



**GRUPO VII
GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL**

**PROJETOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NÃO CONVENCIONAIS - UMA ALTERNATIVA A SER
CONSIDERADA NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**

**Fernando C. Dart(*)
Luís A. de M. C. Domingues
Antônio Ricardo Carvalho
João Ignácio da S. Filho
Rogério M. de Azevedo
CEPEL**

Oswaldo Regis Junior

Paulo C. Vaz Esmeraldo

CHESF

FURNAS

RESUMO

O Informe técnico (IT) apresenta a evolução do sistema de transmissão de energia elétrica no Brasil, descreve alguns avanços tecnológicos dessa área nas últimas décadas destacando a tecnologia de transmissão propriamente dita. Também é abordado o expediente adotado pela agência reguladora dos serviços de eletricidade – ANEEL para licitação de novos empreendimentos.

O IT apresenta ainda, na visão dos autores, os entraves impostos pelo atual modelo do setor elétrico brasileiro, que na realidade dificultam a implantação de novos projetos de linhas de transmissão mais eficientes, bem como a recapacitação de circuitos existentes, o que pode contribuir para eliminação de sobrecargas do sistema de transmissão sem com isso comprometer a eficiência e a segurança do sistema elétrico, com uma redução de custos substancial, contribuindo assim para a modicidade tarifária.

São sugeridos ainda, procedimentos para que o planejamento da expansão do sistema de transmissão possa ser conjuntamente desenvolvido pelas equipes de planejamento e pelas equipes de desenvolvimento de projetos de linhas de transmissão, na direção preconizada.

PALAVRAS-CHAVE

Planejamento sistema elétrico, linhas de transmissão, linhas de transmissão compactas, LPNE, feixe expandido, feixe encolhido, recapacitação de linhas de transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil a concessão para a implantação de linhas de transmissão de energia elétrica se dá através de leilão realizado pelo órgão regulador do setor de energia elétrica, a ANEEL.

A seleção e definição das linhas de transmissão a serem leiloadas é feita com base no Plano Determinativo da Expansão da Transmissão (PDET). Este Plano é o resultado de estudos realizados pelo Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos – CCPE, através do Plano Decenal Indicativo da Transmissão, e os resultados de estudos conduzidos pelo ONS em seu Plano de Ampliações e Reforços (PAR). A consolidação entre os dois planos, PDET e PAR, resulta no conjunto de empreendimentos a serem licitados pela ANEEL.

A legislação prevê que futuramente essas atividades de planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro sejam desenvolvidas pela Empresa de Pesquisas Energéticas – EPE, empresa constituída pelo Ministério das Minas e Energia para essa finalidade.

Até o presente, todas as linhas de transmissão indicadas pelos estudos de planejamento desenvolvidos pelo

CCPE são calcadas em projetos de linhas de transmissão tradicionais.

Como definido nos Editais de Leilão, o prazo entre a sua publicação e a apresentação do projeto básico de cada empreendimento pelo vencedor, tem sido exíguo, motivo pelo qual são reduzidas as chances das empresas que participam dos leilões apresentarem projetos inovadores, tanto em relação ao projeto das linhas de transmissão como na utilização de equipamentos FACTS, como comprovado nas ampliações da rede que vêm sendo implantadas no país.

Todos os projetos não convencionais de linhas de transmissão construídos no Brasil, ou foram implementados num período anterior ao da atual legislação de concessão, ou sob condições especiais após a vigência das atuais regras reguladoras do setor elétrico brasileiro.

A título de exemplo, a construção pela CHESF, do segundo circuito da interligação Norte-Nordeste, a linha de transmissão Presidente Dutra – Teresina – Sobral – Fortaleza em 500 kV, com 740 km de extensão, atende a primeira condição descrita, enquanto que a implantação por FURNAS, da linha de transmissão Cachoeira Paulista – Adrianópolis III, em 500 kV, corresponde ao segundo aspecto apresentado.

