



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO -VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

CABOS TERMORRESISTENTES: UMA ALTERNATIVA PARA OTIMIZAÇÃO E MODERNIZAÇÃO DE BARRAMENTOS DE SUBESTAÇÕES

Fabio Nepomuceno Fraga (*) Benilton Alessandro do Nascimento Rosemary Leandro Seixas Veloso

Chesf – COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo para a utilização de cabos de alumínio termorresistente nos barramentos 230 kV das subestações da Chesf. Os cabos de liga de alumínio termorresistente (TAI) ampliam a temperatura máxima de operação em regime contínuo de trabalho para até 150°C, sem que haja deterioração das características mecânicas como tração, alongamento e dureza. Foram realizados estudos de fluxo de carga e curto-circuito nos barramentos para determinação do cabo de alumínio termorresistente equivalente aos atualmente utilizados pela Chesf. Estes estudos indicaram o cabo alumínio termorresistente T-Cosmos (T-CA 477 MCM) como o cabo equivalente a ser aplicado. O cabo T-Cosmos apresenta uma redução de peso de aproximadamente 50% em relação aos cabos usualmente utilizados pela Chesf. Esta característica possibilitou reduzir os esforços mecânicos nas estruturas dos pórticos dos barramentos a valores mais de 50% inferiores aos anteriormente aplicados. Isto possibilitou uma redução média do percentual de utilização dos elementos do pórtico. Consultas foram realizadas aos fabricantes e indicaram redução no preço dos conectores e no metro de cabo quando comparamos o cabo T-Cosmos aos cabos utilizados pela Chesf. Sendo assim, a aplicação destes cabos com liga de alumínio termorresistente (TAI) representa um ganho técnico e econômico nas instalações de 230 kV da Chesf.

PALAVRAS-CHAVE

Subestações, Barramentos, Cabos, Otimização, Modernização

1.0 - INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos têm ocorrido grandes mudanças no setor elétrico brasileiro, talvez as maiores ocorridas na sua história. Dentro deste quadro chama atenção a mudança no processo de expansão e ampliação/recapitação de suas instalações. Passou-se de uma situação onde as empresas eram estatais e responsáveis pelo investimento e planejamento coletivo do sistema para uma situação onde existe uma disputa de mercado envolvendo agentes estatais, privados e reguladores. Neste quadro as ampliações, recapitações e implantações de novas instalações (subestações, usinas, linhas de transmissão, etc) passaram a ser o foco com o objetivo de otimizações técnicas e econômicas.

Com o grande volume de novas instalações implantadas nos últimos anos a capacidade de transmissão de energia elétrica tem aumentado e como uma das conseqüências os barramentos de subestações antigas e de novas instalações tem tido a necessidade de apresentarem capacidades cada vez maiores de suportabilidade. Esta característica implica em acessórios, ferragens, suportes e fundações de dimensões maiores tornando assim os barramentos de novas instalações economicamente mais onerosos e por vezes inviabilizando a recapitação e/ou ampliação de instalações antigas. Como uma das soluções este trabalho propõe o emprego dos cabos de Alumínio

(*) Rua Delmiro Gouveia, Nº 333, Ed. André Falcão - DEPS - Bloco D - Sala 218 - Bongi - CEP: 50761-901 - Recife - PE - Brasil - Tel.: (+55 81) 3229-3042 - Fax: (+55 81)3229-3269 - Email: fabionf@chesf.gov.br

Termorresistente nos barramentos, acarretando uma diminuição substancial na bitola do cabo e no dimensional dos seus acessórios, ferragens, suportes e fundações. A redução de custo, considerando todo o projeto de uma nova subestação, ou recapacitação/ampliação de uma existente, pode ser considerável e atraente.

2.0 - CABOS TERMORRESISTENTES – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

O Alumínio tradicional utilizado em cabos de barramentos de subestações é o EC – Electric Conductor ou o 1350. Este material tem como limite de operação em regime contínuo a temperatura de 93°C, acima da qual, inicia-se o recozimento e há perdas das suas características mecânicas. O Alumínio Termorresistente, que é uma liga da série 8000, possibilita a operação contínua à até 150°C sem que haja o recozimento. Esta característica permite que a ampacidade de um cabo seja aumentada em até 50%, ou que a sua bitola seja reduzida, mantendo-se a ampacidade requerida. Com esta propriedade, os cabos de Alumínio Termorresistente têm sido cada vez mais empregados em recapacitações de linhas de transmissão e distribuição, nas novas linhas que requeiram um nível de confiabilidade maior e também em barramentos de subestações.

