



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

GLT/ 07

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

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

**Novos Métodos Para Aumento de Potência de LT até 230kV:
Estudos, Projeto e Implantação Comercial**

Antonio Pessoa Neto*
CHESF

Oswaldo Régis Jr
CHESF

José Sarmiento Sobr.
CHESF

Roberval Luna da Silva
CHESF

S .J. Gusmão Cavalcanti
Consultor

Fernando Chaves Dart
CEPEL

L. A. M. Cabral Domingues
CEPEL

RESUMO

O informe técnico faz um estudo de custo x benefício para um caso real de obra visando repotencializar linhas de transmissão em 230 kV, sendo duas delas em C.S., em paralelo, com 250 km de extensão cada; estando a primeira em operação desde 1974 e a segunda foi energizada 4 anos depois. Foram originalmente construídas com estruturas metálicas e concreto, sob uma configuração horizontal de um condutor Grosbeak por fase. A outra em C.D. com 400 km de extensão em operação desde 1976, construído com estruturas metálicas autoportantes

O artigo analisa a viabilidade técnica econômica de novas formas de recapacitação, considerando os prazos, custos e benefícios envolvidos na execução da alternativa escolhida, em relação à construção de uma nova LT.

PALAVRAS-CHAVE

LPNE, Potência Natural, Recapacitação de Linhas, DUFEX e Superfestão.

1.0 – INTRODUÇÃO

O necessário atendimento da demanda recomenda o investimento proporcional ao aumento da capacidade e com o menor período de retorno possíveis, o que pode ser conseguido com uma recapacitação gradual que auxilie o transporte de maior potência simultaneamente com a energização periódica de cada trecho concluído. Entretanto a recapacitação em LT que opere na situação limite da demanda, por falta de antecipação dos

investimentos, requer maiores cuidados na confiabilização da segurança operacional requerida.

A medida que o ferramental e as concepções da nova tecnologia LPNE/FEX foram se tornando disponíveis nos últimos anos, as solicitações do sistema CHESF foram sendo enfrentadas com novas aplicações tecnológicas e os sucessos obtidos encorajaram inovações mais ousadas: redução "on line" da reatância (FEX) e aumento da seção condutora (DUFEX); configuram as mais promissoras alternativas hoje em implementação na CHESF.

2. 0 - ESTUDOS

A otimização da recapacitação deve, na primeira etapa, avaliar os parâmetros ideais da LT dentro do sistema no horizonte planejado, e em segunda etapa no levantamento das condições atuais intrínsecas ou extrínsecas para só então cotejar as alternativas aplicáveis.. A limitação frequente em LT curtas consiste na temperatura máxima em condições de demanda limite, seja para a vida do cabo seja para as distâncias de segurança, comprometidas pela dilatação térmica. No caso das LT longas onde se deseja o melhoramento da reatância e da capacitância das fases, a solução tecnicamente adequada pode ser a adição de um novo cabo que atenda os limites de corona, da distribuição de corrente e estruturais disponíveis.

2.1. Soluções tradicionais

Basicamente, para melhorar as distâncias de segurança sem ônus estrutural praticam-se o retensionamento (retirando o "creep" mas alterando o grampeamento), a transformação da cadeia de suspensão em semi-

ancoragem (ganhando altura da suspensão mas onerando o isolamento e a suportabilidade mecânica ao rompimento de fase), ou, dentro da disponibilidade dos suportes, recondutoramento com menor densidade de corrente. Ainda neste enfoque inovações levaram a alterações estruturais como a substituição das mísulas por isoladores “line-post” ou, no caso de H em poste, o içamento da cruzeta realizado na CHESF.

2.2 - Feixe expandido

A técnica de Feixe Expandido é uma simplificação da técnica LPNE que otimiza bitola, número e posição de subcondutores no feixe a partir de uma linha em feixe tradicional (com mais de um cabo) a aproximadamente meio metro uns dos outros. Adequa-se a geometria do feixe com ferragens concebidas de modo a diminuir a reatância com reflexos na capacitância e melhorando a impedância sem aumento da seção condutora. Essa técnica é altamente favorável às linhas longas.