Projetos não convencionais de linhas de transmissão podem resultar numa economia substancial para as empresas empreendedoras, com reflexos evidentes na tarifa de energia elétrica. A título de exemplo pode-se citar o segundo circuito de interligação Norte – Nordeste, que por ter sido adotado um tipo de feixe de condutores não convencional, permitiu a adoção de uma estrutura mais leve que a prevista quando do planejamento do sistema elétrico. Tal solução resultou numa redução de custos de cerca de 11 % do empreendimento que, na época, correspondeu a uma economia de US\$ 30.000.000,00 para a CHESF.

Em função das características do sistema elétrico brasileiro, em que a geração é predominantemente hidráulica e distante dos centros de carga, a busca pela redução dos custos envolvidos na transmissão de energia elétrica, sem penalização da confiabilidade, deve ser um objetivo permanente, uma vez que têm impacto significativo no custo final da energia. Uma das principais metas de novos projetos de linhas de transmissão, entre eles aqueles ditos não convencionais, deve ser a busca por esta redução de custos e portanto, merecem ser considerados na fase de planejamento e seleção de alternativas.

As características dos projetos não convencionais de linhas de transmissão são específicas para cada empreendimento, e isso implica num tempo de maturação desde a sua concepção até a sua efetiva utilização.

O desenvolvimento de projetos não convencionais de linhas de transmissão, como são intimamente ligados às características locais do sistema elétrico, requer um relacionamento muito amigável entre as equipes de planejamento e de projeto. Além disso, um projeto inovador de linhas de transmissão tem mais possibilidade de ser implementado se todos os ensaios elétricos e mecânicos da solução proposta, bem como a implantação de vãos de teste, linhas piloto, técnicas de manutenção de linha viva, entre outros, forem devidamente realizados.

As empresas do Grupo ELETROBRÁS dispõem de experiência, suporte tecnológico e infra-estrutura capaz de desenvolver novas concepções de projetos de linhas de transmissão que resultem numa economia real para os empreendimentos, sem que haja qualquer comprometimento com o nível de segurança do mesmo.

O IT propõe discutir procedimentos a serem considerados no desenvolvimento de projetos inovadores de transmissão de energia elétrica, de tal forma que nos futuros leilões possam efetivamente ser considerados como alternativa nos editais da ANEEL, uma vez que a experiência tem demonstrado que projetos não convencionais de linhas de transmissão bem como o emprego de equipamentos com a tecnologia FACTS podem resultar, de fato, em uma economia substancial para os empreendedores, e para a sociedade como um todo, contribuindo para a modicidade tarifária.

2.0 - PROJETOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 Projetos tradicionais

Os primeiros circuitos em 500 kV construídos no Brasil interligavam as usinas de FURNAS no rio Grande, entre os estados de Minas Gerais e de São Paulo, aos centros de carga no Rio de Janeiro e São Paulo, em meados da década de 70. O padrão estrutural adotado por FURNAS era uma estrutura auto-portante, conhecida como torre “cara de gato”, com 3 condutores ACSR Rail (954 MCM) por fase, espaçados entre si em 18”, distância entre fases da ordem de 12 m e SIL (Surge Impedance Loading) de projeto de 900 MW.

Os padrões de 500 kV da CHESF e ELETROSUL dessa ocasião eram semelhantes, e ambas adotaram predominantemente estrutura estaiada em “V” com 4 condutores ACSR Grosbeak (636 MCM) por fase, espaçados entre si em 18”, distância entre fases da ordem de 12 m e SIL de 1000 MW.

As malhas de 500 kV de FURNAS, CHESF e ELETROSUL eram complementadas pela malha de 500 kV da CEMIG e pela malha de 440 kV da CESP, além das malhas de 345 kV e FURNAS e de 230 kV das demais

concessionárias, todas as configurações com mais de um condutor por fase adotavam o espaçamento entre sub-condutores de 18”.

O sistema de transmissão de Itaipú, em corrente alternada, 750 kV, foi concebido com 4 condutores ACSR Bluejay (1.113 MCM) por fase, com espaçamento entre fases de aproximadamente 16 m, mais uma vez com espaçamento entre sub-condutores de 18” e SIL da ordem de 2.000 MW.

