

Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

Linha de Eletrodo Conversora Terminal Rio UHVDC ± 800 kV: Características Especiais, Desafios Técnicos e Critérios Diferenciados de Projeto.

ROBERTO L. S. NOGUEIRA(1); P. C. V. ESMERALDO(1); KELLY CHAN LAM(1); ALLAN LACERDA FRANÇA(1); ALCEDO QUINTILIANO(4); JOÃO C. KANAGUSKO; JOSÉ ANTONIO JARDINI(5); CLÁUDIO DA COSTA TEIXEIRA(7); NELITON LUÍS MACHADO(7); FABIAN ROJAS LAGO(8); SGBH(1); ENGEPRO ENGENHARIA(4); USP(5); GRANEL(7); SBEI SK(8);

RESUMO

As Linhas de Eletrodo possuem características e condições operativas singulares, que demandam critérios específicos de projeto consoantes aos requisitos de desempenho de uma interligação em Corrente Contínua. No Sistema UHVDC ± 800 kV Xingu-Rio, uma das Linhas de Eletrodo (LEs) possui extensão de 150km, comprimento este significativamente superior ao tipicamente existente em sistemas HVDC e que tornou ainda mais proeminentes tais especificidades de projeto.

Estas Linhas caracterizam-se, em geral, por apresentarem baixo nível de isolamento e pela ausência de cabos para-raios, o que aumentam a susceptibilidade quanto a falhas de isolamento por descargas atmosféricas. Outra particularidade está no método de eliminação de curtos-circuitos, pois sendo propriamente uma linha de “terra”, eventuais faltas condutor-terra não provocam alteração significativa da sua resistência “sob curto”. Além disso, a interrupção de uma LE sob condição de carga enseja num procedimento operativo especial que impacta na Conversora como um todo.

Este artigo trata sobre a supressão de faltas condutor-terra através da auto-extinção do arco pelas cadeias de isoladores, bem como dos requisitos e ensaios que foram especificamente desenvolvidos neste projeto. São abordados também os demais critérios de projeto eletromecânico especiais, indicando as principais avaliações, parametrizações e estudos realizados, considerando a relevância/impacto e aspectos desta Interligação.

PALAVRAS-CHAVE

Palavra-Chave,
HVDC, CCAT, Linha de Eletrodo, Critério de Projeto, Arco Sustentado, Ensaio

1.0 - INTRODUÇÃO

As Linhas de Eletrodo (LE) caracterizam-se por apresentarem uma dualidade conceitual: em sua essência são “Linhas de Terra”, contudo, possuem requisitos operativos típicos de Linhas de Transmissão convencionais. Por isso, requerem características singulares de dimensionamento e critérios de projeto elétrico, eletromecânico e mecânico específicos, consoantes ao adequado desempenho da Interligação HVDC.

Os Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua já implantados no país apresentam comprimentos de Linhas de Eletrodo típicos da ordem de 15 a 70km de extensão. No entanto, no caso do Sistema Xingu Rio houve a necessidade de se utilizar uma LE com 150km de extensão na Conversora Terminal Rio, localizada no município de Paracambi no Estado do RJ. Isto se deveu a algumas limitações técnicas e socioambientais para um local de implantação do Eletrodo de Terra mais proximamente à Conversora, tais como a morfologia do relevo

acidentado, a composição geológica de predominância rochosa, características elétricas desfavoráveis do solo, dentre outros.

Dentre as opções de localização de eletrodo de terra pesquisadas, foi selecionada a alternativa no sul de Minas Gerais, no município de Minduri, o que resultou numa Linha de Eletrodo significativamente superior às instaladas nos demais Sistemas HVDC no Brasil, e até mesmo comparado a outros países. Assim, a fim de buscar sinergia para a implantação/operação e mitigar os impactos meio-ambientais e socioeconômicos optou-se por implantar a Linha de Eletrodo no bordo interior da faixa da LT HVDC, ou seja, com compartilhamento de faixa.

Na Conversora Xingu, localizada no município de Anapu no Pará, a Linha do Eletrodo tem extensão de 38km e, apesar de estar situada na região amazônica, o seu traçado foi implementado procurando o aproveitamento máximo de áreas já antropizadas e acessos existentes com o objetivo de minimizar os impactos ambientais. No entanto, no terço final da linha atravessa uma área densamente florestada, que exigiu estruturas especiais e alteadas, de forma a mitigar e permitir a passagem sobre o dossel típico amazônico.

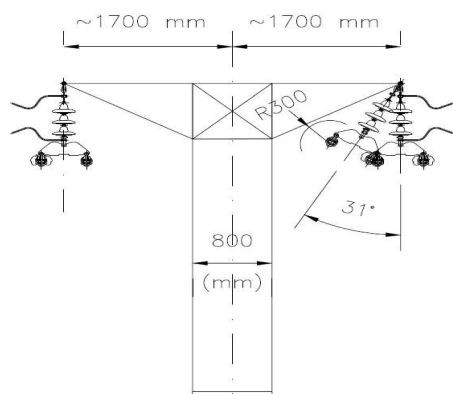
O presente artigo trata das principais avaliações, parametrizações, definições e estudos especiais desenvolvidos, considerando os aspectos elétricos, eletromecânicos e mecânicos do projeto singular destas Linhas de Eletrodo.

