.
- A dedução das expressões utilizadas não será abordada neste trabalho;
- Apesar de serem calculadas e apresentadas ambas as expressões, de seqüência positiva e zero, serão abordadas apenas o comportamento em regime (seqüência positiva) e não aspectos de comportamento transitório (seqüência zero).

## 2 CONCEITOS BÁSICOS

A teoria básica de otimização de Linha de Potência Natural Elevada (LPNE) mostra que, para um mesmo nível de tensão, a equalização e maximização dos campos elétricos superficiais dos subcondutores de cada fase, ou o aumento do número de subcondutores por fase, aumentam a Potência Natural (SIL) da linha em questão.

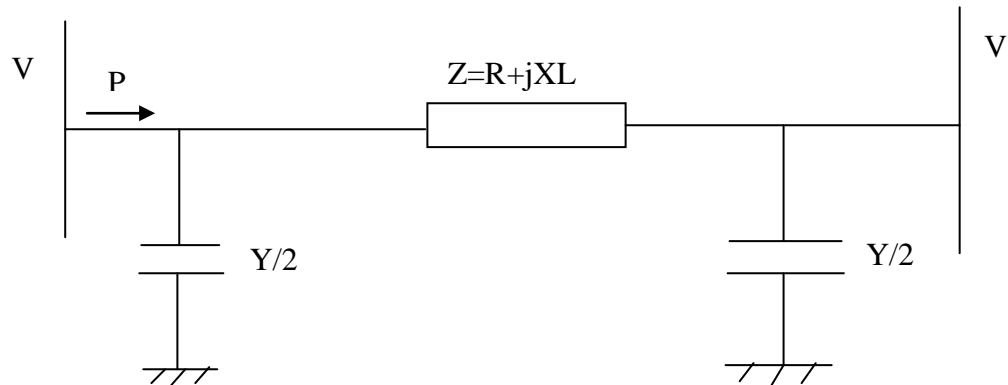
A performance elétrica de um circuito de uma linha de transmissão é determinada pela resistência, indutância e capacitância elétrica. Estes parâmetros dependem primeiramente das propriedades do condutor. Contudo, quando condutores em certas configurações são colocados em uma linha aérea, com espaços entre fases e fase e terra que variem, todo o contexto das propriedades internas e das dimensões físicas do condutor constituem os parâmetros resultantes da linha.

Através da teoria de impedâncias é possível mostrar que se aumenta a capacidade de transmissão aplicando o conceito de compactação, que é a redução da distância entre as fases, ou o conceito de feixe expandido, que é o aumento da distância dos subcondutores do mesmo feixe, ou ainda uma combinação destes dois conceitos. Através da aplicação destas duas técnicas objetiva-se a redução da impedância característica da linha, com o conseqüente aumento na potência natural. Ambos os conceitos e o cálculo dos parâmetros elétricos de seqüência positiva e zero serão abordados a seguir.

### 2.1 DIAGRAMA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

O diagrama da Figura 1 mostra a representação de uma linha de transmissão em um estudo de sistema, onde  $P$  é a potência transmitida e  $V$  é a tensão na barra de saída ou de chegada. Os parâmetros da linha são: a admitância  $Y$ , que fornece energia reativa e a impedância  $Z$ , que fica em série no circuito, consumindo energia reativa e que é responsável pela queda de tensão e por problemas de estabilidade na transmissão a longa distância.





**FIGURA 1** - Diagrama de representação de uma linha em estudos de sistemas. [Fonte: Cigré Paper B2-105, 2009, p.2.]

Para efeito de estudos de sistemas e de transitórios, as linhas são representadas pelos seus parâmetros em componentes de seqüência positiva e zero. Nos estudos de regime permanente de fluxo de carga, que verificam o controle de tensão no sistema, são utilizados apenas os parâmetros de seqüência positiva.

## 2.2 IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA

A energia armazenada em um campo elétrico de uma linha de transmissão pode ser equacionada como

$$E_e = \frac{1}{2} C.V^2 \quad (1)$$

onde C é a capacitância e V é a tensão. De um modo similar, a energia armazenada no campo magnético é

$$E_m = \frac{1}{2} L.I^2 \quad (2)$$

onde L é a indutância e I é a corrente.

Na condição limite em que a mesma energia é armazenada em ambos os campos, isto é, se  $E_e = E_m$ , o resultado é

$$V/I = \sqrt{L/C} = Z_C \quad (3)$$

A relação acima tem característica de uma impedância e é chamada de Impedância Característica da linha. A impedância característica pode ainda ser deduzida como

$$Z_C = \sqrt{L/C} = \sqrt{X_L \cdot X_C} \quad (4)$$

onde  $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$  é a reatância indutiva e  $X_C = 1/(2\pi \cdot f \cdot C)$  é a reatância capacitiva. A impedância característica  $Z_C$  é também chamada de impedância natural da linha (do Inglês *Surge Impedance*), considerando a resistência ôhmica igual a zero, isto é, assumindo que a resistência ôhmica  $R$  é muito menor que a reatância indutiva.

### 2.3 POTÊNCIA NATURAL

A potência que flui em uma linha de transmissão, sem perdas de potência reativa, para uma carga resistiva igual à impedância característica da linha é denominada de Potência Natural da Linha (do Inglês *Surge Impedance Loading – SIL*). Sob estas condições, a tensão final de envio da linha  $V_A$  e a tensão final de recepção da linha  $V_e$  diferem de um ângulo  $\delta$  correspondente ao tempo de viagem na linha. Para uma linha trifásica, a potência natural SIL é

$$SIL = \frac{V_{\phi\phi}^2}{Z_C} \quad (5)$$

onde  $V_{\phi\phi}$  é tensão entre fases da linha.

Desde que  $Z_C$  não tenha componente reativa, não haverá potência reativa na linha. Isto indica que as perdas reativas devido à indutância da linha são exatamente compensadas pela potência reativa fornecida pela capacitância shunt, ou

$$I^2 \omega L = U^2 \cdot \omega C \quad (6)$$

A potência natural é uma medida prática da capacidade de transmissão de uma linha, mesmo para linhas de transmissão com valor de resistência diferente de zero (condição real)

ou com componente reativa muito pequena. Para transferência de potência muito acima da potência natural, capacitores *shunt* podem ser necessários para minimizar a queda de tensão ao longo da linha, melhorando o fator de potência e a capacidade de transmissão da linha. Para operação significativamente abaixo da potência natural, reatores em série podem ser necessários.

Grande esforço tem sido feito pelo setor elétrico nos dias de hoje no sentido de aumentar a potência natural das linhas de transmissão, especialmente considerando as dificuldades cada vez maiores para adquirir os direitos para as faixas de passagem para a construção de novas linhas.

A potência natural de uma linha de transmissão pode ser aumentada através de:

- Aumento da tensão de operação;
- Redução da Impedância Característica  $Z_c$  :
- Aumentando o diâmetro do condutor;
- Aumentando o número de subcondutores por fase no feixe;
- Expandindo o feixe de subcondutores no vão;
- Reduzindo a distância entre fases (compactação entre fases);
- Aumentando o raio do feixe de subcondutores na fase (expansão do feixe).

No Quadro 1 são apresentados valores de potência natural para linhas de transmissão típicas.

**Quadro 1 - Potência Natural (em MW) de linhas de transmissão típicas**

Número de condutores por fase no feixe	$Z_c(\Omega)$	Tensão de Operação (kV)					
		69	138	230	400	500	765
1	400	12	48	132	---	---	---
2	320	---	60	165	557	781	---
3	280	---	---	---	602	893	---
4	240	---	---	---	627	1042	2230

Fonte: Kiessling, 2003

## 2.4 RESISTÊNCIA

A resistência elétrica de uma linha de transmissão é um dos fatores que mais influencia no projeto e otimização de uma linha. A potência e as perdas de energia são uma função direta da resistência de fase do condutor, de modo que sua determinação exata é muito importante. Resistência é a propriedade de um circuito elétrico que determina a taxa média em que a energia elétrica é convertida em calor, em função da corrente elétrica. Conhecendo a resistência do condutor a 20°C, obtém-se a resistência a qualquer temperatura T, através de

$$R_T = R_{20}[1 + \alpha(T - 20)] \quad (7)$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura do condutor. No caso de um feixe de condutores com  $n_2$  condutores por fase, a resistência equivalente é simplesmente a resistência de um subcondutor dividido por  $n_2$ . Neste caso a influência da separação entre os subcondutores é desprezada. Normalmente as linhas aéreas são projetadas para 60 a 80°C de temperatura máxima dos condutores. A medição de temperatura dos condutores aéreos realizados em campo tem mostrado que a temperatura real do condutor é geralmente inferior aos valores utilizados teoricamente. Em vista disso, dependendo da região de construção da linha, e das temperaturas médias anuais, pode-se utilizar um valor de temperatura menor, entre 60 e 80°C, a fim de se evitar uma super avaliação das perdas térmicas e conseqüentemente dos custos econômicos.

## 2.5 IMPEDÂNCIA DE SEQÜÊNCIA POSITIVA

A impedância de seqüência positiva é o parâmetro da linha mais usado para a operação normal e cálculos dos circuitos AC, tal como as relações entre voltagem e corrente, potência

e perdas de energia. É uma quantidade vetorial, que pode ser representada como um número complexo no formato retangular com uma componente real e uma imaginária como

$$Z_1 = R + jX \quad (8)$$

ou em formato polar

$$Z_1 = |Z_1| \angle \theta \quad (9)$$

onde:

R1	resistência
X1	reatância de Seqüencia positiva
$ Z_1  = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$	módulo $Z_1$
$\theta = \tan^{-1}(X_1 / R_1)$	ângulo de fase

### 2.5.1 INDUTÂNCIA E REATÂNCIA INDUTIVA

As relações de indutância usadas para avaliar a performance de uma linha de transmissão envolvem freqüentemente os efeitos de condutores simples ou em feixe operando em série ou em paralelo.

A indutância de seqüencia positiva de uma linha de transmissão trifásica totalmente transposta é dada por:

$$X_1 = \omega.L_1 = \frac{\omega.\mu_0.a}{2.\pi} \left[ \ln \left( \frac{D_M}{r_B} \right) + \frac{1}{4.n_2} \right] \quad (10)$$

onde:

$\omega$	freqüência angular = $2.\pi.f$ ,
$L_1$	indutância de seqüencia positiva em H/m,
a	comprimento do condutor em m,
$D_M$	distância geométrica média entre fases

$$D_M = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} \quad (11)$$

$\mu_0$  constante de campo magnético =  $4.\pi.10^{-7}$  H/m,

$r_B$  raio equivalente do feixe

$$r_B = \sqrt[n_2]{n_2 \cdot r \cdot r_0^{n_2-1}} \quad (12)$$

$n_2$  número de subcondutores por feixe

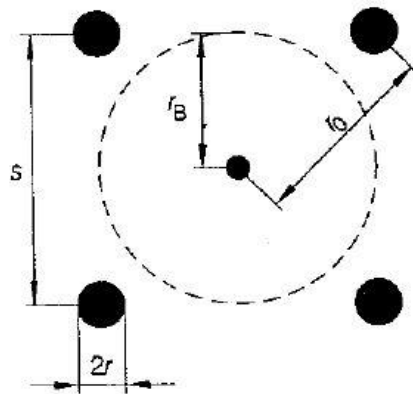
$r$  raio do subcondutor

$r_0$  raio do círculo do feixe

$$r_0 = \frac{s}{2 \cdot \text{sen}(\pi / n_2)} \quad (13)$$

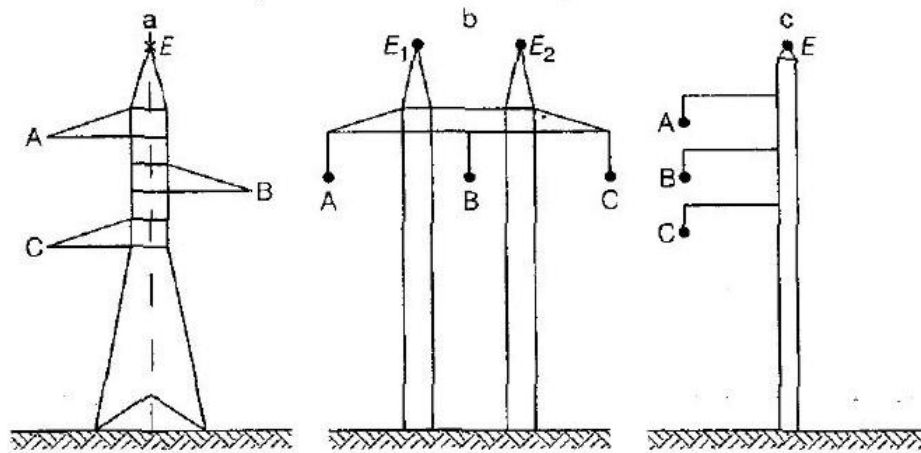
$s$  separação entre subcondutores no feixe.