As técnicas disponíveis nessa época para aumentar a capacidade de transmissão consistia no aumento da ampacidade, com um conseqüente aumento do limite térmico dos condutores, que resultava no aumento da seção reta dos condutores implicando, dessa forma, num aumento de custo do empreendimento.

2.2 Linhas de transmissão compacta

No início da década de 90 a ELETRONORTE desenvolveu um projeto de linha compacta, empregando predominantemente torres autoportantes conhecidas como torres “raquete”, com 4 condutores ACSR Rail (954 MCM) por fase com 18” de espaçamento entre sub-condutores e distância entre fases de aproximadamente 6 m. O SIL dessa linha de transmissão é de 1200 MW, o arranjo da estrutura é apresentado na Figura 1.



Figura 1 – torre “raquete” – padrão de 500 kV da ELETRONORTE, ensaio no CEPEL

O aumento do SIL da torre compacta é obtido pelo aumento do acoplamento mútuo entre as fases devido a sua maior proximidade, se comparado aos projetos de linhas de transmissão tradicionais.

Com a aproximação das fases, ocorre aumento da impedância mútua (Z_m), e conseqüentemente ocorre a diminuição da impedância de seqüência positiva (Z_1), como indicado nas equações 1 e 2.

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

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

onde:

SIL - Surge Impedance Loading (MW)

V - tensão de operação da LT (kV)

Z_1 - impedância de seqüência positiva (Ω)

Z_p - impedância própria (Ω)

Z_m - impedância mútua (Ω)

Esse padrão de linha de transmissão foi utilizado desde os primeiros projetos em 500 kV da ELETRONORTE e no primeiro circuito de interligação Norte-Sul, com a adoção de equipamento FACTS – TCSC, com o objetivo de prover amortecimento para oscilações de baixíssima frequência entre áreas.

Este padrão também foi sugerido para o segundo circuito de interligação Norte-Nordeste, para o segundo circuito de interligação Norte-Sul e para a linha de transmissão Sudeste-Nordeste.

2.3 Linha de potência natural levada – LPNE

Uma das tecnologias estudadas durante os trabalhos desenvolvidos na CPTA – Comissão para o Planejamento da Transmissão da Amazônia, patrocinados pela ELETROBRÁS, foi a tecnologia de Linha de Potência Natural Elevada – LPNE, originalmente desenvolvida na Universidade de São Petesburgo na Rússia (1).

O acordo estabelecido entre pesquisadores da Universidade de São Petesburgo e a ELETROBRÁS previa a participação do CEPEL, CHESF e FURNAS nas atividades de absorção do conceito, desenvolvimento de modelos de cálculo para otimização de linhas de transmissão, campos eletromagnéticos, corona, radiointerferência, ruído acústico, etc.

Como consequência foram desenvolvidos estudos do sistema elétrico visando a implantação de linhas de transmissão com essa tecnologia, ensaios elétricos e mecânicos para avaliação das ferragens, construção de linhas piloto para avaliação dos projetos e finalmente a implantação de linhas de transmissão comerciais (2, 3, 4, 5, 6).

O conceito básico da tecnologia LPNE é maximizar o campo elétrico superficial em cada um dos sub-condutores das fases da linha de transmissão. Em geral, os arranjos otimizados apresentam os sub-condutores das fases expandidos e uma aproximação das fases. Um exemplo de aplicação dessa tecnologia para tensão de 230 kV, desenvolvido no CEPEL e implementada na CHESF, é apresentado na Figura 2 que apresenta um detalhe da linha piloto construída em Aldeia, nas proximidades de Recife.



Figura 2 – LPNE piloto em 230 kV - CHESF

O aumento do SIL ocorre pela diminuição da Z_p e aumento da Z_m e apresenta ganhos substanciais se comparado às linhas de transmissão tradicionais e mesmo às linhas compactas, como indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – SIL de linhas de transmissão para tecnologia tradicional e tecnologia LPNE

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

Além do aumento do SIL, a LPNE tem potencial para melhoria do perfil de tensão pelo aumento do "charging" da linha de transmissão, em situações de grandes carregamentos, e em função da redução da reatância série tem impacto positivo na estabilidade transitória.

