



**XV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT/01

**17 à 22 de outubro de 1999
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil**

**GRUPO III
GRUPO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (GLT)**

VALIDAÇÃO DE UMA NOVA TECNOLOGIA PARA TRANSMISSÃO EM 500 kV

Fernando Chaves Dart*
Luís Adriano de M. Cabral Domingues
Carlos Ruy Nunez Barbosa

Oswaldo Régis Júnior
Antônio Pessoa Neto

Sebastião J. Gusmão Cavalcanti

CEPEL

CHESF

Consultor

RESUMO

O artigo apresenta os resultados dos estudos e ensaios que levaram ao desenvolvimento de uma nova ferragem para linhas de transmissão de 500 kV de alta capacidade chamada Feixe Expandido.

Mostram-se resultados das comparações entre a nova ferragem e a convencional de 18", visando validar o desempenho da nova configuração.

Este trabalho contou com o apoio e participação ativa de fabricantes de ferragens e isoladores.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de Transmissão, LPNE (Linha de Potência Natural Elevada), FEX (Feixe Expandido), Corona, Radiointerferência, Impulso Atmosférico, Impulso de Manobra, Isoladores, Campo Elétrico

1.0 - INTRODUÇÃO

A definição de um novo modelo para o Setor Elétrico Brasileiro aponta para a otimização do sistema de transmissão buscando a redução de custos para torná-lo competitivo e mais confiável. Devido às características peculiares do sistema elétrico brasileiro, como por exemplo a disponibilidade de centros de carga afastados das regiões onde ainda é possível aproveitar recursos hidráulicos abundantes, há necessidade de se transportar grandes blocos de energia.

Considerando ainda que as grandes áreas regionais são, em geral, fracamente interligadas e que a maioria dessas regiões carece de um sistema elétrico mais malhado para garantir uma maior confiabilidade, a busca de novas tecnologias de transmissão que unam

as premissas básicas de confiabilidade e de redução de custos, tem sido uma preocupação constante de diversas empresas do setor como a ELETROBRÁS, CEPEL, CHESF e FURNAS.

Uma tecnologia que vem se tornando uma alternativa real, tanto na construção de novas linhas de transmissão como também na recapacitação de linhas existentes, é a tecnologia de Linhas de Potência Natural Elevada – LPNE.

A decisão da CHESF de construir o segundo circuito de interligação Norte-Nordeste, uma linha de transmissão em 500 kV com 740 km de extensão entre as subestações de Presidente Dutra e Fortaleza, empregando esta tecnologia, é uma prova incontestada do nível de maturidade da mesma.

O emprego da tecnologia LPNE que resultou na expansão dos feixes das fases – LPNE-FEX, permitiu a adoção do mesmo padrão estrutural de 500 kV até então empregado pela CHESF ao invés do emprego de torres compactas tipo raquete. A economia assim conseguida foi estimada em 30 milhões de dólares, cerca de 11 % do empreendimento, devido a redução do peso estrutural. A principal alteração no padrão estrutural de 500 kV da CHESF foi a adoção do condutor tipo RAIL (954 MCM) ao invés do condutor GROSBEAK (636 MCM).

2.0 – LPNE - CONCEITOS BÁSICOS

O conceito original de LPNE propõe modificações consideráveis nos arranjos geométricos das fases e feixes dos condutores e resulta num aumento da capacidade de transmissão de até duas vezes a

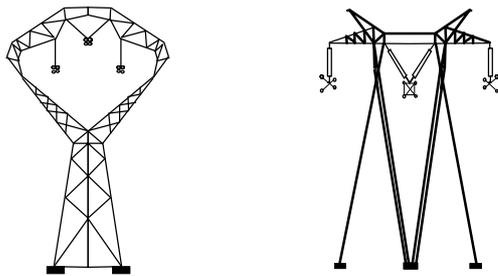
* CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL
Caixa Postal 68.007 - CEP 21.941-590 - Rio de Janeiro, RJ
Tel.: (021) 598-2220 - Fax (021) 270-4189
e-mail : dart@fund.cepel.br

capacidade de transmissão das linhas tradicionais nos mesmos níveis de tensão [1].

A otimização do campo elétrico superficial dos condutores dos feixes de uma LPNE/FEX não é tão completa como em uma LPNE no seu conceito mais puro, mas ainda assim apresenta uma melhor distribuição de campo elétrico superficial que nos feixes tradicionais.

O emprego das LPNE/FEX permite sintonizar os parâmetros da LT e a capacidade de transmissão à necessidade do sistema elétrico de uma determinada região, o segundo circuito de interligação Norte-Nordeste é um dos exemplos de aplicação dessa tecnologia [2, 3].