A Figura 2 mostra um feixe de subcondutores ilustrando os valores das componentes “ $s$ ”, “ $r$ ”, “ $r_B$ ” e “ $r_0$ ”.



**FIGURA 2** - Determinação do raio equivalente do feixe de subcondutores. [Fonte: Kiessling, 2003, p.82]

A Figura 3 mostra arranjos típicos de condutores por fase para linhas com circuito simples.



**FIGURA 3** - Arranjo de condutores por fase para linhas de circuito simples. [Fonte: Kiessling, 2003, p.83]

## 2.6 IMPEDÂNCIA DE SEQÜÊNCIA ZERO

As correntes de seqüência zero são idênticas em cada fase do condutor e não são deslocadas em  $120^\circ$  como as correntes de seqüência positiva e negativa. O campo magnético devido à corrente de seqüência zero é muito diferente do campo magnético causado por correntes de seqüência positiva ou negativa. A diferença no campo magnético resulta em uma reatância de seqüência zero da linha de transmissão que varia entre 1,4 a 4 vezes a reatância de seqüência positiva. As correntes de seqüência zero fluem somente se um caminho de retorno for fornecido pelo circuito. A impedância do solo e do cabo de aterramento é incluída na impedância de seqüência zero de uma linha de transmissão. O uso mais comum da impedância de seqüência zero é no cálculo da corrente fase-terra de curto circuito. Tais cálculos são necessários para configurações de relés de proteção.

A impedância de seqüência zero dos condutores de uma linha de transmissão envolve as impedâncias próprias e impedâncias mútuas do caminho de retorno (aterramento, pára-raios) do circuito. Complexas equações são requeridas para o cálculo preciso da impedância de seqüência zero, e elas envolvem os circuitos de retorno a terra. O cálculo da impedância de seqüência zero pode ser realizado com métodos simplificados que fornecem um grau de

precisão suficiente para as aplicações mais práticas. Uma dessas abordagens será apresentada logo em seguida.

Considerando que tanto a resistência e a indutância dos condutores, aterramento e cabos pára-raios são dependentes da frequência, fórmulas simplificadas foram desenvolvidas para aplicações em circuitos de 50/60Hz. Esta abordagem simplificada é aplicável a linhas simétricas de circuito simples e de circuito duplo, com um, dois ou nenhum cabo pára-raios.

### 2.6.1 CIRCUITO SIMPLES SEM PÁRA-RAIOS

A impedância de seqüência zero é

$$Z'_{0S} = R'_0 + jX'_0 = \frac{R'_1}{n_2} + \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 + j \cdot f \cdot \mu_0 \left( 3 \cdot \ln \left( \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_B \cdot D_M^2}} \right) + \frac{\mu_T}{4 \cdot n_2} \right) \quad (14)$$

onde

$R'_1$  resistência do condutor por unidade de comprimento na temperatura de projeto em  $\Omega/\text{km}$ ,

$n_2$  número de subcondutores por feixe,

$f$  frequência em Hz,

$\mu_0$  constante de campo magnético =  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m,

$r_B$  raio equivalente do feixe,

$D_M$  distância geométrica média entre fases,

$\mu_T$  permeabilidade do condutor da fase,

$\delta$  profundidade da corrente de retorno pela terra,

$$\delta = \frac{1,85}{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0}{\delta_E}}} \quad (15)$$

$\delta_E$  resistividade média do solo



### 2.6.2 CIRCUITO SIMPLES COM 1 PÁRA-RAIOS

A impedância é determinada a partir da impedância de uma linha sem cabo pára-raios e a impedância própria e mútua do cabo pára-raios. É dada pela relação

$$Z'_{0S1E} = Z'_{0S} - 3 \cdot \frac{(Z'_{CE})^2}{Z'_{EE}} \quad (16)$$

onde:

$Z'_{CE}$  impedância mútua do condutor em relação ao cabo pára-raios

$Z'_{EE}$  impedância própria do cabo pára-raios

$Z'_{0S}$  impedância de seqüência zero

A impedância mútua do condutor em relação ao cabo pára-raios é

$$Z'_{CE} = f \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi}{4} + j \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \ln \left( \frac{\delta}{D_{ME}} \right) \quad (17)$$

onde:

$D_{ME}$  distância média entre os condutores e o cabo pára-raios

$$D_{ME} = \sqrt[3]{D_{AE} \cdot D_{BE} \cdot D_{CE}} \quad (18)$$

A impedância própria do cabo pára-raios é

$$Z'_{EE} = R'_E + f \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi}{4} + j \cdot f \cdot \mu_0 \left[ \ln \left( \frac{\delta}{r_E} \right) + \frac{\mu_E}{4} \right] \quad (19)$$

onde:

$R'_E$  resistência do cabo pára-raios em  $\Omega/\text{km}$ ,

$\mu_E$  permeabilidade magnética do cabo pára-raios,

$r_E$  raio do cabo pára-raios em m.

### 2.6.3 CIRCUITO SIMPLES COM 2 PÁRA-RAIOS

Para qualquer arranjo do cabo pára-raios tem-se a seguinte relação

$$Z'_{0S2E} = Z'_{0S} - 3 \cdot \frac{(Z'_{CE})^2}{Z'_{E1E2}} \quad (20)$$

A impedância mútua  $Z'_{CE}$  é dada por (17), onde  $D_{ME}$  é dado por (18) no caso de arranjo simétrico do cabo pára-raios. No caso de arranjo assimétrico é aplica-se

$$D_{ME} = D_{M2E} = \sqrt[6]{D_{AE1} D_{BE1} \cdot D_{CE1} \cdot D_{AE2} D_{BE2} \cdot D_{CE2}} \quad (21)$$

A impedância mútua  $Z'_{E1E2}$  é dada por

$$Z'_{E1E2} = \frac{R'_E}{2} + f \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi}{4} + j \cdot f \cdot \mu_0 \left[ \ln \left( \frac{\delta}{\sqrt{r_E \cdot D_{E1E2}}} \right) + \frac{\mu_E}{8} \right] \quad (22)$$

onde:

$D_{E1E2}$  distância entre os dois cabos pára-raios em m.

## 2.7 CAPACITÂNCIA E CAPACITÂNCIA REATIVA

Capacitância é a propriedade do sistema de condutores e dielétricos que permite armazenar cargas eletricamente separadas quando existem diferenças de potencial entre os condutores. A capacitância reativa é a função inversa da capacitância e frequência, ou

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (23)$$

A capacitância de uma linha de transmissão é um parâmetro importante, ela é a responsável por acumular e gerar potência reativa para a demanda do sistema. Os condutores de uma linha de transmissão assumem potenciais em relação aos outros e em relação à terra. A terra é considerada em todos os casos como sendo a referência de potencial zero. Campos elétricos e capacitâncias são formados entre condutores e a terra, incluindo os cabos pára-raios. As capacitâncias são distribuídas sobre os condutores ao longo de toda a linha. Para linhas transpostas a capacitância média total por fase é igual, de modo que a altura média do condutor em relação ao solo é levada em consideração para o seu cálculo.

### 2.7.1 CIRCUITO SIMPLES SEM PÁRA-RAIOS

A capacitância de seqüência zero por unidade de comprimento é dado por

$$C'_{0S} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left/ \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{(2.h_M)^2 + D_M^2}}{\sqrt[3]{r_B \cdot D_M^2}} \right) \right] \right. \cong \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left/ \ln \frac{2.h_M}{\sqrt[3]{r_B \cdot D_M^2}} \right. \quad (24)$$

onde:

$\epsilon_0$  constante dielétrica =  $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m,

$h_M$  altura média do condutor acima do solo

$$h_M = \sqrt[3]{h_A \cdot h_B \cdot h_C} \quad (25)$$

$r_B$  raio equivalente do feixe,

$D_M$  distância geométrica média entre fases. Se  $(D_M / 2.h_M)^2 \ll 1$  a

aproximação da equação (24) pode ser feita com essa relação.

As capacitâncias entre os condutores são

$$\begin{aligned} C'_S = C'_{AB} = C'_{AC} = C'_{BC} &= (C'_1 - C'_{0S}) / 3 = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left[ \ln(2.h_M / D_M) \right] \left/ \left[ 3 \cdot \ln(D_M / r_B) \cdot \ln(2.h_M / \sqrt[3]{r_B \cdot D_M^2}) \right] \right. \end{aligned} \quad (26)$$

e a capacitância de seqüência positiva é dada por

$$C'_{1S} = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left/ \ln \left( \frac{D_M}{r_B \sqrt{1 + (D_M / 2.h_M)^2}} \right) \right. \cong 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 / \ln(D_M / R_B) \quad (27)$$

## 2.7.2 CIRCUITO SIMPLES COM 1 OU 2 PÁRA-RAIOS

Cabos pára-raios afetam apenas a capacitância de seqüência zero, enquanto a capacitância de seqüência positiva pode ser calculada a partir de  $C'_{1S}$ . Com a aproximação usada em  $C'_{0S}$  a capacitância de seqüência zero para uma linha com um pára-raios é

$$C'_{0SE} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left/ \left\{ \ln \left( \frac{2.h_M}{\sqrt[3]{r_B \cdot D_M^2}} \right) - \left[ \ln \left( \frac{h_M + h_E}{D_{ME}} \right) \right]^2 \right. \right/ \ln \frac{2.h_E}{r_E} \left. \right\} \quad (28)$$

onde:

$h_M$  altura média do condutor acima do solo em m,

$h_E$  altura média do cabo pára-raios acima do solo em m,

$D_{ME}$  distância média entre os condutores e o cabo pára-raios em arranjo

simétrico

$r_E$  raio do cabo pára-raios em m. No caso de dois cabos pára-raios na

mesma altura e simetricamente arranjados,  $r_E$  será substituído por  $\sqrt{r_E \cdot D_{E1E2}}$ , onde

$D_{E1E2}$  é a distância entre os cabos pára-raios.

## 2.8 ADMITÂNCIA

Durantes os cálculos dos parâmetros elétricos de uma linha de transmissão geralmente é preferível usar as admitâncias à terra, ao invés da impedância à terra. Usando a representação vetorial, a admitância de seqüência positiva e de seqüência zero pode ser equacionada como:

$$\begin{aligned} Y'_1 &= G'_1 + jB'_1 \\ Y'_0 &= G'_0 + jB'_0 \end{aligned} \quad (29)$$

Na fórmula acima,  $G'_1$  e  $G'_0$  são as partes reais da admitância, usualmente chamadas de condutâncias, enquanto  $B'_1$  e  $B'_0$  são as partes imaginárias da admitância, chamadas de susceptâncias. Para linhas de transmissão, os termos reais  $G'_1$  e  $G'_0$  são muito pequenos e podem ser desprezados, significando, portanto,  $G'_1 = G'_0 \cong 0$ . Isto significa que a aproximação a seguir pode ser utilizada como

$$Y'_1 = \frac{1}{X'_{C1}} \quad (30)$$

e

$$Y'_0 = \frac{1}{X'_{C0}}$$

(31)

Se  $X'_{C1}$  e  $X'_{C0}$  são dadas na unidade  $\Omega.Km$ , então  $Y'_1$  e  $Y'_0$ , seus respectivos inversos, são dados em S/km.