Questões como religamento monopolar devem ser analisados caso a caso, tanto para linhas de transmissão convencionais, linhas compactas e LPNEs.

Pelas características da tecnologia LPNE, a mesma pode ser aplicada para transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias, como nos desafios de transmissão que se apresentam nos empreendimentos a serem construídos na região amazônica nas próximas décadas.

2.4 Feixe expandido - LPNE/FEX

Os estudos de planejamento do segundo circuito de interligação Norte – Nordeste sugeriam a adoção das características básicas da torre raquete, padrão da ELETRONORTE de linha de transmissão compacta para 500 kV.

A CHESF, com apoio do CEPEL, desenvolveu um feixe expandido assimétrico com fases dispostas numa configuração horizontal, diferentemente das tradicionais feixes de 18" utilizados em praticamente todos os projetos de linhas de transmissão de alta tensão no Brasil, empregando 4 condutores RAIL por fase. A otimização dos feixes expandidos assimétricos garantiu os mesmos parâmetros de seqüência positiva que os da torre raquete e conseqüentemente o mesmo SIL de 1200 MW. Em função da topografia da região o padrão estrutural adotado foi predominantemente "V" estaiado, reforçado para suportar os 4 condutores RAIL por fase ao invés dos 4 condutores GROSBEAK por fase, adotados usualmente nos projetos em 500 kV da CHESF.

A concepção das ferragens, a realização dos ensaios elétricos e mecânicos realizados em protótipos desenvolvidos na CHESF ou em produtos comerciais, foram realizados nos laboratórios do CEPEL. A construção de linhas piloto para avaliação do desempenho mecânico das ferragens, e o desenvolvimento de técnicas de manutenção da nova configuração foram desenvolvidos em paralelo aos estudos de sistemas, em particular os estudos de transitórios eletromagnéticos que também foram desenvolvidos no CEPEL por solicitação da CHESF.

Após as etapas de estudos, simulações e ensaios a CHESF decidiu adotar a LPNE/FEX – Linha de Potência Natural Elevada com Feixe Expandido, para a linha de 740 km para a linha Presidente Dutra – Teresina – Sobral – Fortaleza. A CHESF economizou com a adoção desse projeto, considerando apenas o peso estrutural, cerca de US\$ 30 milhões, Figura 3.



Figura 3 - Torre típica da LT500 kV Presidente Dutra – Teresina – Sobral – Fortaleza da CHESF

A CHESF também adotou um padrão de feixe assimétrico e expandido para a transformação de 2 circuitos duplos horizontais em 230 kV, para 1 circuito horizontal em 500 kV da linha de transmissão entre Paulo Afonso e Fortaleza. Enquanto a LT operava em 230 kV com 2 condutores por fase, empregando os conceitos da tecnologia LPNE, os condutores de cada fase foram expandidos, e como consequência, a capacidade de transmissão de cada circuito aumentou em 25 % com um investimento de aproximadamente 1 % de um empreendimento novo e uma economia de US\$ 10 milhões em postergação de obras.

A CHESF, ainda com apoio do CEPEL, desenvolveu técnicas de recapacitação de linhas de transmissão em 230 kV que, em função do padrão estrutural, aumenta a capacidade de transmissão em até 40 % e em até 70 %, como ilustrado nas Figuras 4 e 5, sem que haja necessidade de qualquer reforço estrutural. Esses projetos foram implementados no mesmo corredor entre Paulo Afonso e Fortaleza.