2.0 - CRITÉRIOS DE PROJETO

Devido às particularidades desta Linha de Eletrodo, tornou-se mister também a aplicação de critérios únicos e diferenciados de projeto eletromecânico e mecânico, mais conservativos se comparados às demais Linhas de Eletrodo.

2.1 Definição do Feixe de Condutores

Considerando os requisitos técnicos especificados no Edital ANEEL e as demais características da Linha de Eletrodo, desenvolveu-se um estudo de seleção e de otimização técnico-econômico para definição do arranjo de condutores. A opção selecionada consiste de 2 (dois) feixes com 2 (dois) subcondutores CA Hawthorn 1192,5MCM, conforme indicado a seguir.



Características do Condutor	
Tipo	CA
Bitola (kcmil)	1.192,5
Formação	61 fios
Subcondutores p/ "bundle"	2
Número de "bundles"	2
Seção do cabo (mm²)	603,78
Peso unitário (kgf/m)	1,6646
Diâmetro (mm)	31,95
Carga de ruptura (kgf)	9.558
Resistência CC a 20°C (Ω/m)	0,0119

FIGURA 1 - Configuração da LT e Características do Condutor

Requisitos Edital ANEEL:

Capacidade de Corrente: "A Linha de Eletrodo deve ser projetada com dois conjuntos de condutores ou feixes independentes na mesma estrutura de modo a permitir operar com um conjunto ou feixe em manutenção (linha-viva), com corrente nominal."

Corrente nominal: 2.540A (Xingu) e 2.500A (T. Rio)

Corrente Regime de Emergência: 3.365A

Perda Joule: "A resistência equivalente por unidade de comprimento do feixe de subcondutores que compõe a linha de eletrodo deve ser igual ou inferior a 0,01250 Ohms/km a corrente contínua a 20° C."

As características do condutor utilizado são indicadas na tabela acima. Neste caso, destaca-se que o critério de apenas 1 feixe em operação sob corrente nominal foi inédito nos requisitos técnicos de HVDC no Brasil e foi determinante para a seleção do arranjo adotado.

49

2.2 Coordenação de isolamento

O Edital ANEEL especifica que “As cadeias de isoladores deverão contemplar, para uma classe de tensão de isolamento não inferior 34,5 kV, um isolador adicional além de centelhadores, para facilitar a extinção do arco no caso de falta.”

A cadeia de Isoladores foi dimensionada considerando a metodologia convencional, conforme indicado abaixo:

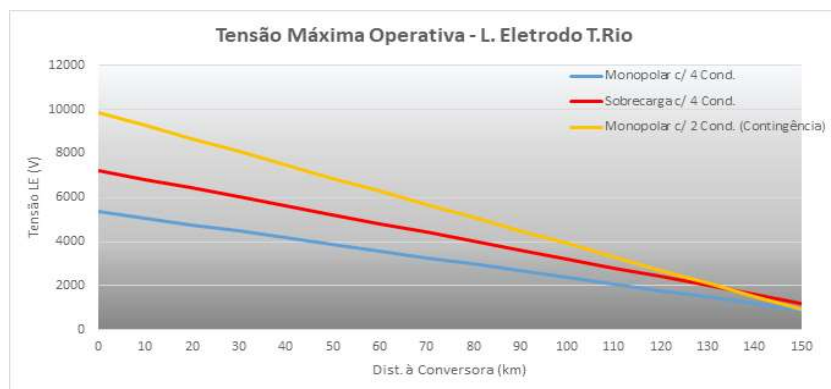
$$N = \frac{V_{\max} \cdot D_e}{D_i} = 1,83 \rightarrow 2 \text{ isoladores.} \quad \text{Considerando 1 adicional} \Rightarrow \text{Total} = 3 \text{ isoladores}$$

Onde:

N		Número de isoladores da cadeia
V_{\max}	36,5 kV	Tensão máxima de operação classe CA, fase-fase
D_e	16 mm/kV	Distância de escoamento classe CA específica, fase-fase
D_i	320 mm	Distância de escoamento, isolador de 120 kN

Apesar de o isolamento das LEs ter sido definido para classe CA 34,5kV, avaliou-se também o atendimento à tensão operativa CC real das mesmas. Os perfis de tensão ao longo das LEs são indicados na Figura 2, onde se observa o significativo decaimento à medida que se afasta da SE Conversora.

