



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC - 23
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENÇÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

RELIGAMENTO MONOPOLAR EM NOVAS CONCEPÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

**Fernando C. Dart(*)
Rogério M. de Azevedo
Antônio Ricardo Carvalho**

CEPEL

RESUMO

O objetivo deste informe técnico é mostrar que a construção de linhas de transmissão projetadas segundo a tecnologia das Linhas de Potência Natural Elevadas -LPNE, não comprometem uma eventual necessidade de utilização do religamento monopolar, podendo inclusive apresentar um desempenho melhor se comparadas com linhas compactas equivalentes. Com relação às linhas convencionais, as vantagens podem ser obtidas no custo da implementação e aumento da capacidade de transmissão.

Neste artigo são apresentados dois exemplos empregando linhas de transmissão concebidas com os conceitos de LPNE nos quais obteve-se resultados satisfatórios.

A questão do religamento monopolar depende de vários fatores, inclusive da concepção do projeto. Em geral, projetos tradicionais, com acoplamento entre fases menor que as de linhas de transmissão projetadas com a tecnologia LPNE ou linhas de transmissão compactas, se adaptam melhor ao religamento monopolar.

PALAVRAS-CHAVE: Religamento monopolar, arco secundário, linhas compactas, LPNE.

1.0 - INTRODUÇÃO

A ocorrência de faltas monofásicas em linhas de transmissão é, notadamente, o defeito mais comum nestes equipamentos, sendo em sua grande maioria, causadas por descargas atmosféricas.

A utilização de religamento automático é extremamente benéfico na redução do tempo de interrupção da transmissão de energia e, no caso do religamento monopolar, as vantagens são ainda maiores, pois além da continuidade do suprimento de energia pelas duas fases sãs, é empregado para a preservação da estabilidade dos sistemas durante o período de extinção da falta e após, com repercussão na qualidade e confiabilidade do suprimento de energia.

Para o sucesso na utilização do religamento monopolar é necessário que o arco secundário tenha condições de extinguir-se antes que os pólos dos disjuntores extremos da linha de transmissão sejam religados. O tempo de extinção do arco, que deve ser menor que o tempo morto no qual o pólo do disjuntor permanece aberto, depende de vários fatores, entre eles, o acoplamento entre fases, a magnitude da corrente, a tensão de restabelecimento entre os terminais do arco, condições atmosféricas, etc.

Um outro aspecto importante é o fato da transmissão ou intercâmbio de energia entre diferentes empresas ou subsistemas, essencial para uma operação otimizada dos recursos energéticos, bem como a transmissão de grandes blocos de energia entre centros de carga e parques de geração remotos, serem cada vez mais necessários e freqüentes no cenário atual.

A busca da redução do custo na transmissão, seja por restrição de corredores para novas linhas, seja para garantir a atratividade do empreendimento, leva a alternativas que maximizem a potência transportada em relação ao investimento e à faixa ocupada. Os conceitos de linhas de transmissão compactas e a tecnologia LPNE, são uma evolução dos projetos de linhas de transmissão que não podem ser desprezados. Este artigo procura mostrar que a questão do religamento monopolar não é, necessariamente, uma limitação para a adoção dessas tecnologias.

Comparadas às linhas convencionais, as vantagens da tecnologia LPNE podem ser obtidas no custo da implementação e aumento da capacidade de transmissão, sem descartar o uso do religamento monopolar.

2.0 - POTÊNCIA NATURAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A potência natural de uma linha de transmissão é inversamente proporcional à impedância de seqüência positiva e é dada por

$$P_n = \frac{V^2}{Z_1} \quad (1)$$

A partir das equações do cálculo de impedâncias, pode-se mostrar que o afastamento dos condutores de uma mesma fase reduz o acoplamento magnético, causando redução da impedância própria ($Z_p \downarrow$) de cada fase.

Como a impedância de seqüência positiva pode ser calculada por

$$Z_1 = Z_p - Z_m \quad (2)$$

a redução da impedância própria se reflete em redução de Z_1 e no aumento da potência natural da linha.