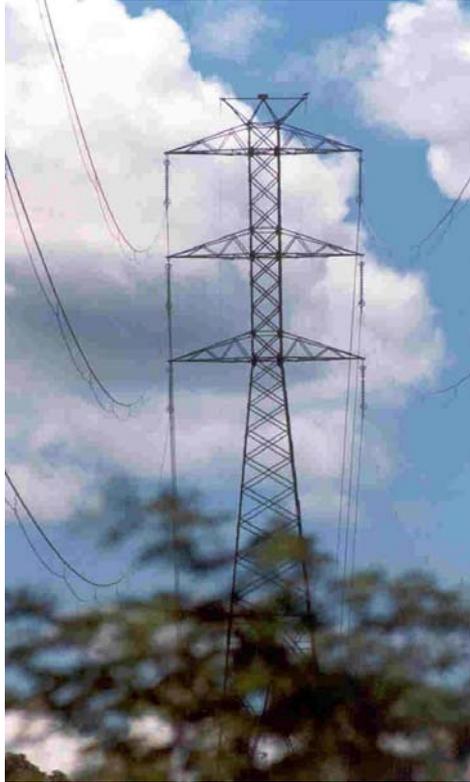


Figura 4 - Recapacitação da LT 230 kV do corredor Paulo Afonso Fortaleza, aumento da capacidade de transmissão em até 40 %

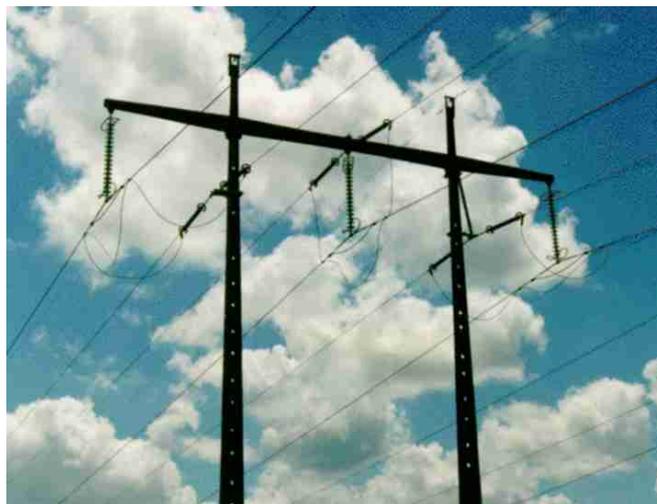


Figura 5 - Recapacitação da LT 230 kV do corredor Paulo Afonso Fortaleza, aumento da capacidade de transmissão em até 70 %

No terceiro circuito entre Cachoeira Paulista e Adrianópolis, FURNAS adotou uma configuração de feixe expandido simétrico com 4 condutores Rail por fase. O SIL da LT passou dos 900 MW, do padrão original de FURNAS para 500 kV, para 1200 MW, como mostra a Figura 6.

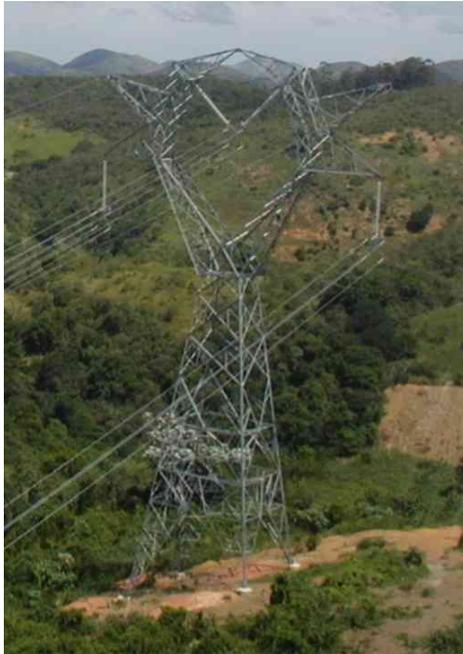


Figura 6 - Torre típica da LT **500** kV Cachoeira Paulista - Adrianópolis III de FURNAS

Há possibilidade de FURNAS recapacitar os circuitos I e II existentes entre Cachoeira Paulista e Adrianópolis, acrescentando mais um condutor Rail por fase e adotando-se um feixe expandido regular com dimensões apropriadas, aumentando o SIL desses circuitos em aproximadamente 30 %, passando para 1200 MW. O reforço estrutural necessário para suportar a inclusão de mais um condutor Rail é inferior a 10 %. A adoção desse procedimento resultaria num aumento da capacidade de transmissão para a área Rio com um investimento bastante atrativo. No segundo circuito de interligação Norte – Sul e na interligação Sudeste – Nordeste também foi empregado um feixe expandido regular e um padrão estrutural predominante em “V” estaiado com um SIL de 1200 MW. O CEPEL, por solicitação da ELETROSUL, desenvolveu configurações com feixes não convencionais e estruturas auto-portantes e estaiadas para o leilão das linhas de transmissão em 500 kV Londrina - Assis - Araraquara, Salto Santiago - Ivaiporã, Ivaiporã - Cascavel Oeste e machadinho - Campos Novos. Os feixes para essas linhas de transmissão apresentavam dimensões inferiores a 18”. O estudo, para os quatro empreendimentos, apresentou uma economia média teórica, de aproximadamente 8 %, conforme ilustrado na Figura 7.