Considerando-se a mesma ampacidade, ou seja, capacidade máxima de transmissão de corrente elétrica, a bitola de um condutor ou barramento termorresistente pode ser reduzida em até 30% em seu diâmetro. A densidade desta liga de Alumínio é a mesma, sendo portanto bem mais leve para uma condição de mesma ampacidade. Todos os seus acessórios ficam também reduzidos, com peso menor. Toda esta somatória reflete-se, conseqüentemente nos suportes e fundações. A Tabela 1 a seguir apresenta as principais propriedades da liga de Al Termorresistente, comparando-as com as do tipo Al 1350 convencional.

Tabela 1 – Propriedades liga Tal x Al 1350

Propriedades	Unidade	TAI	Al 1350
Ponto de fusão	°C	660	660
Calor específico a 20°C	cal/g. °C	0,22	0,22
Peso específico	g/cm ³	2,7	2,7
Condutividade térmica	cal/cm.s°C	0,5	0,5
Coefficiente de expansão linear	1/°C	23x10 ⁻⁶	23x10 ⁻⁶
Condutividade elétrica a 20°C	% IACS	60,0	61,0
Resistividade elétrica a 20°C	ohm.mm ² /m	0,028736	0,028264
Coefficiente de variação da resistência elétrica	1/°C	0,0040	0,0040
Resistência à tração	Kgf/mm ²	16 a 20	16 a 20
Alongamento em 250 mm	%	1,5 a 2,3	1,5 a 2,3
Módulo de elasticidade	Kgf/mm ²	6300	6300
Temperatura de operação	°C	150	90
Temperatura a sobrecarga	°C	180	100
Temperatura curto-circuito (2s)	°C	260	180

3.0 - DETERMINAÇÃO DO CONDUTOR TERMORRESISTENTE EQUIVALENTE

Para determinação do condutor termorresistente equivalente foram realizados estudos de fluxo de carga e de curto-circuito em uma subestação de 230 kV típica da Chesf. O padrão de configuração das subestações de 230 kV da Chesf apresenta o arranjo barra dupla a quatro chaves utilizando os condutores Magnolia (CA 954 MCM) ou Rail (CAA 954 MCM) com dois cabos por fase nas barras principais e um cabo por fase nos barramentos transversais. Foi escolhida uma subestação futura com uma configuração final com quatro transformadores 230-69 kV de 100 MVA (300 MVA de potência final com transformador a mais para atender o critério n-1 de planejamento) e duas linhas de transmissão 230 kV. Foram estudadas diversas contingências internas a subestação e a Tabela 2 a seguir apresenta os eventos mais críticos e os valores máximos de corrente.

Nos eventos apresentados destacamos a perda de uma linha de transmissão simultaneamente com uma sobrecarga de 20 % na subestação (360 MVA) como a máxima corrente a ser atendida pelo cabo (902,94 A). Para a verificação da suportabilidade a curto-circuito consideramos uma corrente de 40 kA no horizonte final da subestação com um tempo de duração de 0,5 segundos. Com esses valores a seção transversal mínima necessária para o cabo é 240,7 mm². Sendo assim, o cabo de alumínio termorresistente T-Cosmos (T-CA 477

MCM) foi escolhido e a Tabela 3 a seguir apresenta suas características comparativamente aos demais cabos utilizados pela Chesf.