A Figura 1 e a Tabela 1 ilustram a concepção estrutural e os parâmetros da LT compacta inicialmente estudada para o segundo circuito de interligação N-NE e a solução LPNE/FEX a ser adotada pela CHESF [4].



Torre autoportante compacta Torre estaiada – LPNE/FEX

FIGURA 1 – Concepções estruturais para o segundo circuito de interligação N-NE

TABELA 1 – Parâmetros elétricos - seqüência positiva

Parâmetros	Compacta	LPNE/FEX
R1 (Ω/km)	0.017	0.017
X1 (Ω/km)	0.267	0.270
B1 ($\mu\text{S}/\text{km}$)	6.13	6.19
Zc1 (Ω)	208.7	208.8
SIL (MW)	1200	1200

3.0 – FERRAGENS – CONSIDERAÇÕES

A concepção das ferragens da LPNE/FEX (Figura 2), contemplou algumas características específicas para o sistema elétrico brasileiro, como por exemplo a necessidade de permitir, de uma maneira mais simples, a manutenção em linha viva. Como este procedimento, para a tensão de 500 kV, obriga aos eletricitistas trabalhar com bastões isolantes com as dimensões das cadeias de isoladores, a presença de anéis anti-corona, que diminuem a solicitação dos primeiros isoladores das cadeias tradicionais, dificultam a execução do serviço.



FIGURA 2 – Ferragem da fase lateral LPNE/FEX 500 kV da CHESF – ensaio de distribuição de potencial na cadeia realizado no CEPTEL

No projeto da ferragem da LPNE/FEX os primeiros isoladores da cadeia ficam blindados pela própria ferragem. Este aspecto pode ser observado na Figura 3 que apresenta a distribuição de campo elétrico ao redor da fase lateral, dessa forma de anéis anti-corona são dispensáveis [5].

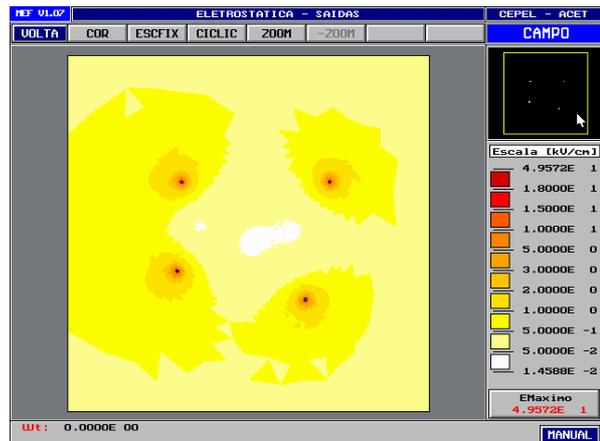


FIGURA 3 – Distribuição de campo elétrico ao redor do feixe da fase lateral da LPNE/FEX – 500 kV

Cinco meses antes da CHESF decidir adotar a LPNE/FEX para o segundo circuito de interligação N-NE, protótipos de ferragens de diversos fabricantes com esta nova concepção foram ensaiados no CEPTEL.

As ferragens da LPNE/FEX 500 kV diferem basicamente das ferragens tradicionais (18'') pelas suas dimensões (Figura 4).

A disposição dos condutores nas fases é a única condição a ser respeitada por todos os fabricantes, sendo assim os ensaios elétricos eram primordiais para tomada de decisão da CHESF em adotar a tecnologia LPNE/FEX.

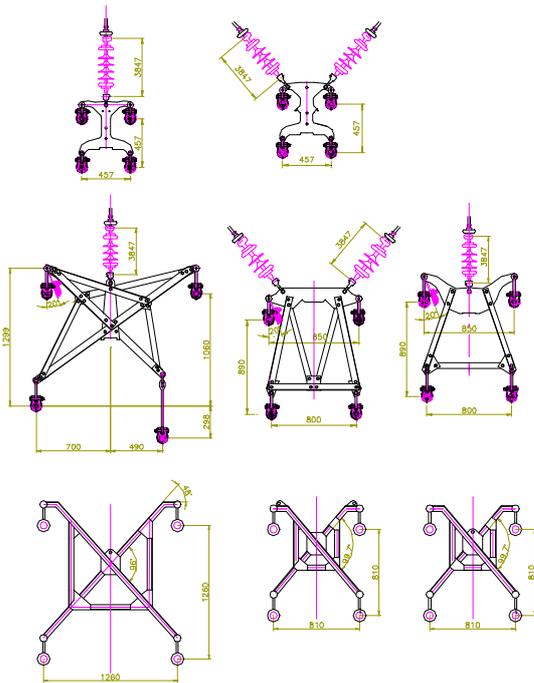


FIGURA 4 – Ferragens para 4 condutores RAIL (954 MCM), respectivamente: 18”, LPNE/FEX do 2º circuito de interligação N-NE e LPNE/FEX regular (protótipo)

Foram realizados ensaios elétricos em protótipos da SADE/VIGESA, PLP e comparados com uma ferragem de 18”.