2.3 – DUFEX / Superfestão

Aliando a técnica de recondutoramento com a do feixe expandido, a família de soluções ora apresentada consiste em facultar maior seção de alumínio pela adição de um cabo complementar, devidamente otimizado na geometria elétrica mais favorável a redução da reatância. Considerando a pouca disponibilidade mecânica dos suportes, este acréscimo é geralmente em bitolas bem menores, exceto casos de reforços ou antigas folgas exagerados.

A complexidade desses feixes desuniformes são de difícil controle e as otimizações só foram possíveis graças aos programas de alto nível desenvolvidos pelo CEPEL para as LPNE e as pesquisas realizadas pelas áreas de estudo e projeto. Nos exemplos felizes adiante apontados começaram a estabelecer correlações que auxiliaram na otimização e situaram os aspectos críticos que mereceram validações experimentais.

Essa nova tecnologia abre um sem número de possibilidades de soluções, permitindo adequações a diferentes padrões estruturais com o emprego de materiais convencionais ou favorecendo novos, como por exemplo, o alumínio termo resistente nos superfestões em média tensão.

Como exemplo das possibilidades do FEX a figura 1 mostra cálculos típicos para uma linha de 138kV circuito duplo com o cabo original 556MCM e adição de um cabo auxiliar. São mostradas combinações de vários feixes e bitolas do cabo auxiliar. O SIL total para os dois circuitos sofre variações desde 102MW para o cabo original sozinho até 155MW para o cabo 4/0 com feixe de 1,2m. Comportamento similar ocorre nas outras tensões.

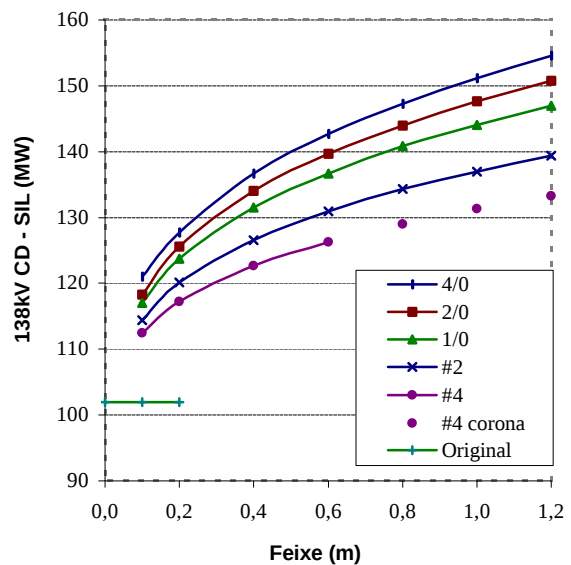


FIGURA 1 – SIL 2X138kV VERSUS FEIXE DOVE + NOVO CABO #4 – 4/0 AWG, ATÉ 1,2 METROS

Nestes casos é provável que o novo cabo, de bitola menor que a do cabo original, venha a conduzir uma parcela de corrente tal que cause uma densidade de corrente maior que a do cabo original.

A figura 2 mostra as perdas para LT 230 kV com cabo original 636 com corrente total fixada em 1000A, variou-se a corrente no cabo auxiliar desde 50% até o hipotético valor de 0%, e sua resistência (R_a) de 1 a 5 vezes a do cabo original (R_o). Note-se que todas curvas convergem para o mesmo ponto (corrente 0% no cabo auxiliar) pois esta seria a perda do cabo original sem existência de outro cabo.