As susceptâncias capacitivas, calculadas através do inverso de  $X_C$ , determinam respectivamente a susceptância de seqüência positiva

$$B'_1 = 2\pi f . C'_1 \quad (32)$$

e a susceptância de seqüência zero

$$B'_0 = 2\pi f . C'_0 \quad (33)$$

A admitância, bem como as suas componentes condutância e susceptância, são medidas como o inverso da unidade  $\Omega$ , chamada de Siemens (S), mas o submúltiplo  $\mu S$  ( $10^{-6} S$ ) é mais usual.

## 2.9 EFICIÊNCIA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

A necessidade de transmitir a maior potência possível no corredor (faixa de passagem) de uma linha faz com que seja importante aumentar a potência transmitida dentro dele. Isto origina o conceito de *razão de eficiência* de uma linha de transmissão expresso como a potência transmitida em relação à faixa de passagem da linha:

$$\text{razão de eficiência} = \frac{\text{potência transmitida}}{\text{faixa de passagem}} \quad (34)$$

A potência transmitida é proporcional ao quadrado da tensão, enquanto a largura da faixa de passagem é quase proporcional à tensão. O Quadro 2 mostra valores típicos de razão de eficiência, sua unidade é dada em MVA/m.

**Quadro 2 - Valores típicos de razão de eficiência**

<b>Tensão (kV)</b>	<b>230</b>	<b>500</b>	<b>765</b>
<b>Potência (MVA)</b>	165	1000	2500
<b>Faixa de Passagem (m)</b>	45	65	95
<b>Razão de Eficiência (MW/m)</b>	3,7	15,4	26,3

Fonte: Kiessling, 2003

A faixa de passagem compreende a faixa de terra desapropriada, desmatada ou concedida, de uso compartilhado, por onde atravessa a linha de transmissão. Quando não são de propriedade da concessionária, denominam-se de faixas de servidão, ocorrendo somente indenização pelas restrições que são estabelecidas. A Figura 4 mostra um exemplo típico de faixa de passagem.



**FIGURA 4** – Faixa de Passagem de uma linha de transmissão. [Fonte: EIS, 2009]

Há inúmeras maneiras de aumentar a razão de eficiência, basicamente através do aumento da potência transmitida em uma data faixa de servidão, como:

- Utilização de tensão maior compatível com a carga necessária;
- Uso de linhas com circuitos duplos ou múltiplos;
- Compactação de linhas;
- Recapitação da linha (compensação série, reconduamento, aumento de tensão);

- Uso de transmissão em corrente contínua.

### **3 LINHA DE POTÊNCIA NATURAL ELEVADA**

A necessidade crescente de aumentar a capacidade de transmissão das linhas de transmissão se transformou no maior objetivo, fundamental para a competitividade das companhias do setor elétrico, em face de questões como o elevado custo operacional das linhas de transmissão combinado com as taxas de retorno relativamente baixas e as dificuldades crescentes de obtenção de novas faixas de passagem.

Antigamente, até o início da década de 90, a prática usual para o aumento da capacidade de transmissão consistia em aumentar a ampacidade ou a capacidade térmica através do aumento da seção transversal do condutor ou através do aumento das distâncias entre os condutores e o terreno. Estas ações, entretanto, não são efetivas na redução da reatância série e no aumento da potência natural.

A tecnologia de Linha de Potência Natural Elevada desempenha um papel importante neste cenário, pois as técnicas de linhas de transmissão de alta capacidade já se encontram em avançado nível de desenvolvimento, principalmente no Brasil e na Rússia, de onde surgiram estas técnicas.

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Engenheiros de transmissão por todo o mundo lidam com um cenário semelhante: limitações econômicas e ambientais que tornam cada vez mais difícil a construção de novas linhas. Estas dificuldades levaram a busca de meios técnicos que visam:

- aumentar a proporção de transmissão de energia por valor investido em novas instalações;
- recapacitar linhas existentes, maximizando a capacidade disponível do sistema;



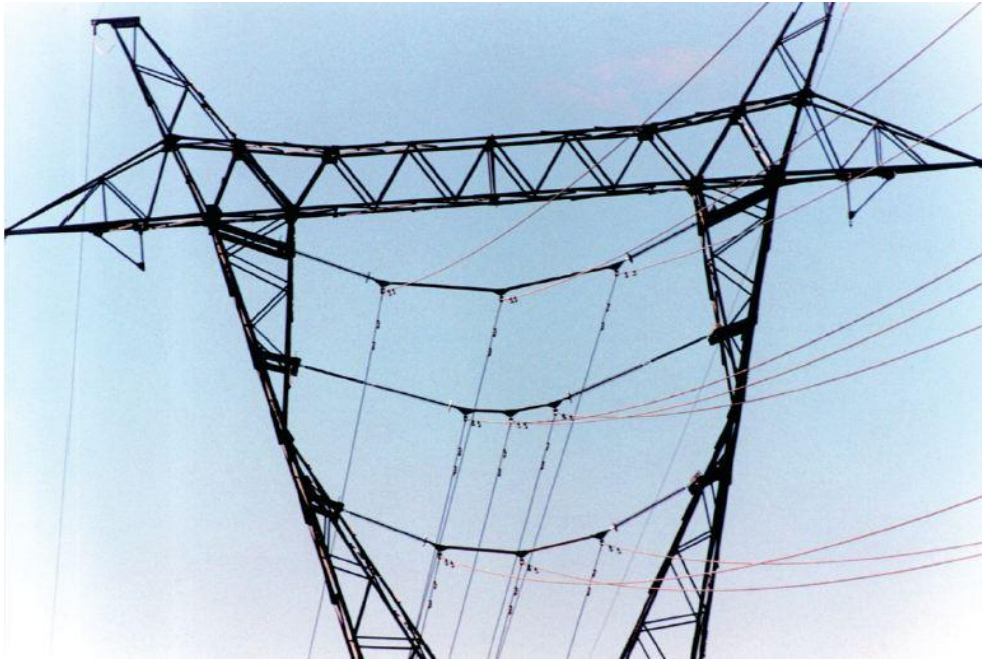
- reduzir os impactos ambientais, particularmente à ocupação das faixas de servidão pelo sistema de transmissão, que por sua vez levam à necessidade de aumentar a potência transmitida em projetos de linhas novas, bem como a de linhas já existentes.

Em 1990 um projeto especial foi iniciado no Brasil, cujo foco principal foi o estudo de transmissão a longas distâncias e com alta capacidade. O grande interesse sobre o assunto, especialmente adequado para este país de dimensões continentais e predominante geração hidroelétrica, normalmente distante dos centros consumidores, motivou um acordo de cooperação com pesquisadores Russos, pioneiros nestas técnicas, para desenvolver entre outras tecnologias, a aplicação das técnicas de Linha de Potência Natural Elevada. Naquele tempo, na Rússia, já havia linhas de até 330kV concebidas com esta abordagem.

### **3.2 HISTÓRICO NO BRASIL**

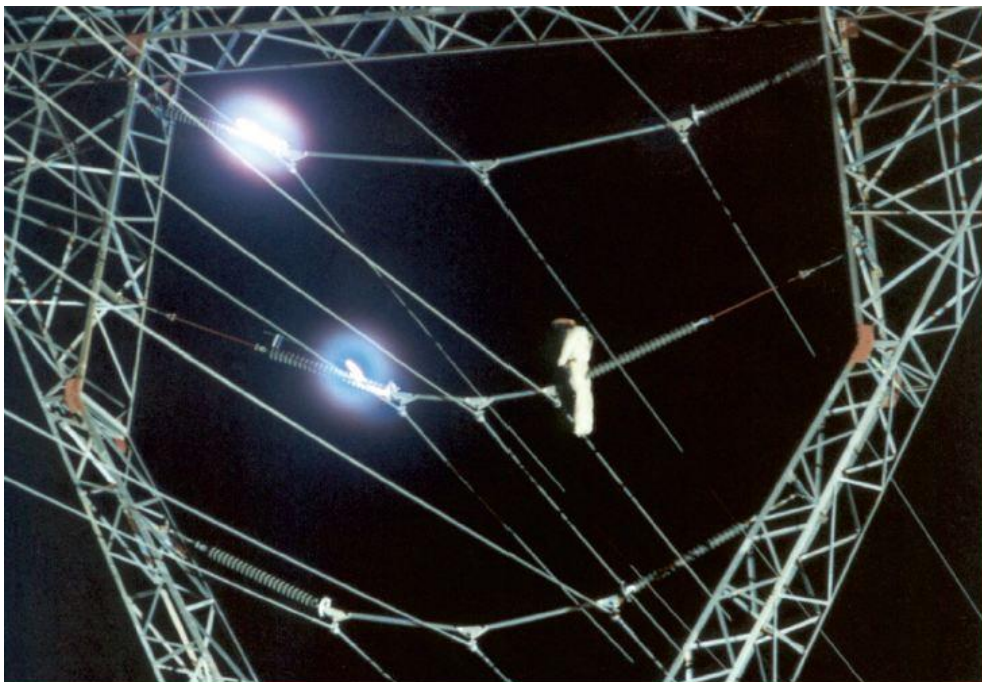
A partir de 1992, CHESF, Furnas e CEPTEL, patrocinadas pela Eletrobrás, iniciaram os estudos para o projeto de linhas de 69 a 500kV com o conceito de Linha de Potência Natural Elevada.

Em 1994 a CHESF construiu e energizou a primeira Linha de Potência Natural Elevada experimental de 230kV, com extensão de 1,6km e 3 condutores por fase que pode ser visualizada na Figura 5.



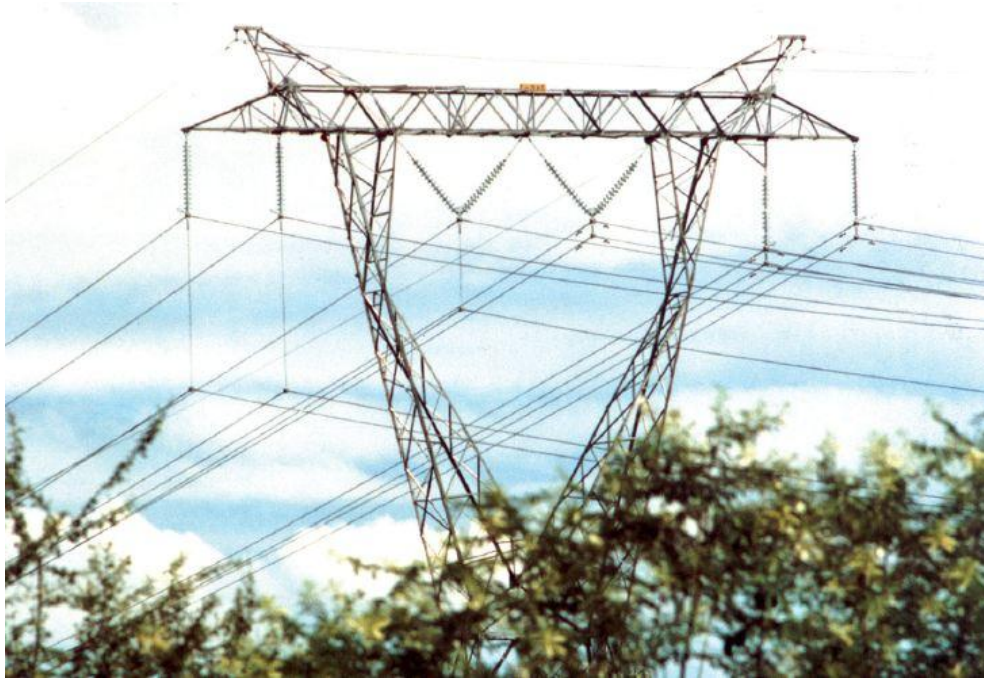
**FIGURA 5** – Primeira linha de 230kV com conceito de LPNE. [Fonte: CEPEL., 2005]

Antes da construção, extensas análises e testes foram realizados nos laboratórios da CEPEL em um modelo em escala real como mostrado na Figura 6. Posteriormente medições em campo foram realizadas.