No caso da torre compacta o ganho na potência natural ocorre por outro motivo. Mantém-se o feixe convencional e aproxima-se as fases, aumentando-se o acoplamento entre elas e, conseqüentemente, o valor das impedâncias mútuas ($Z_m \uparrow$). Com isto, também se obtém a redução de Z_1 .

Na LPNE, em seu conceito mais completo, consegue-se elevar sobremaneira a potência natural pela atuação nas duas variáveis, resultando em redução mais acentuada da impedância de seqüência positiva [1].

Com o fato de se ter uma aproximação maior das fases nas linhas compacta e também na LPNE, é de se esperar também, um aumento no acoplamento capacitivo. Este fato pode ser determinante na viabilidade ou não da utilização do religamento monopolar nestes projetos especiais de linhas.

3.0 - CRITÉRIOS UTILIZADOS

Foi adotado como critério, para verificar a probabilidade de extinção do arco secundário, as condições de amplitude da corrente do arco secundário associadas ao tempo morto do religamento, mostrado na Tabela 1, e também, ao valor da tensão de restabelecimento após a extinção da corrente de arco secundário com um tempo morto de 500ms, mostrado na Figura 1.

TABELA 1 - Condições para extinção do arco secundário em função do tempo morto.

Viabilidade	Corrente de Arco secundário (A_{rms})	Tempo Morto de Religamento (s)
Sim	$I < 20,0$	TM = 0,5
Sim	$40,0 < I < 60,0$	$1,0 < TM < 1,5$
Sim	$60,0 < I < 80,0$	TM = 1,5
Não	$I > 80,0$	-----

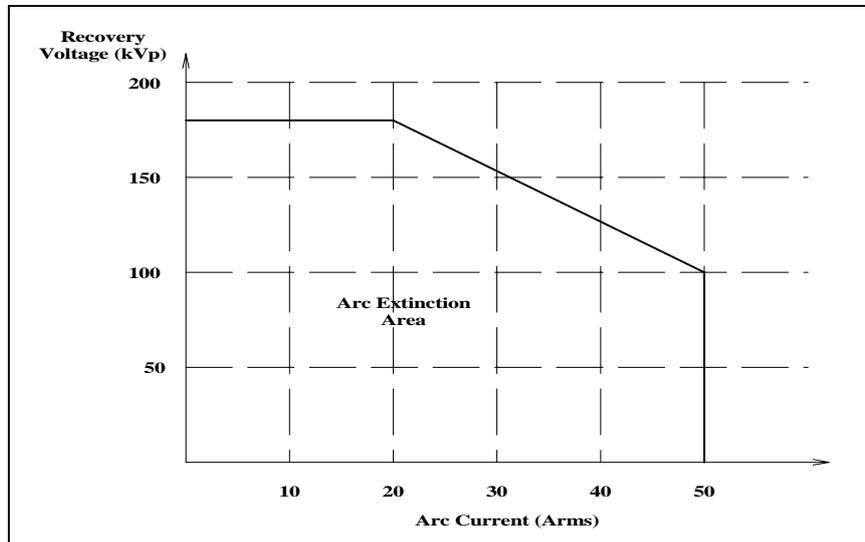


FIGURA 1 - Característica corrente de arco secundário x tensão de restabelecimento (TM = 0,5 s).

4.0 - CASOS ANALISADOS

4.1 – Primeiro Exemplo

Os estudos de sistema do projeto do segundo circuito de interligação Norte-Nordeste adotaram, inicialmente, o emprego da torre tipo “Raquete”, que é um projeto de torre compacta para tensão nominal de 500 kV com 4 condutores ACSR Rail (954 MCM) por fase, espaçados entre si 18”, numa disposição em delta, resultando um SIL de 1200 MW, padrão estrutural bastante empregado pela ELETRONORTE.