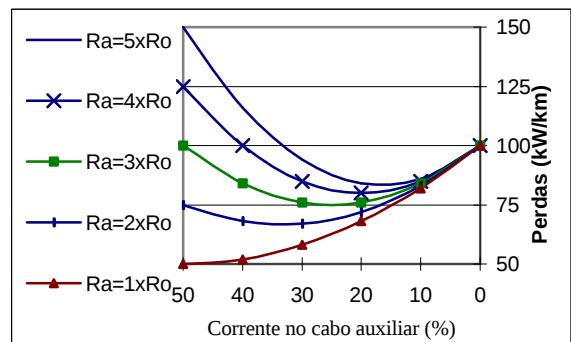


FIGURA 2 - CORRENTE TOTAL 1000A

Outro ponto a destacar é que até mesmo com o cabo auxiliar tendo $R_a=5 \times R_o$ existe uma faixa de rateio de corrente que leva a uma perda menor que a da linha original.

Uma outra análise consiste em considerar as perdas Joule na seleção do cabo auxiliar. Neste caso pode ser verificado que em função da resistência elétrica do novo condutor, do arranjo adotado e da consequente

repartição de correntes entre os cabos obtém-se diferentes valores de temperatura e perda nos condutores.

3.0 - PROJETO

Em se tratando de LT existentes que incorporam deficiências de projeto, construção e envelhecimento variados é extremamente necessário um levantamento minucioso das condições de todos os materiais para validar os coeficientes de segurança assumidos ou apontar as recuperações e reforços necessários. Nas LT em questão foram exigidos três levantamentos prévios: preliminar, para anteprojeto; detalhado, para projeto executivo; e final sob responsabilidade da empreiteira.

As soluções foram especialmente concebidas para essas LT e suas condições operacionais, desligamentos do C.S. em fins de semana, destinando um dia para cada circuito. Para o C.D. o desligamento será de um circuito, diariamente alternados.

Caso o estado das LT e as condições operacionais fossem diferentes, outras técnicas provavelmente seriam escolhidas.

4.0. – DIMENSIONAMENTO DO FEIXE

4.1.- DUFEX

O maior coeficiente de segurança e maior facilidade de reforço das estruturas de C.S., permitiram a adoção de um cabo de maior seção na configuração padrão H-ARB, figura 3, por outro lado a maior distância entre fases levou a otimização de um feixe de maior envergadura compatível com o limite de corona, no cabo de maior diâmetro suportável pela estrutura, exigindo alma de aço para um tracionamento independente por equivalência de flecha.

A resistência transversal das estruturas com dois postes predominantes de 10 kN com limite elástico 1,4 a 1,6; aliado a um coeficiente de utilização na plotação de aproximadamente 0,8 e a ocorrência de pressões de vento na região de 40% abaixo do valor para o qual as estruturas foram dimensionadas, permitiram um sobrecarga de área de vento no condutor de 60%.

O cálculo vão a vão permite apontar as poucas estruturas que necessitam reforço, aplicado por estai ao nível de ancoragem do novo cabo, convertendo-se a sobrecarga em nova compressão dos postes que suportam pressões muito maiores.

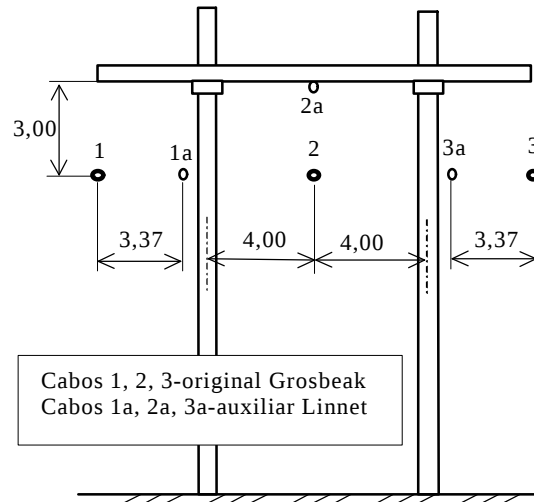


FIGURA 3 – ESQUEMA DUFEX EM CONCRETO

As dimensões do feixe, da ordem de 3,65 m para a fase externa utilizam a geometria cadeia - fase do poste, só exigindo correções (com tração), em trechos de atmosfera/suportabilidade de ruído crítico, prevenindo-se o deslocamento da cadeia original para braçadeira a 30 cm da ponta da cruzeta. Na fase central, com campo elétrico mais intenso, a distância entre o condutor original e o engate do lado terra oferece 2,9 m compatível com o limite de corona que nas condições críticas é favorecida pela própria retração do feixe da fase lateral.