Posteriormente à decisão da CHESF de adotar a tecnologia LPNE/FEX, o CEPEL desenvolveu protótipos com espaçamento regular entre os condutores do feixe, que atingem os mesmos parâmetros elétricos do feixe expandido concebido para interligação (Figuras 5). Os mesmos foram incluídos na presente comparação visto que esta alternativa, no futuro, pode ser empregada em outros empreendimentos.



FIGURA 5 – Detalhe do protótipo de ferragem da fase lateral, com espaçamento regular, para 4 condutores RAIL (954 MCM), desenvolvido pelo CEPEL

4.0 – ENSAIOS REALIZADOS

Foram realizados ensaios de corona visual, tensão de radio interferência, tensão suportável de impulso atmosférico e de manobra e distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores no laboratório de Alta Tensão do CEPEL [6, 7, 8, 9]. Para tanto foram montados “mock-up” representando a torre típica da interligação – torre estaiada tipo V3 da CHESF, para fase lateral (Figura 6) e central.



FIGURA 6 – “Mock-up” da fase lateral da torre V3 da CHESF

A tensão de ensaio foi determinada via simulação digital com o programa TRICAMP [10], levando em consideração as dimensões do hall de Alta Tensão com os equipamentos nele contidos e considerando a altura de 10 m para o condutor inferior do arranjo.

A tensão de ensaio é a tensão a ser aplicada à configuração de ensaio, garantindo que o campo elétrico superficial dos condutores dessa configuração seja igual ao campo elétrico superficial dos condutores da LT.

Em todos os ensaios foram utilizados isoladores do tipo disco, de 10”, carga de ruptura 160 kN cedidos pela ELECTROVIDRO.

Os ensaios foram realizados utilizando-se tubos de alumínio de diâmetro externo de 33 mm ao invés do cabo condutor RAIL (954 MCM).

5.0 – ANÁLISE DOS ENSAIOS

5.1 Ensaio de corona visual

Os ensaios foram realizados elevando-se a tensão até o surgimento de corona, a seguir, eleva-se a tensão até a observação de corona generalizado, sendo então reduzida o valor da tensão até a extinção do corona e, posteriormente, até zero. Este procedimento foi repetido 3 vezes.

Em função dos estudos de campo elétrico realizados quando da concepção da ferragem de LPNE/FEX (Figura 4), esperava-se um melhor desempenho que o das ferragens de 18". Este fato foi comprovado durante os ensaios realizados, tendo as ferragens de LPNE/FEX apresentado corona visual para tensão de ensaio equivalente à linhas de transmissão de 750 kV, como a apresentado na Figura 7.



FIGURA 7 – Ensaio de corona visual - ferragens LPNE/FEX 2º circuito de interligação N-Ne

5.2 Ensaio de tensão de radiointerferência

Os ensaios foram realizados elevando-se a tensão até 20 % acima do valor calculado da tensão de ensaio, sendo a seguir reduzida, em degraus, até zero e novamente aumentada até o valor inicial. Este procedimento foi repetido 3 vezes.

TABELA 2 – Ensaio de tensão de radiointerferência

FERRAGEM	TENSÃO DE ENSAIO (kV)	TRI (μ V)
18"	296,0	83,6
FABRICANTE 1	265,5	23,0

As ferragens de LPNE/FEX apresentaram desempenho superior às ferragens de 18" acompanhando os resultados dos ensaios de corona visual (Tabela 2).

Os protótipos de feixes regular desenvolvidos no CEPEL não apresentaram resultados tão bons quanto os dos fabricantes (447μ V para a ferragem da fase

central, cadeia em "V"), mas ainda assim inferiores a 1000μ V estabelecidos por norma.

5.3 Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico

A tensão suportável nominal foi determinada através do método dos acréscimos e decréscimos, com 30 aplicações nas polaridades positiva e negativa, a forma de impulso foi 1.2/50 μ s.