Tabela 2 – Correntes máximas

Eventos	Corrente Máxima
Sobrecarga 20%	451,84 A
Perda Linha de Transmissão	753,06 A
Perda Linha de Transmissão e Sobrecarga 20%	903,01 A
4x100MVA	502,00 A
4x100MVA e Sobrecarga 20%	602,45 A

O cabo T-Cosmos foi escolhido para possibilitar que, durante a operação normal da subestação, a temperatura nominal do cabo não atinja valores muito elevados. Esta característica faz com que, em caso de necessidade de manutenção da subestação ao potencial, a temperatura do cabo permita o manuseio do mesmo. Figura 1 a seguir apresenta as temperaturas de equilíbrio dos cabos para as diversas situações de carga. Podemos observar nesta figura que nas condições nominais (e mesmo com uma sobrecarga de 20 %) as temperaturas atingidas pelos cabos são admissíveis para realização de manutenções ao potencial.

Tabela 3 – Características dos cabos Rail, Magnólia e T-Cosmos

Cabo	Seção (mm²)	Bitola (MCM)	Ampacidade (Amperes)				Peso (kg/km)	Diâmetro (mm)	Resistência (ohms)				
									CC		CA		
Rail (CAA)	516,80	954	970				1600,2	29,59	0.0597	0,0733			
Magnólia (CA)	483,50	954	980				1333	28,55	0.0594	0,0746			
T-Cosmos (T-CA)	241,51	477	75°C	100°C	125°C	150°C	665,9	20,12	0,1206	75 °C	100 °C	125 °C	150 °C
			640	777	896	989				0,1487	0,1591	0,1716	0,1838

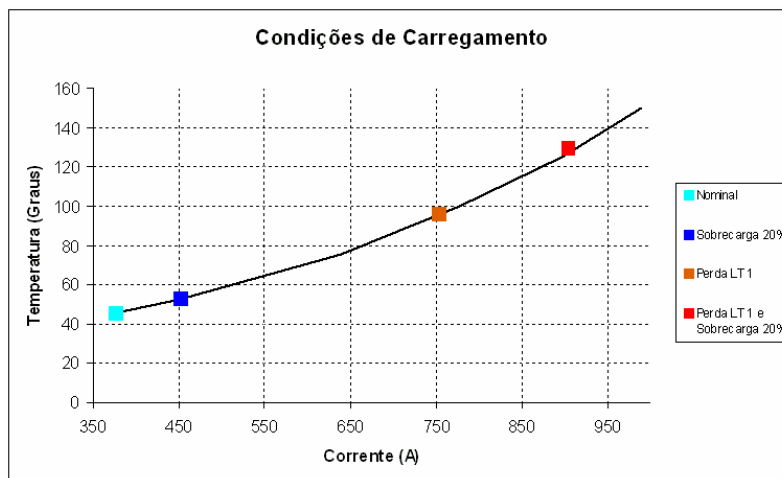


Figura 1 – Temperaturas de operação do cabo T-Cosmos

4.0 - DETERMINAÇÃO DOS NOVOS ESFORÇOS MECÂNICOS

Com as características elétricas e o cabo definido partimos para a realização de estudo dos esforços mecânicos que os barramentos com cabos T-Cosmos iriam impor as estruturas metálicas. Como o cabo apresenta uma redução de peso de aproximadamente de 50% em relação ao cabo Magnolia e de 58 % em relação ao cabo Rail, conforme mostrado na Tabela 3, os esforços máximos determinados considerando que, quando da operação na máxima temperatura a flecha máxima obtida seja de 3% do vão, apresentaram-se mais de 50% inferiores aos anteriormente aplicados.

Foram realizados estes estudos nos diversos vãos da subestação e a Figura 2 a seguir mostra o calculo realizado para um vão típico. A Figura 3 apresenta um trecho do diagrama de esforços nas estruturas da subestação. Estes esforços foram os elementos de entrada para a realização de um estudo do comportamento das estruturas

metálicas dos pórticos da subestação para determinarmos os percentuais de redução dos esforços nos mesmos. Estes esforços também são subsídios para estudos de redução de fundações destas estruturas.