Nas poucas torres de aço, onde algumas apresentaram distâncias maiores na fixação da fase lateral que nas estrutura H-ARB, a contração do feixe pode ser obtida transformando a cadeia "I" existente em cadeia "V" lateral com o emprego de uma cadeia de isoladores de 3,3m. Nas torres de aço de ancoragem (pequena quantidade), a fase central só permite um feixe de 1,0 m (altura da fase), o que não chega a afetar ponderavelmente a potência da LT, dispensando assim a contração da fase lateral. Nas estruturas de ancoragem em concreto com quatro postes, tendo os dois centrais mais altos, previu-se a ancoragem da fase central em trave de cantoneiras instaladas a 1,5 m acima da viga atual; em outras estruturas especiais, semi-ancoragem, transposição em cadeias e outras com cadeias de ancoragem desenvolveu-se um balancim duplicador com assimetria inversamente proporcional a tração em EDS dos dois cabos, cuja envergadura de 1,0 m, foi limitada pelo "clearance" do cabo existente inferior na fase central para os obstáculos, isto não reduz sensivelmente o ganho da LT em função da pouca incidência dessas estruturas.

4.1.1 - Estrutura metálica

A análise dos padrões estruturais existentes já foi concluída. As estruturas metálicas tipos A, B e C (padrão American Bridge) e A1, B1, B2 e C1 (padrão SBE) foram verificadas analiticamente, simulando a introdução do circuito adicional de condutores LINNET. As verificações foram feitas com base nos carregamentos atualizados, utilizando-se recursos computacionais e critérios atualizados de dimensionamento (Guide for design of steel transmission towers ASCE - segunda edição 1989). Constatou-se que as estruturas do padrão SBE possuem reserva de capacidade mecânica suficiente para suportar as cargas adicionais de recapitação, sem a necessidade de reforço. As estruturas do padrão American Bridge são mais frágeis e apresentam aspectos de cálculo e detalhamento hoje superados. Neste padrão, a verificação das tensões nos perfilados detectou membros sobrecarregados, que serão objeto de reforço, restabelecendo as condições de confiabilidade, segurança e estabilidade.

4.1.2 - Estrutura de concreto

Nas estruturas de concreto, a situação é mais crítica. Estas foram analisadas conforme normas e recomendações atuais. Originalmente, os postes foram dimensionados e fabricados pela antiga ABNT-EB-107, adotando critérios de segurança determinísticos de 2,40 (condição de ruptura) e 1,65 (condição máxima de trabalho). Foram admitidos apenas os esforços transversais decorrentes da ação do vento, com pressões diretas de 70 daN/m² (superfícies planas) e 40 daN/m² (superfícies cilíndricas). As fundações das estruturas de concreto possuem engastes estabelecidos pela regra de Thumb $E = 0,10 \cdot L + 0,60$, independentemente do tipo de terreno no local de implantação. Estão previstas três situações de reforço. Quando a nova carga de projeto é maior do que a carga nominal do poste, a solução prevista é introduzir estais, modificando o sistema estrutural existente. Se o novo momento de tombamento, aplicado o nível do terreno, é superior ao momento teórico resistente do engaste, para as condições locais de subsolo, a solução estabelecida foi reforçar as fundações. Neste caso, dois sistemas de reforço estão previstos: introdução de placas laterais premoldadas, para reduzir o valor das pressões, sobre as paredes das cavas de fundação; ou substituição do reaterro original por solo-cimento ou concreto ciclópico.