**FIGURA 6** – Laboratório de testes de manutenção em linha viva. [Fonte: CEPEL., 2005]

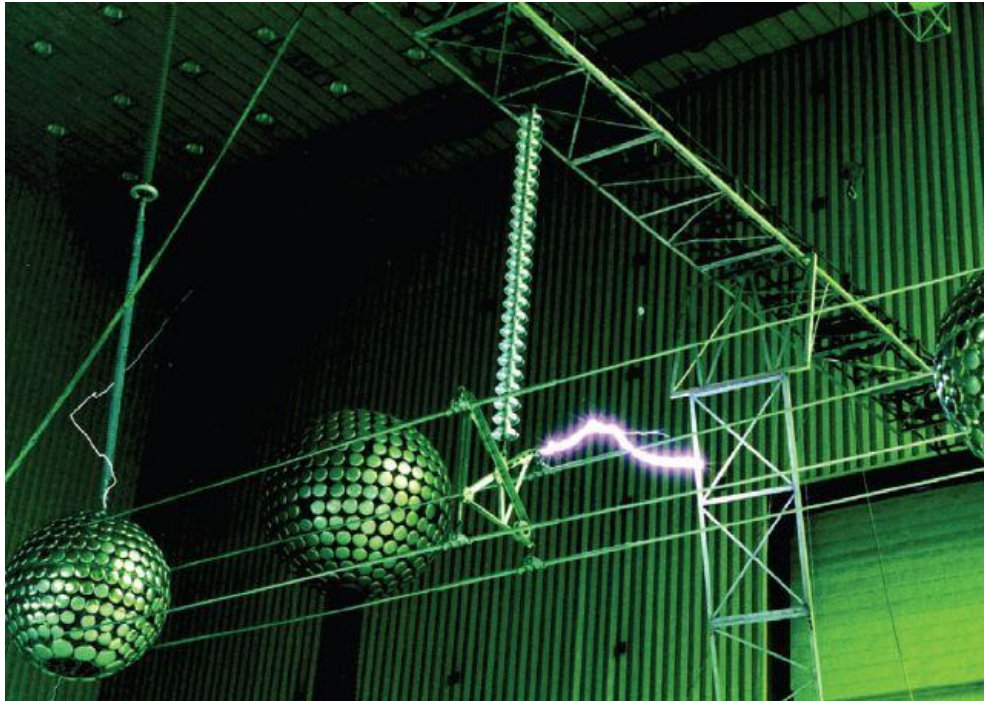
Em 1995 a CHESF testou a técnica de feixe expandido para recapacitar a linha de 230kV, circuito duplo, Paulo Afonso-Milagres, operando com dois condutores por fase em uma extensão de 3 km. A Figura 7 mostra o arranjo na torre de teste.



**FIGURA 7** – Teste da técnica de feixe expandido em 230kV. [Fonte: CEPEL., 2005]

A partir de 1996 uma linha de 180 km de extensão, com o mesmo arranjo de feixe expandido, circuito duplo, foi energizada na linha de transmissão Banabuiú/Fortaleza. Em 1997 o trecho Paulo Afonso/Milagres/Banabuiú, no mesmo corredor, foi recapacitado nos 480 km restantes, totalizando assim 660 km de extensão de linha em circuito duplo com a técnica de feixe expandido.

Uma vez que a técnica de feixe expandindo em 230kV foi testada e considerada confiável, os estudos iniciaram objetivando a transmissão em 500kV. Fabricantes em conjunto com a CHESF desenvolveram e testaram diversos protótipos de acessórios para a utilização do feixe expandido com quatro subcondutores por fase como mostrado na Figura 8.



**FIGURA 8** – Teste de isolamento em 500kV com feixe expandido e 4 subcondutores por fase. [Fonte: CEPEL., 2005]

Outro protótipo foi instalado na fase externa direita de uma linha de transmissão real de 500kV, com 1,9km de extensão, situado na hidroelétrica de Paulo Afonso como pode ser visualizado na Figura 9. Logo após uma linha experimental de 2 km de extensão foi construída para testes e treinamento das equipes de manutenção com os mesmos arranjos adotados nas conexões mencionadas anteriormente.



**FIGURA 9** – Teste em campo do feixe expandido em 500kV na fase direita. [Fonte: CEPEL., 2005]

### 3.3 CAPACIDADE DA LINHA DE TRANSMISSÃO

A capacidade de uma linha de transmissão deve ser avaliada considerando-se que ela está inserida em um sistema de transmissão, conseqüentemente seu desempenho deve ser analisado a partir de uma abordagem global e sistêmica. Por isso há 3 aspectos principais que regem a máxima potência que uma linha pode transmitir:

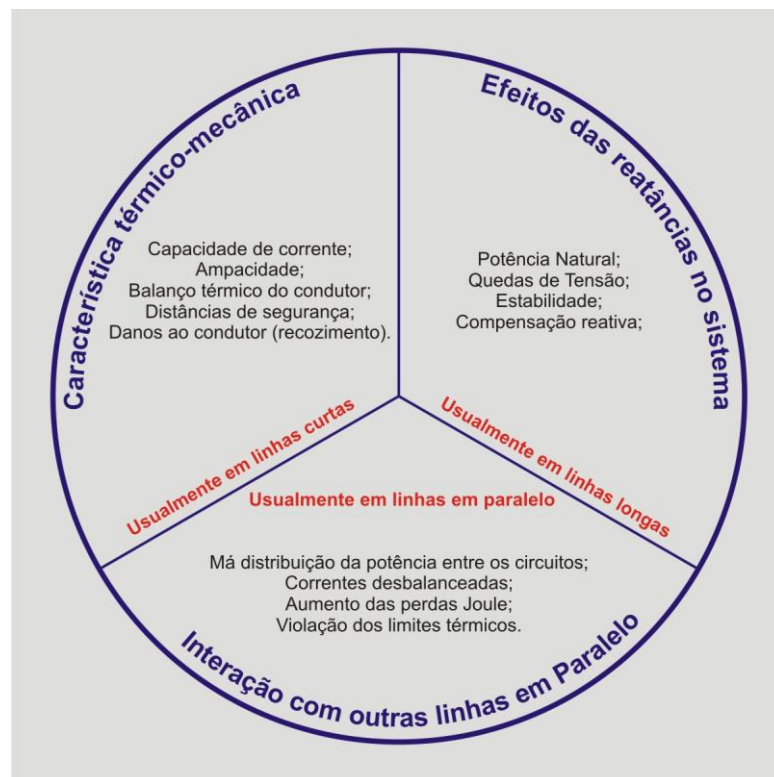
- O primeiro aspecto é relacionado à característica térmico-mecânica da própria linha, usualmente referida como capacidade de corrente ou ampacidade. A temperatura do condutor é determinada considerando a corrente e a equação de equilíbrio térmico. Seu valor máximo não pode exceder o máximo projetado para evitar danos ao próprio condutor e evitar que a flecha dos condutores viole as distâncias mínimas de segurança.
- O segundo aspecto reflete a interação dos parâmetros elétricos da linha de transmissão, suas reatâncias indutiva ( $X_L$ ) e capacitiva ( $X_C$ ), com o sistema de transmissão. A Potência Natural da linha é calculada a partir destes parâmetros, e o seu significado físico é o valor de energia que flui através da linha com praticamente nenhum intercâmbio de potência reativa com o sistema.

Transmitir energia acima do valor da Potência Natural da linha causa um consumo de potência reativa e quedas de tensão podem ocorrer. Dependendo do comprimento da linha e das características do sistema de transmissão, capacitores *shunt* podem ser necessários ou a potência ficará limitada. Além disso, estudos de estabilidade de tensão podem determinar os limites da capacidade de transmissão.

Uma maior Potência Natural seria desejável em qualquer dos casos, especialmente para linhas longas e extremamente carregadas.

- O terceiro aspecto é uma indesejável combinação das duas considerações anteriores. A interação de uma linha de transmissão com outras operando em paralelo pode dividir a potência da linha de uma forma inadequada entre os circuitos. Isso poderia causar correntes desbalanceadas, aumentando as perdas Joule, ou causando violações dos limites térmicos, enquanto as linhas vizinhas não são totalmente carregadas.

A aplicação de técnicas feitas “sob medida” para os parâmetros da linha podem resolver algum desses problemas, sendo possível modificar o fluxo de potência na rede de transmissão. Esta abordagem é aplicável as linhas de curto e de longo comprimento. A Figura 10 resume os aspectos mencionados acima.



**FIGURA 10** – Aspectos da capacidade de uma linha de transmissão. [Fonte: Regis Jr., 2005]

### 3.4 FUNDAMENTOS DO CONCEITO DE LINHA DE POTÊNCIA NATURAL ELEVADA

#### 3.4.1 TRANSPORTE DE ENERGIA

O transporte de energia em linhas de transmissão pode ser modelado usando as conhecidas relações de propagação de ondas eletromagnéticas no ar, guiadas pelos cabos condutores, e a potência pode ser expressa pelo produto vetorial da intensidade do campo elétrico e magnético. A potência natural de uma linha de transmissão, para um dado nível de tensão, depende da área e do número de subcondutores por fase e a intensidade do campo na superfície do condutor.

Baseado nesta teoria é possível aplicar uma otimização conveniente para o arranjo do feixe de subcondutores, maximizando os campos na superfície dos subcondutores e assim aumentando a potência transmitida utilizando a mesma área do condutor.

Uma forma conveniente de comparar uma linha de transmissão tradicional com uma Linha de Potência Natural Elevada é analisar os seus respectivos valores de potência natural. O Quadro 3 mostra valores típicos para os dois projetos.

**Quadro 3 – Comparação entre valores típicos de potência natural**

Tensão (kV)	SIL – Linha Tradicional (MW)	SIL – Linha de Potência Natural Elevada (MW)
69	9-12	10-40
138	40-50	50-120
230	120-130	130-440
500	950-1000	1000-2000

Fonte: Cigré Paper 22-207, 1998

#### 3.4.2 AUMENTO DA POTÊNCIA NATURAL

A Potência Natural é inversamente proporcional à impedância característica da linha, sendo dado por (5). Podendo ser comprovado teoricamente que a ação nos parâmetros de

seqüência positiva provoca variação na impedância característica e conseqüentemente na Potência Natural.

A impedância característica por sua vez é relacionada com as reatâncias indutivas e capacitivas de seqüência positiva que dependem dos parâmetros de geometria dos feixes e espaçamento entre fases, bem como as características do condutor e o número de subcondutores por fase.

Analisando a variação na Potência Natural causada pela modificação destes parâmetros, compreende-se que a redução da reatância de seqüência positiva  $X_1$  e o aumento da capacitância de seqüência positiva  $C_1$ , causam uma correspondente redução na impedância característica, aumentando a potência natural da linha.

### **3.4.3 COMPACTAÇÃO ENTRE FASES**

A primeira técnica utilizada para aumento da potência natural (SIL) é o design de linha compacta, mantendo a geometria usual dos feixes de subcondutores e diminuindo o espaçamento entre as fases, aumentando a capacitância  $C_1$  e reduzindo a reatância de seqüência positiva  $X_1$ .

A compactação máxima é limitada pela coordenação do isolamento entre as fases e os gradientes máximos de campo elétrico que irão ocorrer na superfície dos subcondutores, que incrementam o efeito corona.

Os ganhos em aumento da potência natural são superiores a 20% neste caso.

A seguir serão apresentadas concepções de torres típicas, com 4 subcondutores por fase, e seus respectivos gráficos dos arranjos das fases e seus subcondutores que aplicam os conceitos de Linha de Potência Natural Elevada com compactação entre fases.