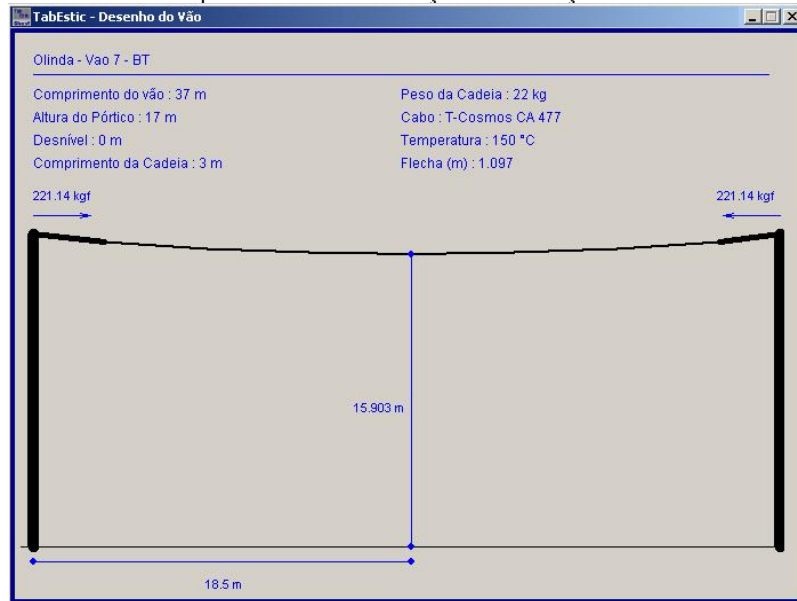


Figura 2 – Cálculo dos esforços mecânicos nos pórticos dos barramentos

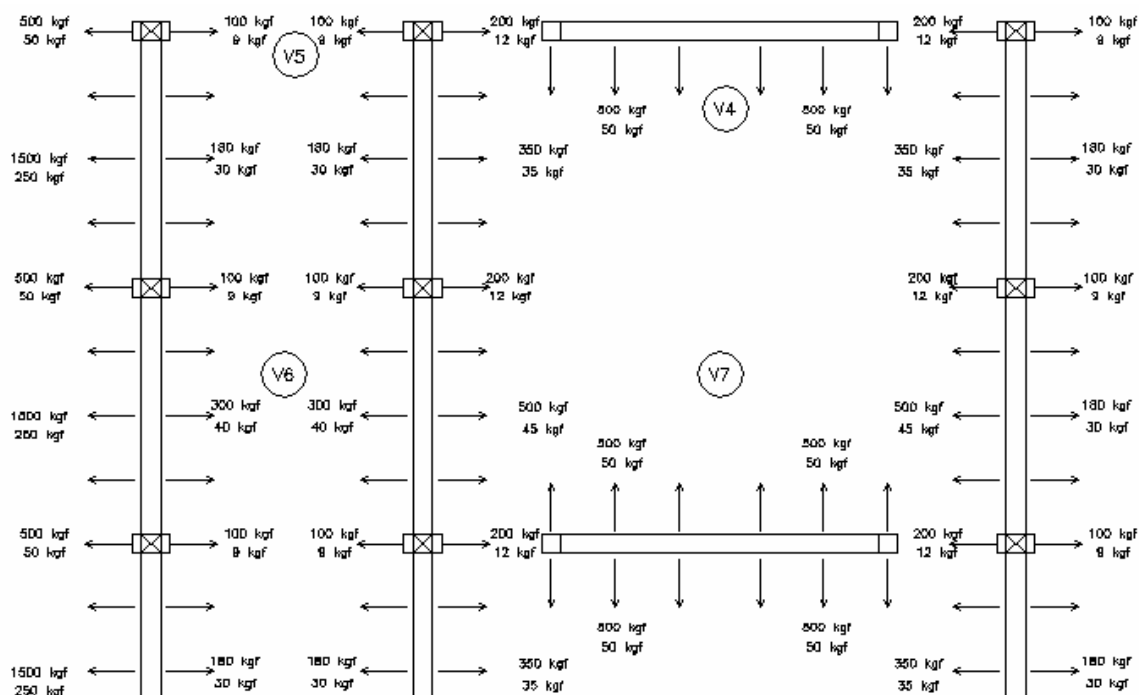


Figura 3 - Diagrama de esforços nas estruturas da subestação

Na análise dos elementos estruturais do pórtico 230kV (onde o número de vãos considerados variou de 02 a 04), considerou-se perfis ASTM A36 e A572 (grau 50), parafusos ASTM A-394, coeficientes de sobrecarga de 1,4 para todos os tipos de carregamento (peso próprio dos cabos e estrutura, vento nos cabos e na estrutura, tração dos cabos condutores e dos cabos pára-raios) e coeficiente de minoração da resistência limite de 0.9.