O padrão em 500 kV até então adotado pela CHESF era uma torre tipo “V” estaiada com 4 condutores ACSR Grosbeak (636 MCM) por fase, espaçados entre si 18”, disposição horizontal, que resulta num SIL de 1000 MW, não adequado para a interligação pretendida.

A alternativa encontrada, empregando a tecnologia LPNE, foi obtida com o apoio do CEPEL, mantendo praticamente o mesmo arranjo do padrão estrutural da CHESF apenas com reforço estrutural necessário para suportar a substituição dos 4 condutores Grosbeak por fase por 4 condutores Rail por fase, e expansão dos feixes das fases (LPNE/FEX) para garantir os mesmos parâmetros de seqüência positiva da LT que a torre tipo “Raquete”, como destacado na Tabela 2. As configurações geométricas das linhas são mostradas na Figura 2.

A adoção do padrão LPNE/FEX resultou para CHESF uma economia de cerca de 11% só em peso estrutural.

Em função do sucesso dessa solução, na concepção do terceiro circuito da interligação Norte-Nordeste está-se adotando o mesmo padrão estrutural do segundo circuito.

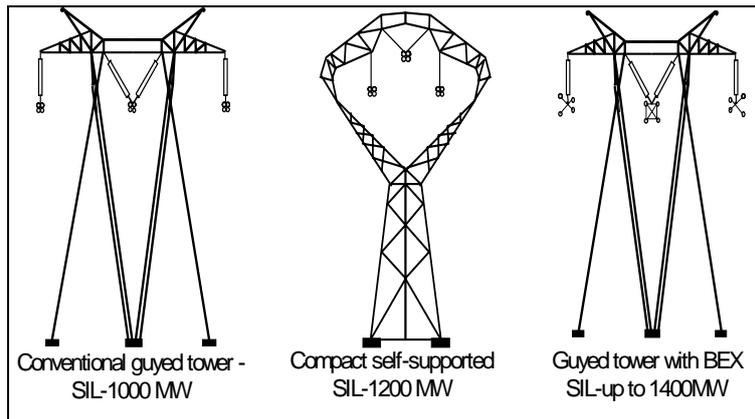


FIGURA 2 - Configurações geométricas da linhas do exemplo 1.

TABELA 2 – Parâmetros das linhas de transmissão do exemplo 1

Seqüência	LT	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Susceptância ($\mu\text{S}/\text{km}$)
Positiva	Convencional	0,0159	0,319	5,128
	FEX	0,0159	0,269	6,106
	Raquete	0,0159	0,267	6,108
Zero	Convencional	0,2800	1,191	2,741
	FEX	0,2814	1,140	3,018
	Raquete	0,3204	1,273	2,664

4.2 – Segundo Exemplo

Como alternativa ao projeto base do leilão promovido pela ANEEL da LT Salto Santiago – Ivaiporã, a ELETROSUL solicitou que o CEPEL tentasse obter um projeto mais econômico que o projeto básico indicado no edital.

O projeto básico indicava uma estrutura estaiada em “V” com as fases dispostas horizontalmente com 4 condutores Rail (954 MCM) por fase, espaçados entre si 18”.

A solução encontrada adotou uma configuração em delta tanto para estruturas autoportantes, exemplificada na Figura 3, como para estruturas estaiadas. Foram adotados os mesmos 4 condutores Rail por fase, com um espaçamento entre sub-condutores de 30 cm.

Os parâmetros de seqüência positiva são praticamente idênticos, como indicado na Tabela 3.