Pela Tabela 3 pode-se constatar o bom desempenho das ferragens LPNE/FEX. Nota-se que ao contrário das ferragens tradicionais os valores de polaridade negativa são inferiores aos de polaridade positiva para todos os ensaios realizados com as as ferragens de LPNE/FEX, essa inversão está sendo objeto de estudos no CEPEL.

TABELA 3 – Ensaio da tensão suportável de impulso atmosférico

FERRAGEM	TENSÃO SUPORTÁVEL POLARIDADE NEGATIVA (kV)	TENSÃO SUPORTÁVEL POLARIDADE POSITIVA (kV)
18"	2161,9	1981,3
FABRICANTE 1	2160,4	2278,4
FABRICANTE 2	1840,8	1984,3
REGULAR LATERAL	2090,0	2249,4
REGULAR CENTRAL "I"	2167,4	2187,5
REGULAR CENTRAL "V"	1616,7	1731,4

A Figura 8 ilustra um ensaio de determinação da tensão suportável de impulso atmosférico numa ferragem da fase central.



FIGURA 8 – Ensaio de determinação da tensão suportável de impulso atmosférico

5.4 Ensaio de tensão suportável de impulso de manobra

A tensão suportável nominal foi determinada através do método dos acréscimos e decréscimos, com 30 aplicações nas polaridades positiva, a forma de impulso foi 250/2500 μ s.

Estes ensaios foram realizados com polaridade positiva uma vez que os realizados anteriormente, em ferragens LPNE/FEX, indicaram que a polaridade negativa apresenta, como nas ferragens tradicionais, valores de tensão suportável inferiores aos de polaridade positiva.

Pela Tabela 5 pode-se constatar um desempenho equivalente entre as ferragens LPNE/FEX e 18".

TABELA 5 – Ensaio da tensão suportável à impulso de manobra

FERRAGEM	TENSÃO SUPORTÁVEL POLARIDADE NEGATIVA (kV)
18"	1457,3
FABRICANTE 1	1427,3
FABRICANTE 2	1332,9
REGULAR LATERAL	1430,0
REGULAR CENTRAL "I"	1427,7
REGULAR CENTRAL "V"	1140,4

Pode-se observar ainda que as descargas ocorridas sempre saltaram para a ferragem LPNE/FEX protegendo a cadeia de isoladores. Este fato pode ser atribuído à geometria dos feixes e conseqüente distribuição de campo elétrico.

A Figura 9 ilustra um ensaio de determinação da tensão suportável de manobra numa ferragem da fase lateral.



FIGURA 9 – Ensaio de determinação da tensão suportável de impulso de manobra

5.5 Ensaio de distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores

O procedimento de ensaio consistiu no posicionamento vertical de esferas de 30 mm de diâmetro com espaçamento de 6,2 mm no isolador sob ensaio, no mesmo plano formado pela cadeia de isoladores e condutores. Determina-se então o valor médio de 5 aplicações de tensão, com intervalo de

1 minuto, diretamente nas esferas até a ruptura do ar. Repetiu-se este procedimento para os 6 primeiros isoladores de cada arranjo a partir da ferragem.

Os resultados obtidos (Figura 10) confirmam os resultados das simulações digitais realizadas quando da concepção das ferragens (Figura 11).

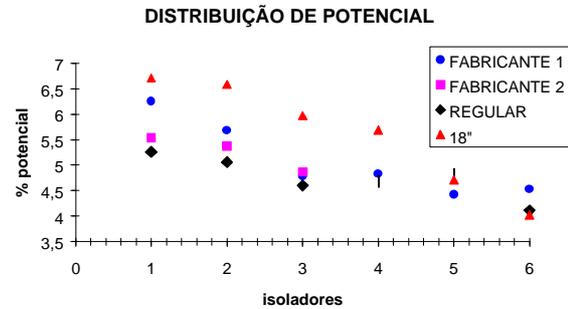


FIGURA 11 – Distribuição de potencial ao longo dos 6 primeiros isoladores da cadeia

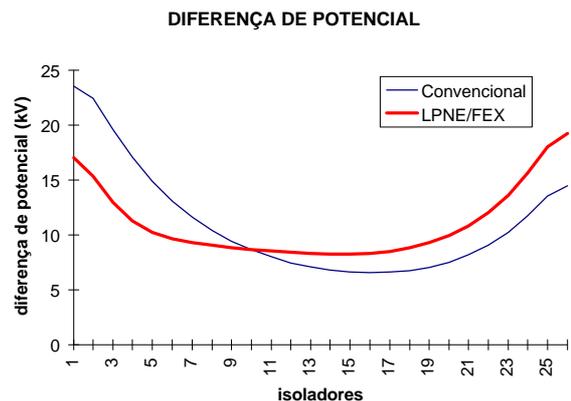


FIGURA 12 – Perfil de potencial ao longo da fase lateral da LPNE/FEX – 500 kV, o isolador 1 é o mais próximo da ferragem

6.0 – CONCLUSÕES

A decisão da CHESF de construir o segundo circuito de interligação Norte-Nordeste empregando LPNE/FEX, uma linha de transmissão em 500 kV com 740 km de extensão entre as subestações de Presidente Dutra e Fortaleza, é uma prova incontestada do nível de maturidade da tecnologia.