Foram considerados os dados reais (carregamento da estrutura) bem como suas alterações devido às mudanças no carregamento, provocadas quando na utilização do cabo termorresistente. Os diagramas de carregamento foram considerados de modo a representar as possibilidades de carga que a estrutura possa estar submetida durante sua vida útil, antes e depois da adoção do cabo termorresistente. Empregaram-se os fatores de majoração

e/ou minoração adequadamente considerados e combinados, de forma a dar a segurança necessária e a confiabilidade mecânica requerida para a estrutura. Para isto, considerou-se a norma de projeto ASCE 10-97 ("Design of Latticed Steel Transmission Structures") e foi utilizado o programa Tower (que internamente adota a norma de vento IEC 60826). Em todos os carregamentos foram considerados a presença, em cada vão do pórtico, de uma chave seccionadora, com três pólos de 2.100 kg cada.

Com as condições acima descritas, o objetivo da análise foi alcançado, que é a comparação da estrutura com e sem a utilização do cabo termorresistente. Nesta análise, a redução média do percentual de utilização dos elementos do pórtico chegou a 15% dos esforços de tração/compressão, dando possibilidade de redução da seção dos seus perfis e conseqüente redução dos custos das estruturas.

5.0 - ENSAIOS DE AQUECIMENTO DE CONECTORES PARA UTILIZAÇÃO EM CABOS TERMORRESISTENTES

Durante o projeto e dimensionamento dos barramentos e escolha do cabo termorresistente a ser utilizado surgiram questionamentos sobre os conectores e ferragem para serem utilizadas em composição com os cabos termorresistentes. As ferragens em geral utilizadas em subestações são ferragens amplamente utilizadas em linhas de transmissão e assim com aplicação já realizada conforme a referência (2). Concentramos então os esforços nos conectores para as instalações. Consultas realizadas a fabricantes de cabo e conectores possibilitaram a realização de ensaios de aquecimento nos principais conectores utilizados pela Chesf juntamente com a aplicação do cabo T-Cosmos. Os ensaios mostraram que os conectores existentes no mercado suportam as temperaturas mais elevadas de operação dos cabos termorresistentes e estabilizam em temperaturas inferiores ao seu limite de operação. A Figura 4 a seguir apresenta o resultado obtido para um dos principais conectores empregados pela Chesf.

LABORATÓRIO MAXXWELD RELATÓRIO DE ENSAIO DE AQUECIMENTO				N°	RA144
NORMA NBR-11788				DATA	16/12/2008
CLIENTE:	NEXANS	ODC:	-	ITENS N°	-
EQUIPAMENTO:	TRANSFORMADOR 3000A	CORRENTE DE ENSAIO:	720 A		
DESCRIÇÃO DO PRODUTO:	Conector Terminal Reto ao barramento com 4 Furos Meia				
REFERÊNCIA:	MYTCA-34A-4N				
DESENHO MAXXWELD	MYTCA-34A-4N REV.0				
MONTAGEM					
>Amostra de 2 Conectores; Conectores 1 e 2 >Cabo Cosmos CA 477 MCM					
					
RESULTADOS ENCONTRADOS ATÉ ESTABILIZAÇÃO					
HORA	CABO ENTRADA	CONECTOR 1	CONECTOR 2	CABO SAÍDA	
08:00	21°C	21°C	21°C	21°C	
08:30	127°C	52°C	52°C	132°C	
09:00	135°C	61°C	61°C	140°C	
09:30	141°C	66°C	66°C	147°C	
10:00	141°C	66°C	66°C	147°C	
10:30	143°C	67°C	67°C	149°C	
11:00	143°C	67°C	67°C	149°C	
11:30	143°C	67°C	67°C	149°C	
EXECUÇÃO NOME: MARCOS ROBERTO ASS: 		APROVAÇÃO NOME: PAULO SÉRGIO MORAES ASS: 		CLIENTE PARTICIPANTE NOME: SIDNEI UEDA DATA: 16/12/08	