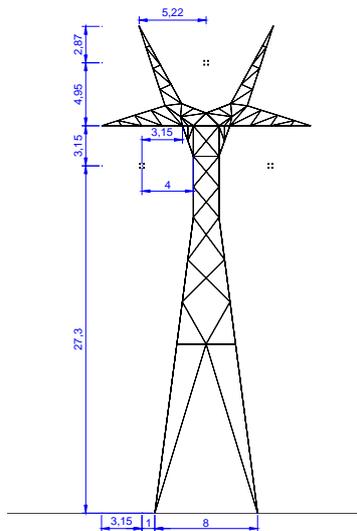


Figura 7 - Torre autoportante proposta para a LT 500 kV Londrina - Assis - Araraquara

3.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho tem por objetivo apresentar alternativas para o planejamento do sistema elétrico brasileiro que contemplem, pelo menos, a avaliação de alternativas que possam contribuir para a implantação de empreendimentos de transmissão mais econômicos que os tradicionais sem, no entanto, comprometer a confiabilidade do sistema elétrico.

Qualquer inovação tecnológica que se pretenda introduzir em qualquer empreendimento, inclusive os de transmissão, só poderão ser realmente considerados se forem devidamente projetados, testados e ensaiados para, finalmente, serem implementados para operação comercial. A concepção de novas configurações de linhas de transmissão requer um tempo de maturação para atender a esses requisitos.

O emprego da tecnologia LPNE e a utilização de equipamentos FACTS podem contribuir de fato para a implantação de projetos mais econômicos e mais confiáveis para o sistema elétrico.

No modelo atual do setor elétrico brasileiro, a implementação de novas tecnologias só terá chance de se tornar uma realidade se as mesmas forem estudadas desde o início de concepção do empreendimento, ou seja, na fase de planejamento da expansão do sistema elétrico.

A questão da recapacitação de linhas de transmissão existentes, que é uma alternativa confiável e de baixo custo a ser considerada nos pontos de estrangulamento do sistema de transmissão, esbarra na remuneração concedida pela ANEEL aos empreendedores, uma vez que a mesma é calculada pelo investimento e não pelo benefício gerado para o sistema.

De uma forma análoga, os projetos de transmissão cuja otimização persiga a diminuição de perdas elétricas não são remunerados por essa característica, na realidade o papel da rede de transmissão, no atual modelo, é meramente de interligação entre as fontes geradoras e os centros de carga, sem considerar que esse equipamento, se bem projetado, pode trazer benefícios para o sistema elétrico como um todo.

As questões apresentadas elencam temas que devem ser discutidos entre os diversos agentes envolvidos no setor de energia elétrica no Brasil, com o objetivo de aperfeiçoar o modelo vigente

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ALEXANDROV, G. N., NOSOV, I. M.- "The Increase of Effectiveness of Transmission Lines and Their Corridor Utilization"; CIGRE Paper 38-104, Paris, 1996
- (2) 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
- (3) 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, Belém, PA, 1997
- (4) 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
- (5) 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 – CIGRÉ, Paris, FR, 1998
- (6) DART, F. C., DOMINGUES, L. A. M. C., BARBOSA, C. R. N., RÉGIS JÚNIOR, O, PESSOA NETO, A CAVALCANTI, S. J. G. - "Validação de uma nova tecnologia para transmissão em 500 kV" - XV SNPTEE, Grupo III - Linhas de Transmissão, Foz do Iguaçu, PR, 1999