As fundações foram redimensionadas pelo método de M. Lazard. Durante a construção da obra, o empreiteiro determinará a densidade natural dos terrenos de fundação, enquadrando os resultados numa tabela apropriada, de modo a determinar a necessidade ou não de reforço.

4.2. Superfestação

Embora o coeficiente de segurança e os critérios de vento adotados na LT de C.D. vertical sejam semelhantes ao C.S. o projeto estrutural e a plotação mais otimizados não permitiram sobrecargas acima de 30% em peso e 45% em área. Os vãos maiores adotados nesse projeto, não permitiam cabos tão leves auto sustentados, e por outro lado a menor distância entre fases e circuitos exigiam feixes menores para o limite de corona desejado. A solução vislumbrada onera o tracionamento e a flecha do cabo existente em uma parcela aceitável, graças a utilização de um condutor CA cuja seção é um terço daquela existente, promovendo assim o aumento da transmissão sem aumento nas perdas e com pequena redução na temperatura na potência máxima transmitida.

A geometria foi otimizada, figura 4, utilizando-se um espaçador flexível adequado as baixas cargas mecânicas completado com conectores elétricos e mecânicos e associados a pequenas flechas, 30% do espaçamento médio equivalente, próximo do espaçamento máximo admitido pelo corona. Esse espaçamento foi padronizado em 45 cm, para facilitar a instalação pioneira embora pudesse ser otimizado para a variação do campo elétrico nas três fases e a longo do vão. As trações nesses subvãos permitem que o cabo CA fique pendente sob o cabo CAA existente, sem risco de sobretensões críticas durante a ocorrência de vento máximo.

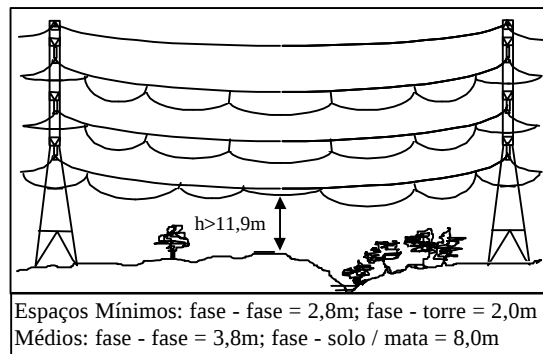


FIGURA 4 – ESQUEMA DE SUPERFESTAÇÃO

Um programa computacional está sendo desenvolvido para verificar vão a vão o “clearance” resultante, tendo em conta a alteração do “offset” das cadeias de suspensão existentes devido ao acréscimo de peso linear após um novo estágio de deformação sob vento máximo, “creep” etc. Esse programa também permitirá a eliminação do festão em trechos localizados do vão de modo a resolver os problemas mais simples de cabo baixo, considerando inclusive o aumento de temperatura no cabo existente sem o novo cabo em paralelo.

Casos mais graves de cabo baixo (travessias no limite etc) também podem ser resolvidos com a transformação da suspensão em semi-ancoragem. A grande preocupação em todos esses casos é com a fase inferior inclusive para balanço no limite da faixa. O aumento da altura na fase inferior (semi-ancoragem etc) pode ser absorvida pela distância fase-fase de 6 m dispensando-se tais medidas nas fases média e inferior. Nos vãos de entrada em SE onde é prática a derivação para equipamentos com pulos etc, a instalação do festão será dispensada, resultando em elevação de temperatura do condutor para aproximadamente 80 graus celsius perfeitamente tolerável, tanto pelo envelhecimento da liga quanto pela redução de altura em áreas restritas.

Verificações no dimensionamento das estruturas dispensaram reforços estruturais, o que torna a execução dessa solução extremamente simples, se restringindo a fixação do cabo 4/0 CA ao cabo Grosbeak existente.