Figura 4 – Relatório do ensaio de aquecimento: Conector Terminal Reto (chapa-cabo reto)

6.0 - COMPARAÇÃO DOS CUSTOS ENVOLVIDOS - MATERIAIS DE BARRAMENTO

Com todas as características elétricas e mecânicas dos cabos e dos conectores já definidas foram realizadas consultas a fabricantes de cabos e conectores com o objetivo de realizarmos uma comparação entre os custos de materiais de barramento de uma configuração padrão da Chesf, usando cabo 954 MCM, e uma configuração utilizando o cabos de liga de alumínio termorresistente. A **Tabela 4** apresenta os valores encontrados considerando uma subestação barra dupla a quadro chaves com duas células de entrada de linha, quadro células de transformação e uma interligação de barras. Foi considerado os cabos padrão Chesf como base.

Tabela 4 – Comparação de Custos

	Cabos AI 1350 (custos em p.u.)	Cabos TAI (custos em p.u.)
Mat. Barramento	1	0,914
Cabos	1	0,41

Total	1	0,59
--------------	---	------

7.0 - CONCLUSÃO

De acordo com o apresentado, a utilização de cabos de liga de alumínio termorresistente, apresenta-se como uma alternativa técnica e economicamente viável para otimização de barramento já existentes e com necessidade de recapacitação bem como pode representar um diferencial para a instalação de novos empreendimentos. Destacamos (ver **Tabela 4**) a redução de 41% no custo relativo ao total dos materiais empregados. Estudos preliminares mostram também redução de custos relativos a estruturas e bases empregadas nas subestações. Entretanto, destacamos que para cada caso específico de instalação deve ser realizado um estudo do regime de operação e contingência da subestação com o objetivo de verificar qual o cabo termorresistente melhor se adapta às necessidades da instalação.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Marques, J.M.C.; Neto, A.R.; UEDA, S., "Cabos termorresistentes no barramento da subestação de Jauru, CEMAR", XI ERIAC, Hernandarias, Paraguay, Maio 2005;
- (2) Nascimento, C.A. M.; Mourão, M.A.; Brito, J.M.C.; Assunção, J.M.; Fonseca, B.Q.A.; Ferreira, V.O.A.H., Bracarense, A.Q.; Ueda, S., "Aumento da capacidade de transmissão de linhas aéreas, utilizando cabo CAA de liga de alumínio termorresistente (TAL)", XV SNTPEE, Foz do Iguaçu, PR, 1999;
- (3) Nexans, "Catalogo: Alumínio – Condutores Nus";

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Fabio Nepomuceno Fraga

Nascido em Recife-PE no ano de 1975. Formado em Engenharia Elétrica, pela UFPE em 1998, Mestre em Engenharia Elétrica, pela UFPE em 2008. Trabalhou no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) onde atuou na área de normatização da operação e qualidade. Em 2002 ingressou na Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) onde atua na área de projetos de subestação. Em 2003 passou a coordenar o subcomitê CE-B3.01 (Novas Concepções) do comitê de estudo CE-B3 do Cigré-Brasil. Entre suas áreas de interesse estão sistemas de aterramento, compatibilidade eletromagnética, projetos e novas concepções de subestação.

Benilton Alessandro do Nascimento

Nascido em Recife-PE no ano de 1981. Técnico em Eletrotécnica, pelo CEFET-PE em 2001. Formando em Engenharia Elétrica, pela UPE em 2009. Trabalha na Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) na área de projetos de subestação desde 2002.

Rosemary Leandro Seixas Veloso

Formada em Engenharia Civil, pela UPE em 1996. Mestre em Engenharia Civil, pela UFPE em 2000, cuja dissertação abordou os métodos de análise, o comportamento e o dimensionamento de contraventamentos de estruturas reticuladas para LTs. Ingressou na Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) em 1984 e desde 1996 atua na área de projetos estruturais de subestação. Desde 2000 participa do Grupo de Trabalho GT-08 (Estruturas) do Comitê de Estudos CE-22 (Linhas Aéreas de Transmissão) do Cigré-Brasil.