### 3.4.3.1 TORRE RAQUETE

A torre Raquete tem a concepção em suportes auto-portantes, com feixes de 18 polegadas (0,457m de separação entre subcondutores no feixe) considerados feixes convencionais. A distância entre fases é bastante reduzida, em arranjo triangular, chamado de torre compacta, que propicia uma maior potência natural através desta compactação conforme visto na Figura 11.

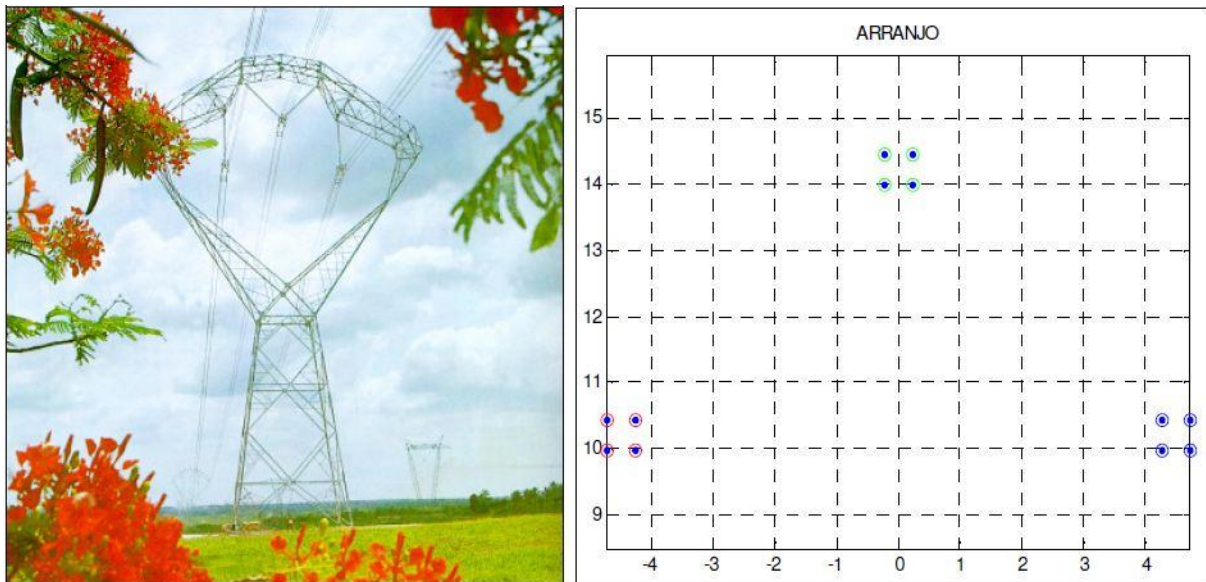
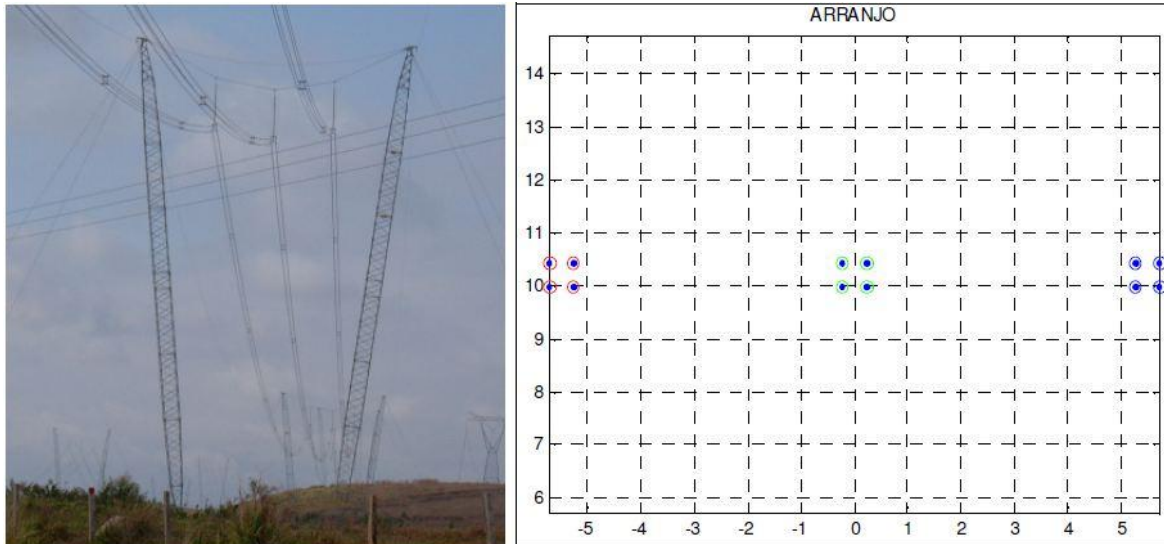


FIGURA 11 – Torre Raquete e arranjo das fases. [Fonte: REGIS JR., 2009]

### 3.4.3.2 TORRE CROSS-ROPE

A torre Cross-Rope, também conhecida por Chainette, tem a concepção suportada por dois mastros estaiados, com as fases colocadas entre eles. Os feixes são convencionais de 0,457 metros, com arranjo de fases praticamente plano, com distância entre fases bastante reduzida, o que propicia uma maior potência natural conforme a Figura 12.



**FIGURA 12** – Torre Cross-Rope e arranjo das fases. [Fonte: REGIS JR., 2009]

#### 3.4.4 FEIXE EXPANDIDO

A técnica do feixe expandido é baseada no re-posicionamento dos subcondutores no feixe. Este método é aplicável em novos projetos de linhas de transmissão e na recapacitação de linhas já existentes.

Através de um design apropriado é possível utilizar as estruturas pré-existentes, com mudanças apenas nas ferragens e dimensões dos feixes. Uma importante vantagem da técnica do feixe expandido é o baixo custo para a mudança na geometria dos feixes, não sendo necessária a construção de novas torres de transmissão.

Esta técnica é menos complexa que o conceito original para Linhas Natural de Potência Elevada, além de propiciar mais fácil estudo, testes e implementação.

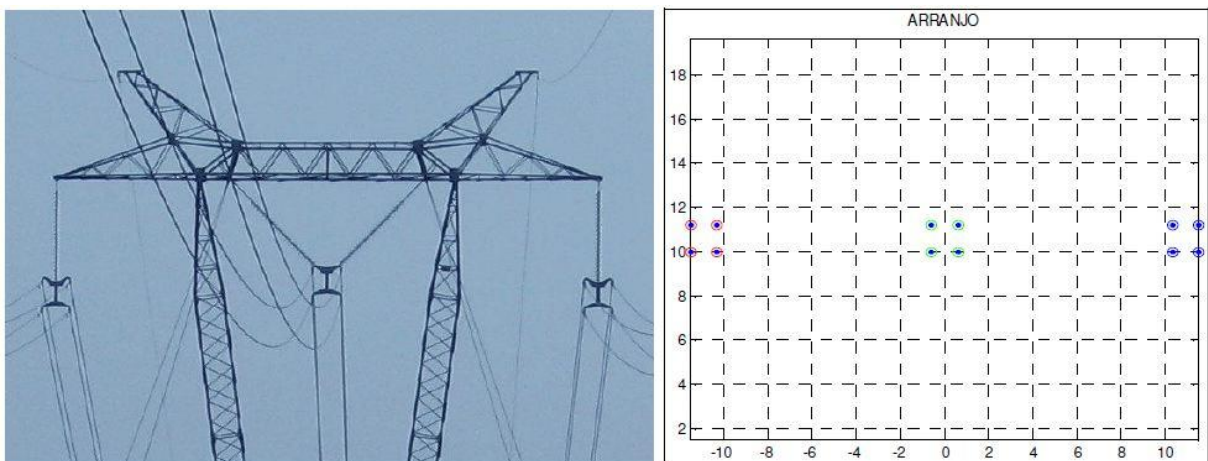
Da mesma forma que na técnica de compactação entre fases, porém com mudanças mais significativas, é proporcionado aumento na capacitância  $C_1$  e redução da reatância de seqüência positiva  $X_1$ , resultando num aumento da Potência Natural.

Os ganhos em aumento da Potência Natural chegam a mais de 30%.

A seguir serão apresentadas concepções de torres típicas, com 4 subcondutores por fase, e seus respectivos gráficos dos arranjos das fases e seus subcondutores que aplicam os conceitos de Linha de Potência Natural Elevada com expansão do feixe de subcondutores.

#### 3.4.4.1 TORRE VX-SIMÉTRICO

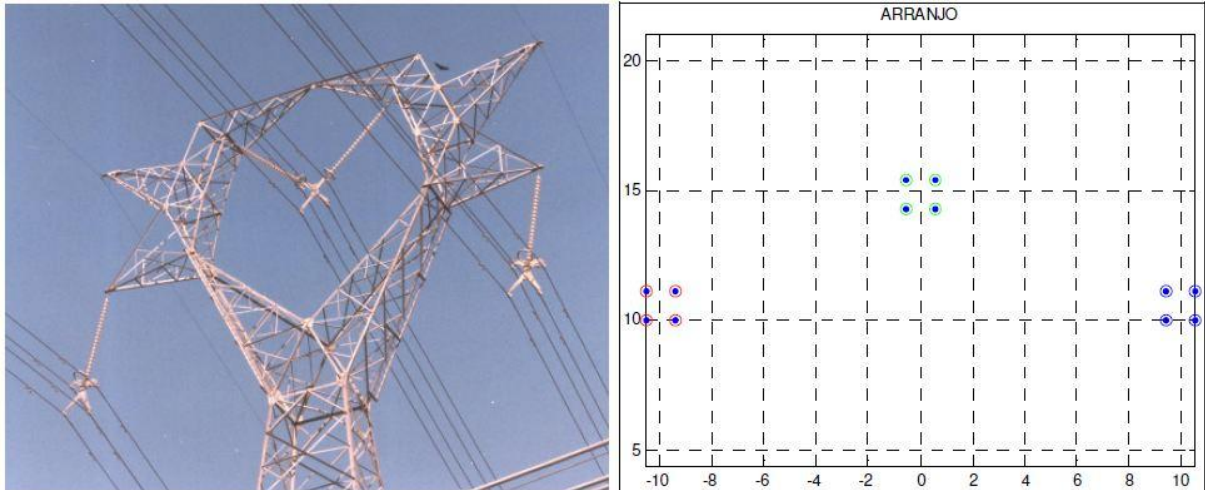
A Torre VX-Simétrico tem a concepção em suportes em “V” estaiados, com as fases no mesmo plano e mastros entre elas, o que impede a sua compactação. Para se obter aumento na potência natural utilizam-se feixes expandidos com 1,2 metros de espaçamento entre subcondutores com mostrado na Figura 13. Esta concepção gera um campo elétrico mais elevado em algum dos subcondutores.



**FIGURA 13** – Torre VX-Simétrico e arranjo das fases. [Fonte: REGIS JR., 2009]

#### 3.4.4.2 TORRE CARA DE GATO

A torre Cara de Gato tem a concepção em suportes auto-portantes, com parte estrutural entre as fases. Da mesma forma como na torre VX-Simétrico, utilizam-se feixes expandidos com 1,2 metros de espaçamento entre subcondutores com mostrado na Figura 14. As fases são dispostas em arranjo triangular, o que propicia uma distribuição de campos elétricos nos subcondutores mais equalizada.



**FIGURA 14** – Torre Cara de Gato e arranjo das fases. [Fonte: REGIS JR., 2009]

### 3.4.5 COMPACTAÇÃO ENTRE FASES E EXPANSÃO DO FEIXE

Na aplicação completa da solução de Linha de Potência Natural Elevada, o aumento da Potência Natural é ainda maior através da atuação simultânea da compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores, o que leva a uma redução maior na impedância característica da linha.

Todas as características elétricas e geométricas estão sujeitas a alterações. Os feixes de subcondutores podem assumir variadas configurações geométricas e a completa otimização via software é extremamente recomendada a fim de aumentar os graus de liberdade de projeto dos parâmetros.