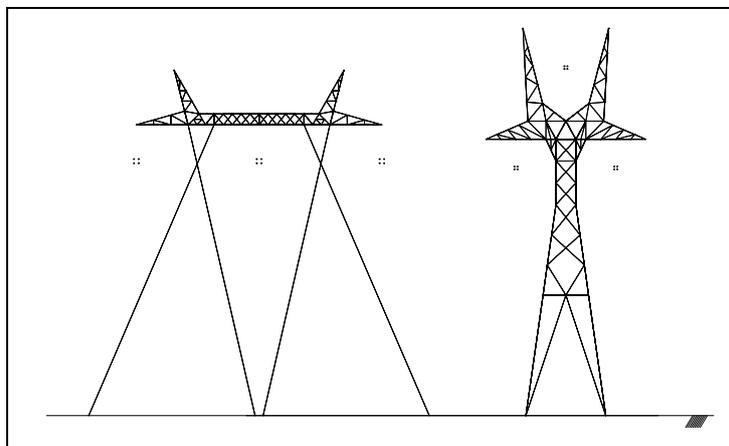


FIGURA 3 - Configurações geométricas da linhas do exemplo 2.

TABELA 3 – Parâmetros das linhas de transmissão do exemplo 2

Seqüência	LT	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Susceptância ($\mu\text{S}/\text{km}$)
Positiva	Original	0,0187	0,328	5,081
	LPNE	0,0188	0,328	4,979
Zero	Original	0,349	1,402	3,361
	LPNE	0,342	1,450	2,892

A adoção dos novos padrões estruturais resultaria numa economia de cerca de 9% só em peso estrutural, resultando ainda uma menor faixa de servidão.

Um dos fatores que resultou na não adoção da solução proposta foi o curto espaço de tempo disponível entre o leilão e a apresentação do projeto básico para a ANEEL.

4.3 – Descrição dos Exemplos Adaptados

Para fins de comparação procurou-se manter um determinado padrão, obviamente ligado ao objetivo do projeto.

No primeiro exemplo, adaptado de um estudo realizado para a CHESF, conforme já mencionado, utilizou-se uma Linha de Feixes Expandidos - FEX, comparada com uma linha compacta com torres tipo "Raquete". Estas duas linhas têm em comum a mesma potência característica de 1200MW e os mesmos parâmetros de seqüência positiva, que foram os requisitos básicos para o projeto. A diferença está nos parâmetros de seqüência zero onde a relação entre as susceptâncias capacitivas de seqüência determina um maior ou menor acoplamento elétrico, que irá influenciar diretamente na amplitude da corrente do arco secundário. Para completar esta primeira comparação, simulou-se, também, um linha convencional com configuração horizontal, mas com uma potência característica de 1000MW.

Cabe salientar que as três linhas possuem 4 condutores "Rail" por fase e um comprimento de 300km. Também, possuem 70% de compensação "shunt" e os reatores de neutro foram calculados de modo a compensar plenamente o acoplamento elétrico [2,3] e são mostrados na Tabela 4.

TABELA 4 – Reatores de neutro utilizados.

LT	Reator de Neutro [Ω]	X_0 / X_1
Convencional	1230.	2,98
FEX	1350.	3,60
Raquete	2155.	5,14

No segundo exemplo, adaptado de um estudo realizado para a ELETROSUL [4], o requisito básico do projeto foi obter uma LPNE com a mesma potência característica de uma linha com configuração convencional. Estas configurações são mostradas na Figura 3. As linhas têm 170km de extensão e não possuem compensação reativa.

4.4 – Características Básicas das Simulações

As simulações foram feitas empregando o programa ATP. Para a representação das linhas de transmissão adotou-se o modelo de parâmetros distribuídos e com transposição. As redes elétricas conectadas aos terminais das linhas foram representadas por equivalentes de seqüência positiva e seqüência zero.

Foi simulada a aplicação de um curto-circuito monofásico por 80ms, seguido da abertura da fase defeituosa em ambos os terminais. O arco secundário foi mantido durante 500ms e em seguida extinto. O valor eficaz da corrente de arco secundário foi adquirido antes de sua extinção para comparação com as grandezas mostradas no Item 3, bem como o valor do primeiro pico da tensão de restabelecimento.

5.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A Tabela 5 e as Figuras 4 a 6 mostram os resultados das simulações do exemplo 1. Foram consideradas três situações para cada linha:

- 1.a. Linhas sem compensação reativa;
 1.b. Linhas com compensação reativa, sem reator de neutro;
 1.c. Linhas com compensação reativa, com reator de neutro;

TABELA 5 - Valores de Corrente de arco secundário e de tensão de restabelecimento para as simulações do exemplo 1.