5.0 – VÃOS EXPERIMENTAIS

5.1 – Área de teste em Recife

Desde a construção da primeira LT 2x230/500kV, a CHESF vem construindo em Aldeia (~20km da Séde) trechos experimentais que se mostraram essenciais para, em desenvolvimentos pioneiros, testar materiais e procedimentos, validar cálculos e expectativas elétricas e mecânicas e, principalmente, nivelar consensos com as equipes de construção e manutenção da família de linheiros, hoje núcleo da Equipe LPNE integrada.

Na primeira, os feixes duplos de 230kV auxiliaram na pesquisa de vibrações eólicas e “creep”, os quádruplos permitiram aperfeiçoar espaçadores-amortecedores, e, depois de 10 anos, configurou-se nas janelas adaptadas das torres a primeira LPNE sul-americana que validou, após medidas elétricas feitas pelo CEPEL, toda teoria e cálculos em que se basearam FEX, DUFEX etc.

5.2 – LT 230kV experimental DUFEX

Na mesma Faixa foram aproveitados 3 vãos de LT simples horizontal em estruturas de concreto padrão com um Grosbeak por fase, onde se lançou mais um cabo CAA 336MCM “Linnet”, em cada poste ou na cruzeta, com isoladores poliméricos ancorando em cada ponto com grampos passantes e fazendo “jumpers” contínuos conectados de cada lado das suspensões por paralelos. As cantoneiras de aço usadas como braçadeiras também seguram estais, usados em fins de linha provisórios, já que a torre de ancoragem seguinte ainda não tinha cálculo de barras para reforços eventuais e pontos de ataque.



FIGURA 5 – H-ARB DE DUFEX EXPERIMENTAL

Observou-se corona nos anéis dos isoladores e luva de reparo preformada (modelo de para-raios), mas após limpeza, eliminou-se no cabo o ruído audível inicial.

O CEPEL participou das medições que validaram os cálculos e confirmaram a expectativa de mais 66% no SIL. A Figura 6 mostra o campo elétrico calculado e dos pontos medidos antes e após o DUFEX, a 1m do solo em eixo transversal à faixa, centrado no circuito simples recapitado e estendendo-se além das LT 230kV duplo-verticais vizinhas (30m de cada lado).

Observa-se que a 1,05 p.u. o pico de 5,5kV/m e o valor de 0,5kV/m no limite da faixa (50m) são satisfatórios.

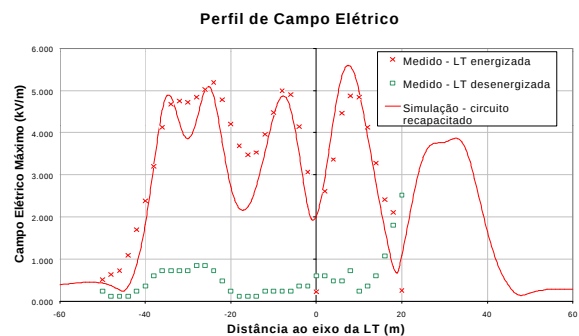


FIGURA 6 – CAMPO ELÉTRICO SOB O DUFEX.

Também foram lidos, no mesmo eixo, valores do campo magnético que confirmaram os calculados e convergem com os vetores eletrostáticos em níveis aceitáveis. A distribuição, na mesma simbologia acima, é mostrada na Figura 7.