A seguir é apresentado uma concepção de torre, com 4 subcondutores por fase, e seu respectivo gráfico do arranjo das fases e seus subcondutores que aplicam os conceitos completos de Linha de Potência Natural Elevada com compactação entre fase e expansão do feixe de subcondutores.

### 3.4.5.1 TORRE MONOMASTRO

A torre Monomastro tem a concepção em suportes estaiados, de mastro único, com parte estrutural entre as fases. Mesmo assim, consegue-se uma pequena redução da distância entre as fases, as quais são dispostas em triângulo. Para complementar o ganho na potência natural, usa-se um feixe de subcondutores expandido na forma de um quadrado com 0,9 metros de lado. Como se pode observar na Figura 15, nesta concepção o aumento na potência natural deve-se a uma combinação de uma ligeira expansão no feixe de subcondutores e uma pequena compactação entre fases.

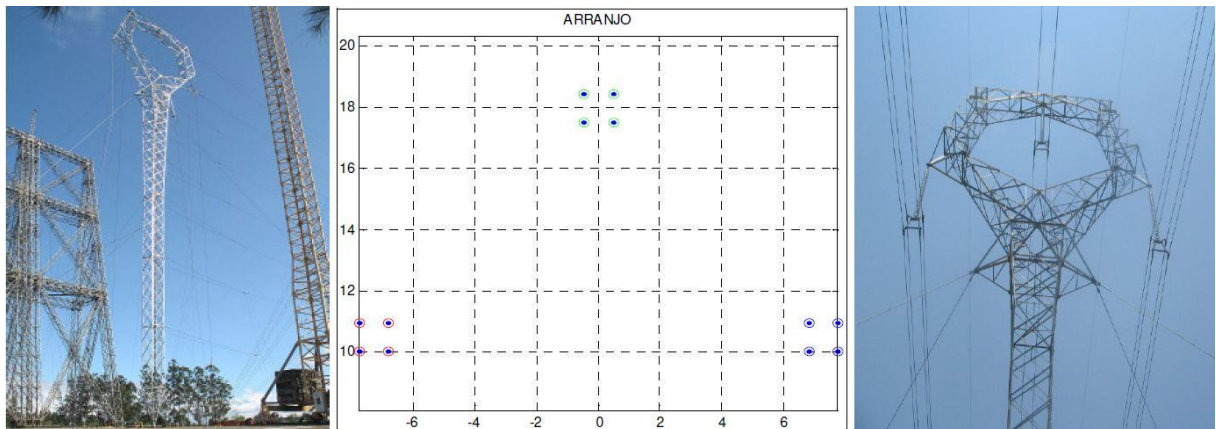


FIGURA 15 – Torre Monomastro e arranjo das fases. [Fonte: REGIS JR., 2009]

## 3.5 PROBLEMAS POTENCIAIS

Uma das principais características do projeto de uma Linha de Potência Natural Elevada, a redução da reatância série da linha, é naturalmente acompanhada pelo correspondente aumento na capacitância *shunt* da linha de transmissão. Isto pode gerar um efeito indesejável em algumas condições, como com cargas leves ou nenhuma carga ou em condições de rejeição de carga.

Para esta situação, pode ser desejável que cuidadosos estudos sejam feitos e que alguns equipamentos especiais de resposta rápida sejam instalados para reduzir o excesso de energia reativa gerada pela linha.

Outro ponto que merece atenção diz respeito ao comportamento eletro-mecânico de grandes feixes assimétricos de subcondutores e feixes de subcondutores submetidos a diferentes condições de vento e de carregamento pesado.

## **4 ESTUDO COMPARATIVO**

Neste capítulo serão analisados os efeitos causados diretamente nos parâmetros da linha de transmissão, principalmente sua impedância característica e potência natural, ao se aplicar os conceitos de Linha de Potência Natural Elevada a uma concepção típica de linha de transmissão de 500kV. Inicialmente será analisado o efeito da aplicação isolada da técnica de compactação entre fases e da técnica de expansão do feixe e finalmente o efeito da aplicação completa dos conceitos de Linha de Potência Natural Elevada.

Uma planilha no software Microsoft Excel foi criada com todas as fórmulas e cálculos dos parâmetros elétricos de seqüência positiva e zero e partir dela foram iterados os valores para cada nova configuração geométrica objetivando-se a redução da impedância característica e o aumento na potência natural da linha.

### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DA TORRE DE REFERÊNCIA**

Como base do estudo comparativo foi utilizada a topologia de torre VX-Simétrico conforme visto no capítulo 3.4 e exposta pela Figura 16. Esta topologia foi escolhida por ser uma das mais usuais em projetos de linhas de transmissão de 500kV e apresentar vasta aplicação no território brasileiro pelas empresas do setor elétrico.

Cabe salientar que esta topologia foi adotada apenas como configuração inicial de referência e que a partir dela a disposição das fases e dos feixes de subcondutores não tem o compromisso de se ajustar a esta torre.





## 4.2 DADOS DO CABO CONDUTOR E CABO PÁRA-RAIOS

Como condutor foi utilizado o cabo de alumínio termorresistente com alma de aço (T-ACSR) Grosbeak de bitola 636 MCM conforme o Quadro 5 e como cabo pára-raios foi utilizado o cabo OPGW (optical ground wire) conforme o Quadro 6.

**Quadro 5 – Dados do Cabo Condutor**

Condutor	Grosbeak
Bitola (MCM)	636,0
Seção Transversal (mm <sup>2</sup> )	322,33
Diâmetro (mm)	25,16
Raio (mm)	12,58
Ampacidade (A)	773
Coefficiente de variação da resistência a 20°C (1/°C)	0,00403
Resistência elétrica máxima a 20°C (Ω/km)	0,0899

Fonte: Nexans, 2005

**Quadro 6 – Dados do Cabo Pára-raios**

Condutor	OPGW
Diâmetro (mm)	13,8
Raio (mm)	6,9
Resistência elétrica máxima a 20°C (Ω/km)	0,5
Permeabilidade magnética	10

Fonte: Nexans, 2005

## 4.3 DADOS DA LINHA

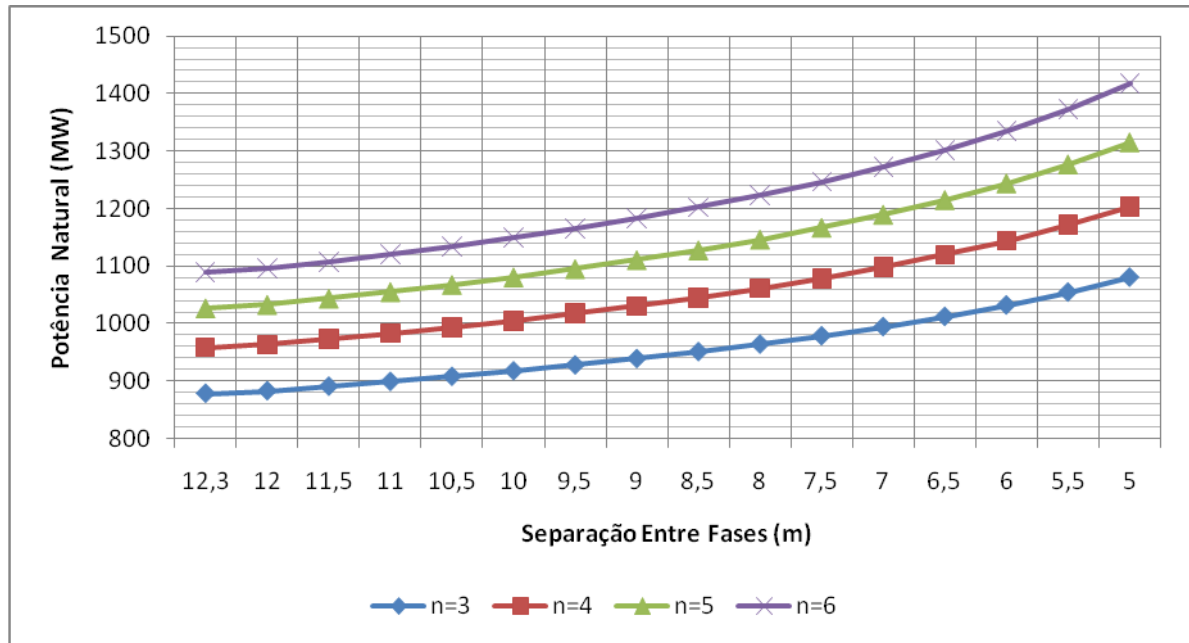
Os dados relevantes da linha para os cálculos são mostrados no Quadro 7.

**Quadro 7 – Dados da Linha**

Tensão Nominal	500kV
Frequência de Operação	60Hz
Temperatura de Projeto	75°C
Nº de Subcondutores por fase	de 3 a 6

## 4.4 COMPACTAÇÃO ENTRE FASES

Através da técnica de compactação entre fases, mantendo-se a distância usual de 0,457 metros entre subcondutores no feixe, a partir das medidas de referência da torre típica, obtiveram-se os seguintes resultados na potência natural conforme o gráfico da Figura 17.



**FIGURA 17** – Compactação entre fases e aumento da potência natural.

A partir da análise dos dados obtêm-se ganhos que variam de 23 a 30% de aumento da potência natural da linha. Estes ganhos variam dependendo da configuração do número de subcondutores por fase no feixe conforme o Quadro 8.

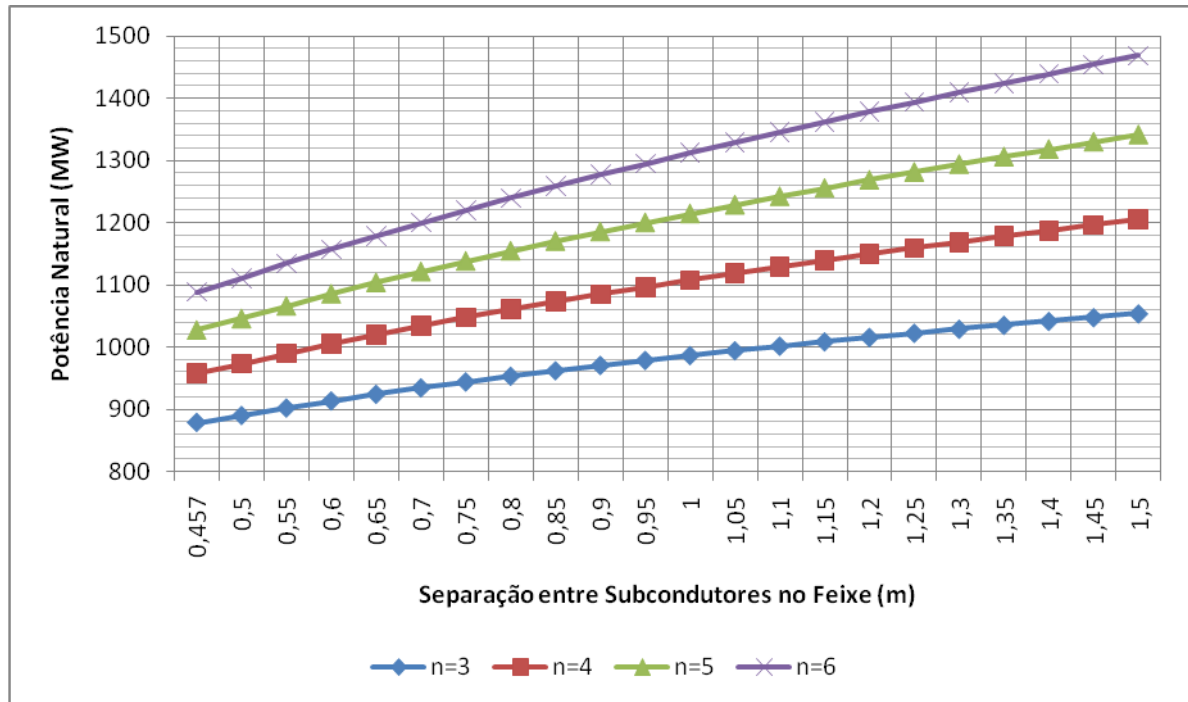
**Quadro 8** – Potência Natural (em MW) em função da compactação entre fases e número de subcondutores por fase.

	n=3	n=4	n=5	n=6
<b>Torre Típica</b>	878,18	958,17	1027,01	1088,70
<b>Compactação Máxima</b>	1080,18	1203,78	1314,48	1417,26
<b>Ganho</b>	23%	25,63%	27,99%	30,18%

Percebe-se que o aumento do número de subcondutores por fase no feixe gera um aumento pouco significativo na potência natural em relação ao ganho proporcionado pela compactação máxima entre as fases.