Caso	Convencional		Raquete		FEX	
	[A _{rms}]	[kV _{pico}]	[A _{rms}]	[kV _{pico}]	[A _{rms}]	[kV _{pico}]
1.a	90,9	194,8	124,1	231,6	101,7	188,3
1.b	67,1	76,6	98,1	95,9	89,9	86,6
1.c	11,9	16,1	15,8	18,4	13,8	15,7

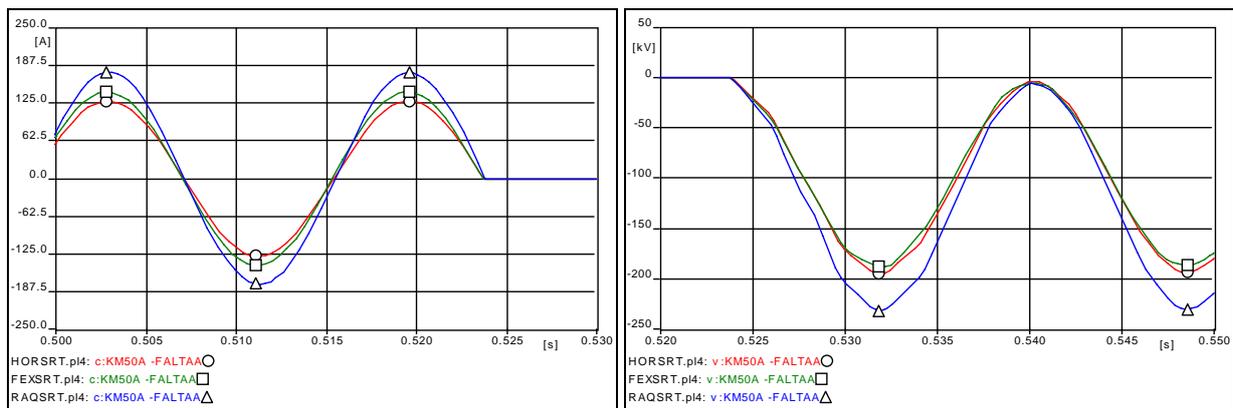


FIGURA 4 - Caso 1.a: Corrente de arco secundário e tensão de restabelecimento no ponto de falta.

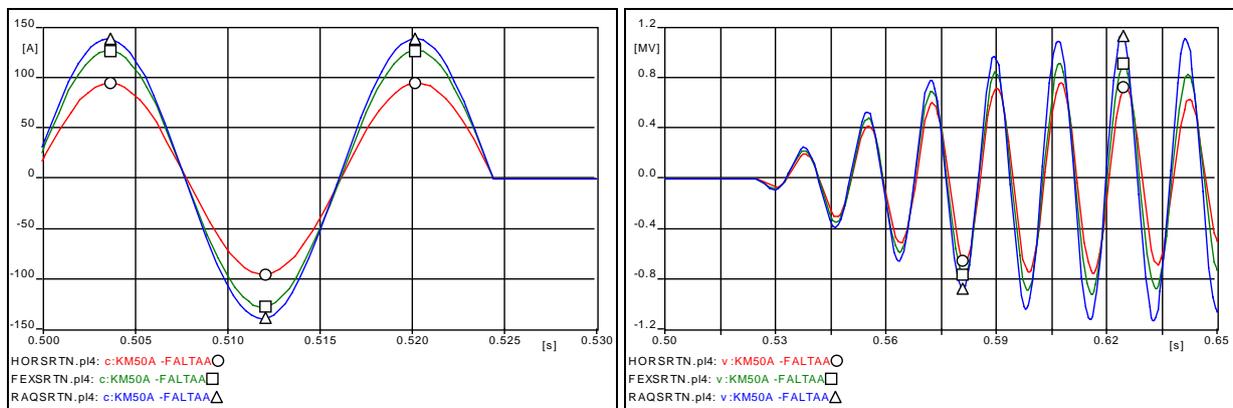


FIGURA 5 - Caso 1.b: Corrente de arco secundário e tensão de restabelecimento no ponto de falta.