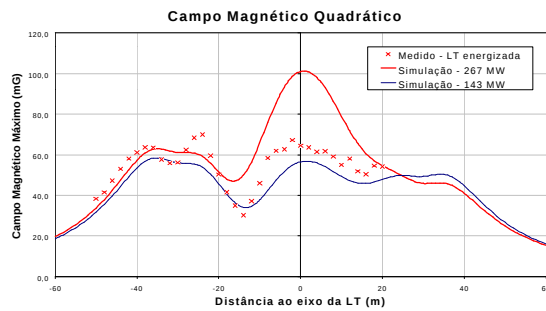


FIGURA 7 – CAMPO MAGNÉTICO SOB O FEX

5.3- Superfestão 230kV experimental

Na LT à direita do DUFEX, em circuito duplo vertical padrão, com um CAA Grosbeak por fase, foram instalados nas três fases de vão com 350m alças preformadas com 0,35m de abertura em sub-vãos de 40m a 70m, conforme o campo previsto para o limite de corona. Com tração de 2,4kN (15%UTS) as sub-flechas do cabo CA 4/0 AWG em liga termo-resistente (até 150°C) dão feixes de 0,4m a 0,5m médios, proporcionando ganho de SIL estimado em 38%. Também foi tentada técnica para lançamento em linha viva, inviabilizada pelo peso do montador na fase do meio, experimentados conectores paralelos tipo cunha e aparafusados, e medidas alterações nas alturas, no caso agravadas pela falta de acréscimo de peso nos vãos adjacentes que altera o prumo das cadeias de suspensão, inclinadas para dentro reduzindo o vão. A distribuição de correntes nos dois cabos foi medida ao potencial com amperímetro alicate comum, sem precisão suficiente mas delimitando o valor esperado de 44% em 25% a 35%, o que se atribuiu à pequena abertura do primeiro feixe e à circulação de corrente na alça próxima.

Foram testados outros vãos com estais nas cadeias, em 450m, 720m e 830m (parcial), com trações e sub-vãos maiores onde se confirmou pouca alteração de flecha.



FIGURA 8 – VISTA DO SUPERFESTÃO

6.0 - CUSTO

Considerando urgência, ineditismo e responsabilidade do serviço, a CHESF decidiu pela dispensa de licitação, no entanto não foi efetuado um trabalho de esclarecimento do projeto tanto na CHESF como junto as empreiteiras, decidindo-se por um tratamento convencional de tomada de preços o que gerou mau entendimento quanto as reais necessidades e possibilidades desse empreendimento. Decidiu-se por aceitar as propostas preço sem a correspondente proposta técnica. Os preços de mão de obra com o gravame de falta de segurança e exigências superlativas de prazos, resultaram em preços de mão de obra duas a três vezes acima do esperado, para o trecho de C.S., quando comparados com experiências anteriores e observações durante as instalações pilotos realizadas. Chegou-se a impasse de preços que pode inviabilizar todo o processo de implantação do C. S.

Os preços ofertados para o C.D. foram inferiores aos orçados pela CHESF, e não se espera maiores problemas na implantação dessa solução.

7.0 - CONCLUSÃO

A CHESF decidiu efetuar uma nova tomada de preço para o C.S., inclusive ampliando o número de participantes. Espera-se que estas medida venha reverter os quadros atuais de custo. Considerando que estamos agregando 60% da capacidade de transmissão a cada LT e que estas já atingiram metade de sua vida útil, a implantação do C. S. só se justifica, do ponto de vista econômico, se o custo do empreendimento não ultrapassar US\$ 30.000,00 por km.

8.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Recapacitação de Circuitos 230 kV com o Conceito de Feixe Expandido. Oswaldo Régis Jr, S. J. Gusmão Cavalcanti, Marcelo J. A. Maia, José Felipe A. G. Wavrik, Georgij Viktorovich Podporkin - XIII SNPTEE, GLT, Camboriú, 1995.
- [2] Linha de Potência Natura Elevada (LPNE): Adaptação do conceito para a recapacitação de linhas existentes. Oswaldo Régis Jr, S. Gusmão Cavalcanti, Antônio Pessoa Neto, Fernando Dart. VII ERLAC-CE 22, 1997, Argentina.
- [3] Aumento de Potência em LT 230 kV – Concepção, Soluções Técnicas e Resultados com Feixe Expandido. Sebastião Gusmão Cavalcanti, Oswaldo Régis Jr e Antonio Pessoa Neto. SUPRO 22/BRACIER(1996/97)