#### 4.5 FEIXE EXPANDIDO

Através da técnica de expansão do feixe de subcondutores, mantendo-se constante a distância entre fases, a partir das medidas de referência da torre típica, obtiveram-se os seguintes resultados na potência natural conforme o gráfico da Figura 18.



**FIGURA 18** – Expansão do feixe de subcondutores e aumento da potência natural.

Da mesma forma como na técnica de compactação entre fases, a expansão do feixe de subcondutores proporcionou ganhos da ordem de 20 a 34% de aumento da potência natural da linha. A variação destes ganhos conforme o número de subcondutores por fase é visualizada no Quadro 9.

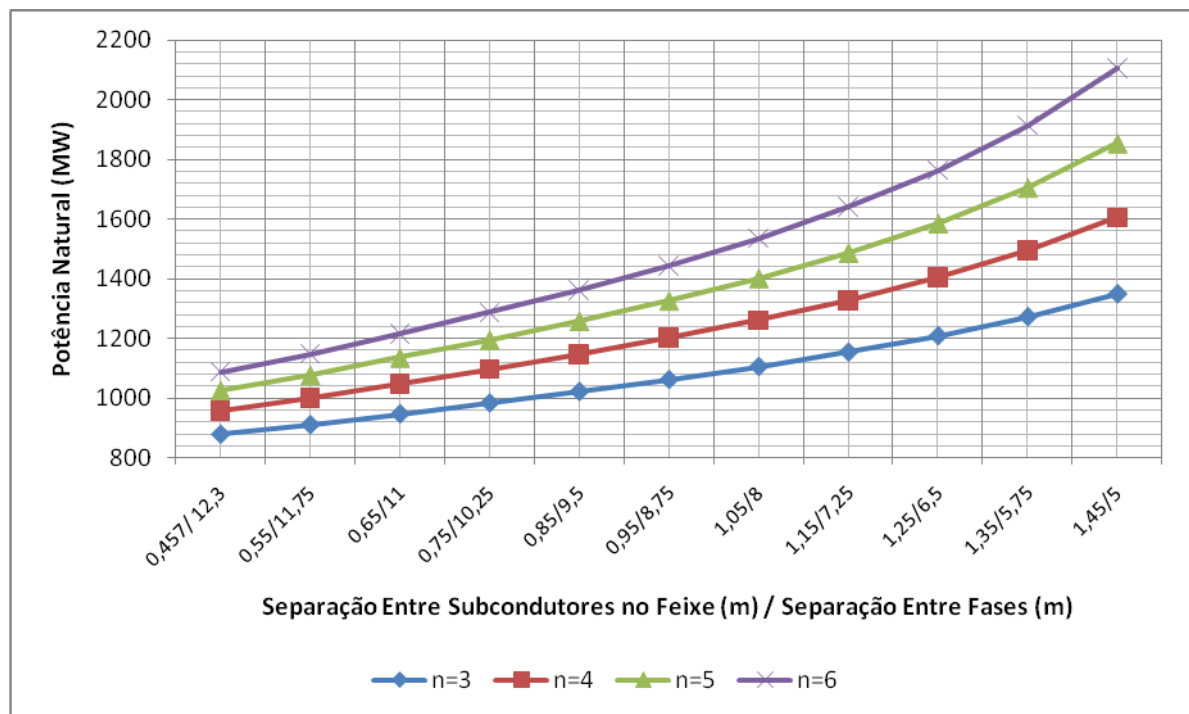
**Quadro 9 – Potência Natural (em MW) em função da expansão do feixe e número de subcondutores por fase.**

	n=3	n=4	n=5	n=6
<b>Torre Típica</b>	878,18	958,17	1027,01	1088,70
<b>Expansão do Feixe Máxima</b>	1054,12	1205,04	1341,13	1468,50
<b>Ganho</b>	20,03%	25,76%	30,59%	34,89%

Igualmente neste caso os ganhos em aumento da potência natural são equivalentes a ambas as técnicas. Sendo a técnica do feixe expandido mais atrativa por exigir modificações menos significativas na topologia de cabeça de torre, sendo necessária apenas modificações nas ferragens e suportes dos feixes de subcondutores.

#### 4.6 COMPACTAÇÃO ENTRE FASES E EXPANSÃO DO FEIXE

Na aplicação completa da teoria de Linha de Potência Natural Elevada, atuam-se em ambas as variáveis, compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores, e a partir das medidas de referência da torre típica, obtiveram-se os seguintes resultados na potência natural conforme o gráfico da Figura 19.



**FIGURA 19** – Compactação Entre Fases, Expansão do feixe de subcondutores e aumento da potência natural.

Diferentemente da aplicação das técnicas isoladas, os ganhos com a compactação entre fases e a expansão do feixe de subcondutores, simultaneamente, geram ganhos extraordinários no aumento da potência natural. Estes ganhos variam de 50 a quase 100% de aumento na potência natural em relação à torre típica adotada como referência conforme o Quadro 10.

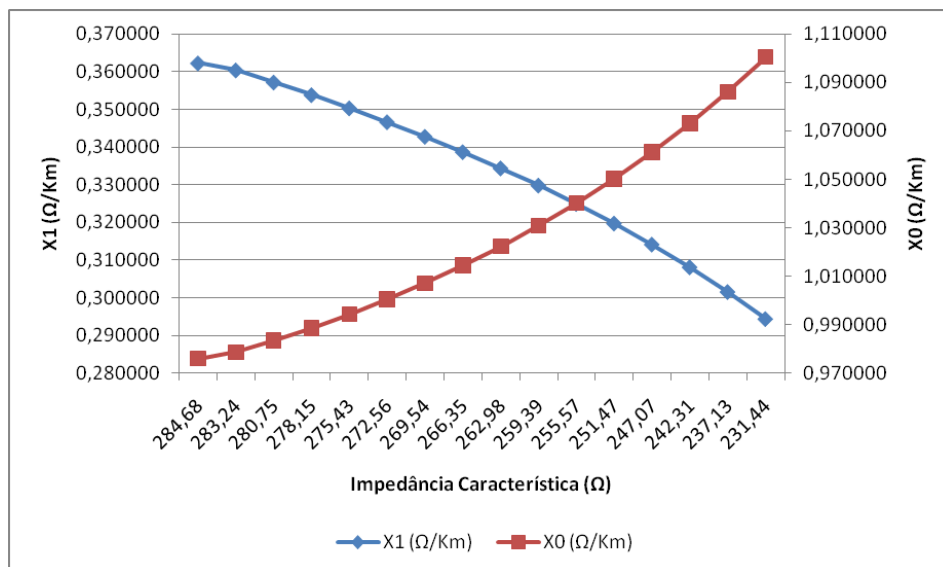
**Quadro 10** – Potência Natural (em MW) em função da expansão do feixe, e número de subcondutores por fase.

	n=3	n=4	n=5	n=6
<b>Torre Típica</b>	878,18	958,17	1027,01	1088,70
<b>Compactação Entre Fases e Expansão do Feixe Máxima</b>	1349,27	1605,12	1854,58	2106,12
<b>Ganho</b>	53,64%	67,52%	80,58%	93,45%

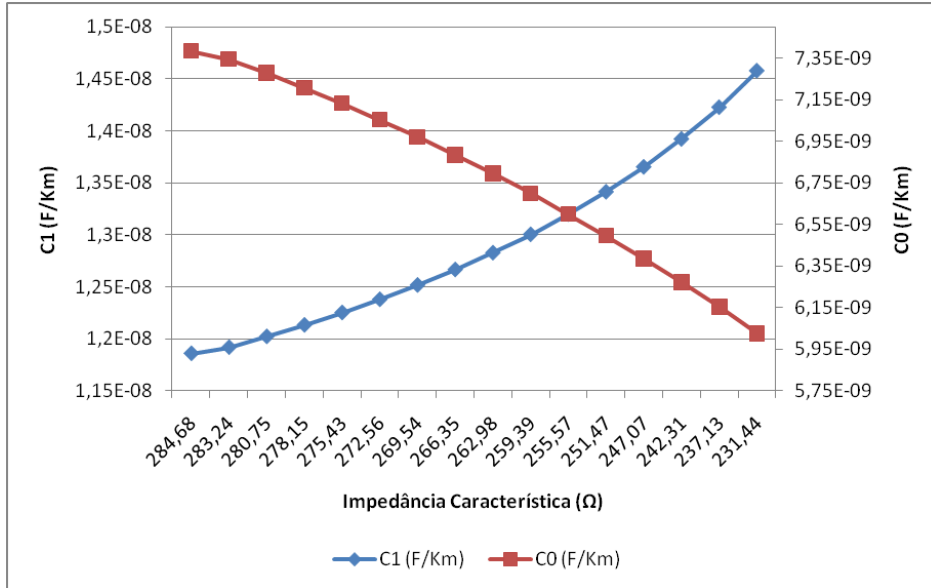
Conforme o objetivo e a teoria, os ganhos chegaram a quase 100% de aumento na potência natural para a compactação entre fases e expansão máxima do feixe de subcondutores. Utilizando-se medidas intermediárias na geometria dos condutores, conseguem-se ganhos satisfatórios sem comprometer a coordenação de isolamento.

#### 4.7 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SEQÜÊNCIA POSITIVA E ZERO

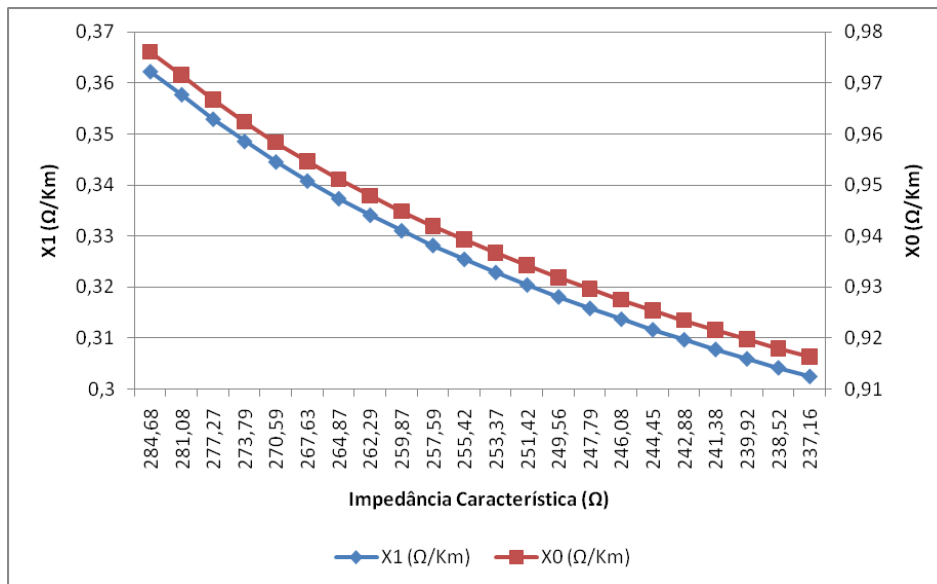
Apesar de a impedância característica e a potência natural dependerem apenas dos parâmetros de seqüência positiva, a seqüência zero sofre influência de forma peculiar com a variação da geometria dos condutores. Os parâmetros de reatância e capacitância mantêm a mesma proporção de variação, independente do número de subcondutores por fase. As Figuras 20, 21, 22, 23, 24 e 25 ilustram tais variações para a configuração de 3 subcondutores por fase.