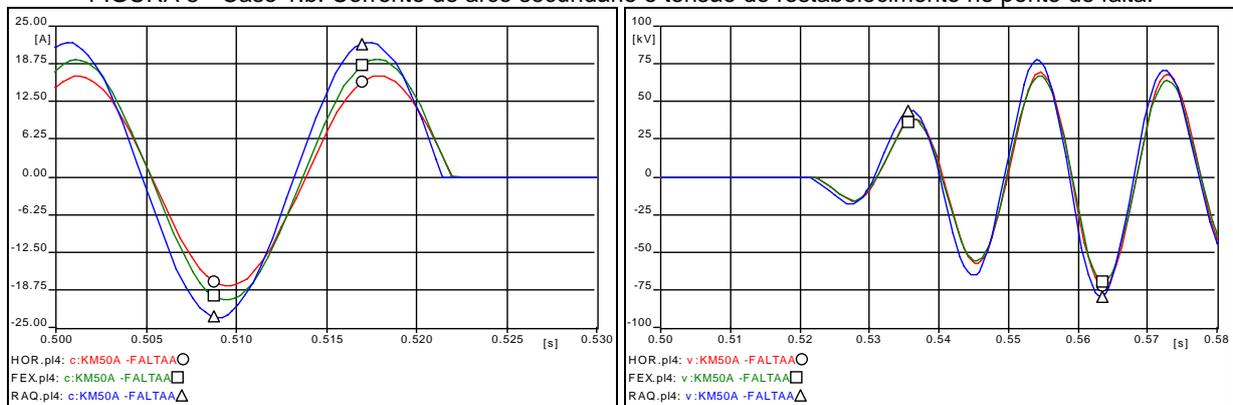


FIGURA 6 - Caso 1.c: Corrente de arco secundário e tensão de restabelecimento no ponto de falta.

Como pode ser observado, nas condições em que foram feitas estas simulações, o comportamento das grandezas elétricas para os três tipos de linhas de transmissão são semelhantes, sendo mais favorável para a linha convencional, e com pequena vantagem para a linha de feixes expandidos em relação à linha compacta. Nos casos com reatores de neutro ressalta-se que ambos os critérios para a extinção do arco secundário são satisfeitos.

A Tabela 5 e a Figura 7 mostram os resultados do segundo exemplo. Nesta tabela está apresentado o pior caso obtido nos estudos em função da localização da falta.

TABELA 5 - Valores de Corrente de arco secundário e de tensão de restabelecimento para as simulações do exemplo 2.

Convencional		LPNE	
[A _{rms}]	[kV _{pico}]	[A _{rms}]	[kV _{pico}]
33,8	125,9	38,6	151,1

Pode-se observar que, neste exemplo, a LPNE atenderia ao critério de extinção do arco secundário mostrado na Tabela 1, para um tempo morto próximo de 1,0 segundo. Neste caso, entretanto, a vantagem da LPNE sobre a convencional estaria na redução dos custos de construção da linha.