Os ensaios elétricos realizados no CEPTEL comprovaram o desempenho altamente satisfatório das ferragens LPNE/FEX, como pode ser observado nos ensaios de corona (corona visual e TRI), determinação da tensão de impulso atmosférico e de manobra.

As cadeias de isoladores, quando da utilização das ferragens LPNE/FEX ficam mais protegidas da

ocorrência de surtos de manobra. Este fato pode ser atribuído à geometria das ferragens que proporciona uma melhor distribuição de campo elétrico.

A concepção básica da ferragem LPNE/FEX tem a vantagem adicional de proteger os primeiros isoladores da cadeia, facilitando inclusive a manutenção de linha viva pela não utilização de anéis anti-corona.

O feixe expandido regular apresenta desempenho equivalente ao LPNE/FEX e tem a vantagem adicional de facilitar o processo de montagem.

7.0 – BIBLIOGRAFIA

- (1) RÉGIS JUNIOR, O. CAVALCANTI, S. J. G., MAIA, M. J. A., WAVRIK, J. F. A. G., PODPORKIN, G. V. - Recapacitação de Circuitos 230kV com o Conceito de Feixe Expandido - XIII SNPTEE, Grupo III - Linhas de Transmissão, Camboriú, SC, 1995.
- (2) RÉGIS JUNIOR, O. CAVALCANTI, S. J., NETO, A. P., DART, F. C., - Estudo e Aplicação do feixe Expandido em LT de 500 kV – XIV SNPTEE, Grupo III - Linhas de Transmissão, Belem, PA, 1997.
- (3) DART, F. C., DOMINGUES, L. A. M. C., CARVALHO, A. R. C. D., PING, W. W., SALLES, F. P., SALARI FILHO, J. C., RÉGIS JÚNIOR, CAVALCANTI, S. J. G., PESSOA NETO, A., ESMERALDO, P. C. V., MAIA, M. J. A. - The HSIL Line – A New Approach for System Planning – VI SEPOPE, Salvador, BA, 1998.
- (4) RÉGIS JUNIOR, O. CAVALCANTI, S. J. G., PESSOA NETO, A., DART, F. C., DOMINGUES, L. A. M. C., A. MAIA, M. J. A. – Expanded Bundle Technique: The Application of HSIL TL Concept to Increase the Capacity of Overhead Lines – CIGRÈ, Paris, FR, 1998.
- (5) CORDEIRO, C. A. M., GRUPO DE ESTUDO, - PROQUIP - Programa de qualificação de materiais e equipamentos do setor elétrico - isoladores para linhas de transmissão - XIII SNPTE, Grupo III - Linhas de Transmissão, Camboriú, SC, 1995.
- (6) ATALLAH, M. C. M. – Relatório de ensaio – CEPTEL/UNIAT – 1126/98 – R, 1998.
- (7) ATALLAH, M. C. M. – Relatório de ensaio – CEPTEL/UNIAT – 1130/98 – R, 1998.
- (8) MELLO, D. R. – Relatório de ensaio – CEPTEL/UNIAT – 1302/98 – R, 1998.
- (9) MELLO, D. R. – Relatório de ensaio – CEPTEL/UNIAT – 0080/99 – R, 1999.
- (10) DOMINGUES, L. A. M. C., FERNANDES, C., BARBOSA, C. R. N., DART, F. C., - Cálculo de Campo Elétrico pelo Método de Simulação de Cargas - Relatório CEPTEL 923/95.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos fabricantes de ferragens SADE/VIGESA e PLP pela cessão dos protótipos de ferragens e a ELECTROVIDRO pela cessão dos isoladores utilizados nos ensaios.

Agradecem ainda aos pesquisadores e técnicos do CEPTEL pelo apoio prestado na realização dos ensaios, a saber:

Manoel Cristovão M. Atallah
 Darcy Ramalho de Mello
 Ozéas Moreno Lima
 Frederico Domingod da Cruz
 Merineu Teixeira Duarte
 Milton Maurente
 Jorge Ribeiro de Mendonça
 Jorge Fonseca