**FIGURA 20** – Variação da reatância indutiva de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na compactação entre fases com  $n=3$ .



**FIGURA 21** – Variação da capacitância de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na compactação entre fases com n=3.



**FIGURA 22** – Variação da reatância indutiva de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na expansão do feixe de subcondutores com n=3.

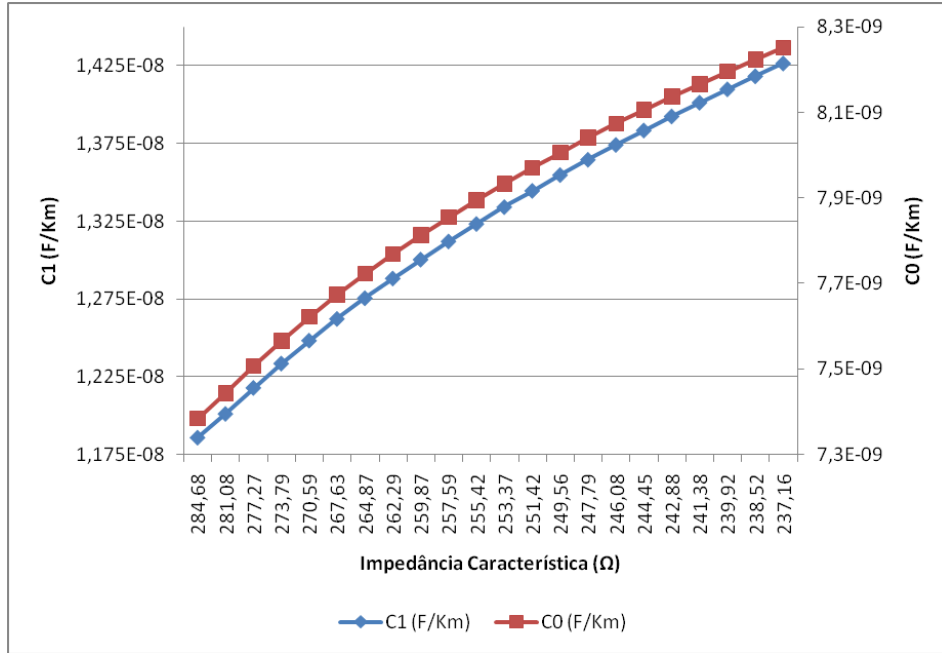


FIGURA 23 – Variação da capacitância de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na expansão do feixe de subcondutores com n=3.

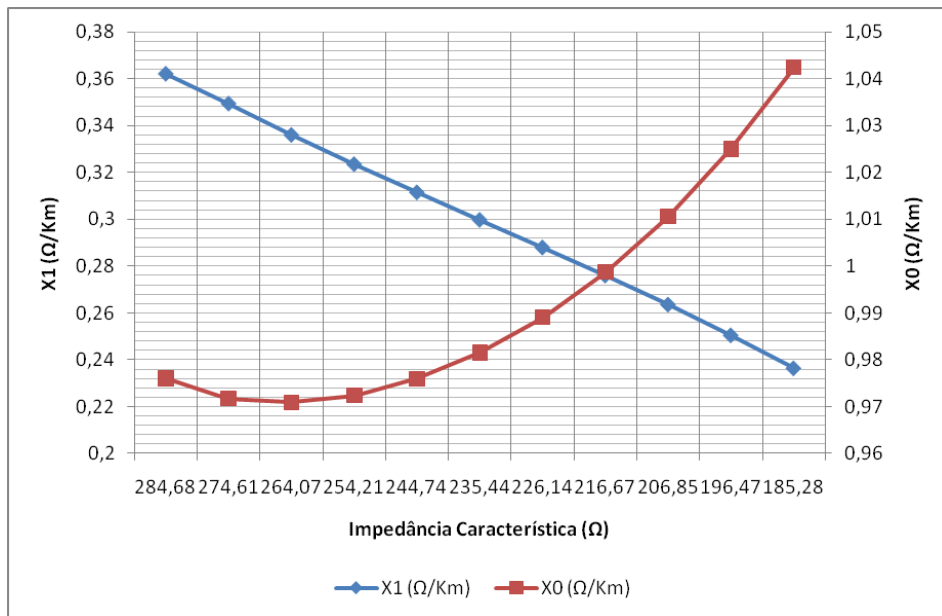
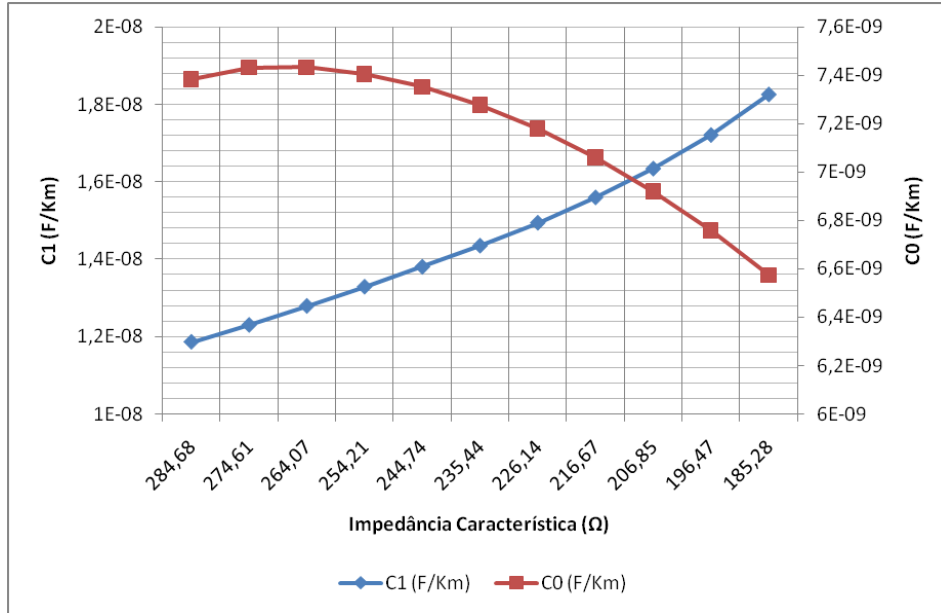


FIGURA 24 – Variação da reatância indutiva de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores com n=3.



**FIGURA 25** – Variação da capacitância de seqüência positiva e zero em função da impedância característica na compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores com  $n=3$ .



## 5 CONCLUSÃO

Segundo dados da Eletronorte, o Brasil tem um potencial hidroelétrico estimado em 261 GW, sendo que apenas 30% está em operação ou em construção. Por ser um país com dimensões continentais, onde a maior parte deste potencial está distante dos grandes centros urbanos, o transporte desta energia através de linhas de transmissão é fundamental.

Em contrapartida a esse potencial inexplorado, estão sendo impostas a cada dia mais restrições ambientais que dificultam as liberações das faixas de passagem e corredores para as linhas de transmissão.

Neste contexto as técnicas de Linha de Potência Natural Elevada se destacam como um meio promissor no melhor aproveitamento da capacidade de transmissão na recapacitação de linhas já existentes e principalmente no projeto de novas linhas de transmissão.

Através deste estudo comparativo foi possível comprovar, por meio da teoria básica dos parâmetros elétricos, que ganhos significativos são obtidos com a aplicação isolada de cada técnica. Na aplicação completa, ganhos ainda maiores, da ordem de 100%, podem ser atingidos no aumento da potência natural da linha de transmissão.

Embora existam muitos benefícios, a variação nos parâmetros de seqüência zero não pode ser ignorada. Maiores estudos e pesquisas devem ser realizados para investigar o comportamento transitório no projeto de linhas de transmissão baseados nestas técnicas.

Cabe salientar que para o estudo comparativo foram ignoradas os fatores relacionados à otimização do campo elétrico nos subcondutores, à coordenação do isolamento entre a torre e os subcondutores, bem como a manutenção em linha viva, fatores estes que podem ser agravados na aplicação destas técnicas. Foram avaliados apenas os ganhos com a compactação entre fases e expansão do feixe de subcondutores independentemente da topologia de cabeça de torre.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Considerar os efeitos causados pela variação dos parâmetros de seqüência zero;
- Limitar os cálculos e aplicação da técnica considerando a coordenação de isolamento;
- Considerar arranjos assimétricos dos subcondutores no feixe;
- Realizar um estudo comparativo com variadas topologias de cabeça de torre.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDROV, G. N.; NOSOV, I. M., **The Increase of Effectiveness of Transmission Lines and Their Corridor Utilization.** Cigré Session Paper 38-104, Paris, 1996.

AMON, J. F. et al. **Otimização de Linha de Transmissão não Convencional de Alta Capacidade em 500 kV.** In: V CITENEL, 22 a 24 jun. 2009. Belém, PA.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2008.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2009.

DART, F. C. et al. **Validação de uma nova tecnologia para transmissão em 500 kV.** In: XV SNPTEE, 17 a 22 out. 1999. Foz do Iguaçu, PR.

EIS, **Electric Transmission and Transmission Facilities.** Disponível em: <<http://solareis.anl.gov/guide/transmission/index.cfm>>. Acesso em: 3 de Nov. 2009

FERNANDES, J. H. M. et al. **500 kV Compact Line of Eletronorte Brazil – Conception, Electrical and Mechanical Design.** Cigré Session Paper 22-304, Paris, 1990.

FERNANDES, J. H. M. et al. **Eletronorte and Challenge of Long-distance Transmission in Brazil.** Cigré Session Paper B2-111, Paris, 2008.

KIESSLING, F. et al. **Overhead Power Lines.** Verlag: Springer, 2003. 759 p.

MACHADO, V. G. et al. **LT 500kV Interligação Norte/Sul III – Trecho 2 – Solução Estrutural com Torre Estaiada Monomastro e Feixe Expandido.** In: XIX SNPTEE, 14 a 17 out. 2007. Rio de Janeiro, RJ.

NETO, A. P. et al. **Novos Métodos Para Aumento de Potência de LT até 230kV: Estudos, Projeto e Implantação Comercial.** In: XV SNPTEE, 17 a 22 out. 1999. Foz do Iguaçu, PR.

NEXANS, **Catálogo de Cabos de Alumínio – Condutores Nus.** São Paulo, 2005. 50p.

RÉGIS, O. JR. et al. **Estudos e Aplicação do Feixe Expandido em LT de 500 kV**. In: XIV SNPTEE, 1997. Belém, PA.

RÉGIS, O. JR. et al. **Expanded bundle technique: The application of HSIL TL concept to increase the capacity of overheads lines**. Cigré Session Paper 22-207, Paris, 1998.

RÉGIS, O. JR. et al. **LPNE – A Técnica e a Cultura da Adequação**. In: XIV SNPTEE, 1997. Belém, PA.

RÉGIS, O. JR., **Increasing the transmission capacity of overheads lines – High Surge Impedance Loading technique**. Electra, n. 221, p.20-27, ago. 2005.

RÉGIS, O. JR.; DART, F. C.; CRUZ, A. L. P., **Avaliação comparativa das concepções de linhas de potência natural elevada em 500 kV utilizadas no Brasil**. In: XIII ERIARC, 24 a 28 mar. 2009. Puerto Iguazú, Argentina.

RÉGIS, O. JR.; DOMINGUES, L. A. M. C. **LT 2x230 kV Transformável para 1x500 kV – Estudos Elétricos para Operação com Configuração de Feixe Super Expandido**. In: XVII SNPTEE, 19 a 24 out. 2003. Uberlândia, MG.

VILELA, R. F. T., **Identificação de perigos na recapacitação de Linhas de Transmissão**. 2001. 214 p. Tese (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, Recife, 2001

ZOBEL, E. S.; ROHLFS, A. F.; FLUGUM, R. W., **Narrower Transmission Corridors Made Possible with New Compacted Conductor Systems for EHV and UHV Lines**. Cigré Session Paper 22-06, Paris, 1980.