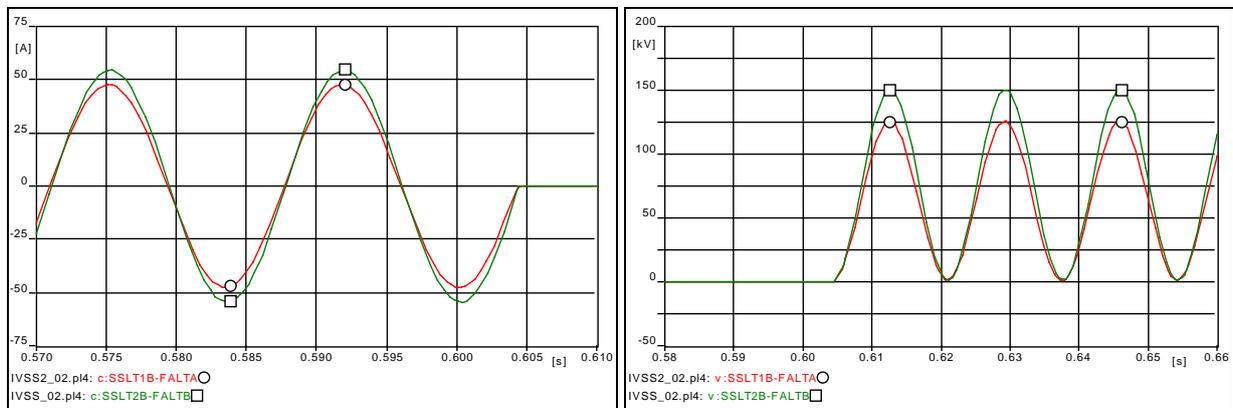


FIGURA 10 - Corrente de arco secundário e tensão de restabelecimento no ponto de falta.

6.0 - CONCLUSÕES

O fato de se utilizar as Linhas de Potência Natural Elevada não implica na inviabilidade do emprego de religamento monopolar.

Em geral, a questão associada à extinção do arco secundário, e conseqüentemente a adoção do procedimento de religamento monopolar é de mais fácil trato em projetos tradicionais de LTs do que em projetos de linhas de transmissão que empregam a tecnologia de linhas compactas e a tecnologia de LPNE. No entanto, não representa uma dificuldade que não possa ser vencida por quem domina as tecnologias envolvidas, como demonstrado nos exemplos apresentados. Além disso, não se pode esquecer da economia que esses projetos podem resultar em função do aumento da capacidade de transporte de energia.

Adicionalmente, a tecnologia LPNE oferece uma flexibilidade nos projetos de linhas de transmissão adequando-os às necessidades particulares de cada empreendimento. Como pode ser observado, no primeiro exemplo, a solução adotada foi a expansão dos feixes de cada fase, enquanto que no segundo, a solução adotada resultou na redução da distância entre sub-condutores de cada fase, sempre resultando, pelo menos, num projeto com economia de peso estrutural.

Um outro aspecto que não se pode perder de vista é que, em função dos prazos disponíveis entre os leilões e a apresentação dos projetos básicos, se for desejada a introdução de ganhos tecnológicos nos projetos de transmissão, ganhos esses que resultem em economia para a sociedade como um todo, as empresas de transmissão deverão realizar estudos elétricos de desempenho, desenvolver protótipos e ensaiar essas alternativas com antecedência. O CEPEL, na medida em que ao longo dos seus 30 anos de existência, tem se notabilizado pela participação cooperativa com seus sócios e outros agentes, como sempre, está disposto a participar deste grande desafio.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CHESF e à ELETROSUL por permitirem a utilização, nos exemplos mostrados neste informe técnico, de dados e resultados de estudos realizados pelo CEPEL para estas empresas.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) O. R. Régis Jr, S. Gusmão, A. Pessoa, F. C. Dart, M. J. A. Maia, P. C. V. Esmeraldo, "Considerações e Aplicações de LPNE", Simpósio sobre Interligações Elétricas, Rio de Janeiro, 1997.
- (2) E. W. Kimbark, "Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole-Switched EHV Lines by Shunt Reactors", IEEE Trans. on PAS, Vol. 83, Mar 1964.
- (3) E. W. Kimbark, "Seletive-Pole Switching of Long Double-Circuit EHV Line"; IEEE Trans. on PAS, Vol. 95, no. 1, Jan/Feb 1976.
- (4) Antônio R. C. D. Carvalho, Rogério M. Azevedo, Fabrício L. Lírio, "Análise da Viabilidade de Religamento Monopolar para Alternativas em LPNE de Linhas de Transmissão em 525kV no Sistema Sul", Relatório Técnico CEPEL DP - 37222/2003