Para a LE T.Rio, na condição de operação monopolar com corrente nominal e sem contingência (azul), a máxima tensão operativa é de 5,37 kV. Considerando o cenário mais desfavorável, com corrente nominal e sob contingência (somente 1 bundle em operação), cor laranja, a tensão máxima operativa é de 9,87kV. Para LE Xingu, devido à sua menor extensão, o perfil de tensão operativa é significativamente inferior ao do Terminal Rio, conforme pode ser observado nos gráficos a seguir.



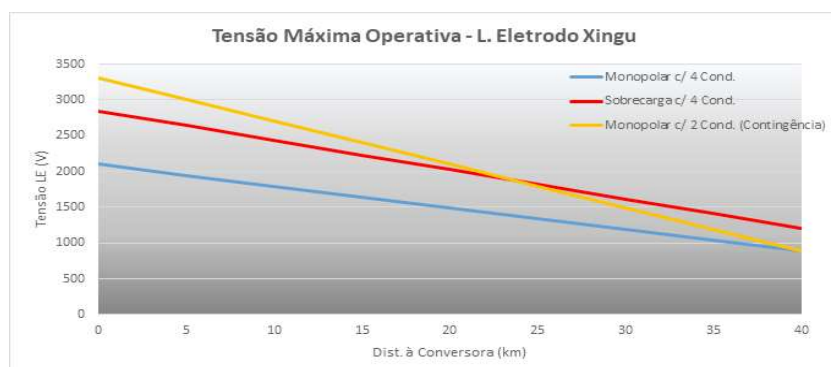
Tensões Máximas Operativas

Bipolar (40A): 158V

Monopolar (2.540A): 5,37 kV

Monopolar Emergência
(3.365A): 7,23 kV

Monopolar (2.540A) c/
Contingência: 9,87 kV



Tensões Máximas Operativas

Bipolar (80A): 104V

Monopolar (2.540A): 2,10 kV

Monopolar Emergência
(3.365A): 2,85 kV

Monopolar (2.540A) c/
Contingência: 3,31 kV

FIGURA 2 - Perfil de tensão operativa real ao longo das Linhas de Eletrodo T.Rio e Xingu

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Portanto, constata-se que a condição de máxima tensão operativa da LE está suficiente abrangida pela classe de isolamento da LT. Todavia, não obstante a isto, cumpre ressaltar que no caso da LE T.Rio, nos 47km iniciais a partir da Conversora, foi implementada uma cadeia com 5 isoladores, conforme será tratado nos itens que se seguem.

2.3 Série de Estruturas

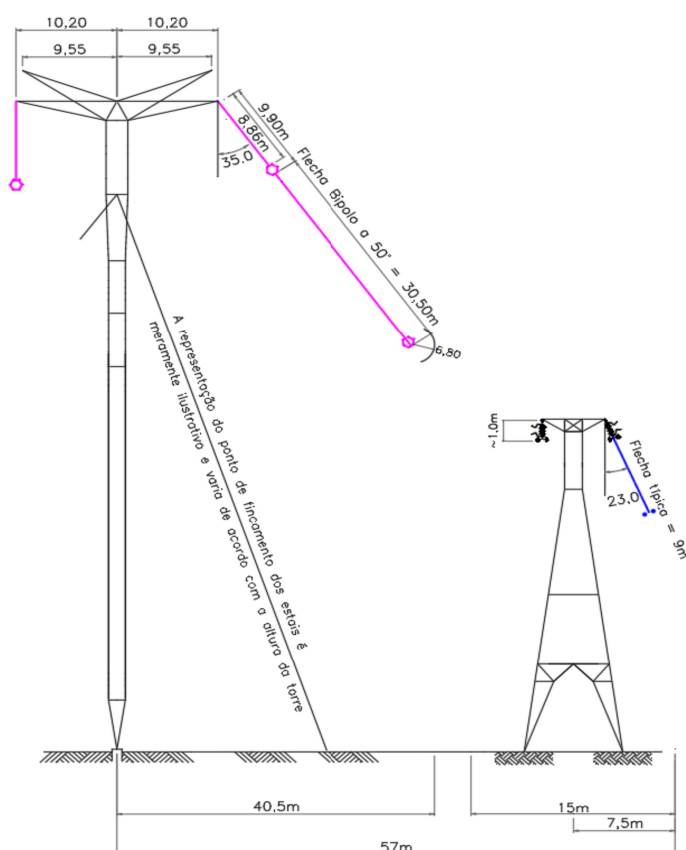
A LE T. Rio atravessa os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, particularmente numa região montanhosa no entorno da Serra dos Órgãos, pertencente à cadeia de montanhas da Serra do Mar e demais maciços da Serra da Mantiqueira. Por sua vez, a LE Xingu se localiza no município de Anapu no estado do Pará, atravessando alguns trechos típicos de remanescentes florestais amazônicos, com indivíduos arbóreos da ordem de até 45m de altura.

Em virtude do relevo montanhoso predominante na região do Rio, com travessias especiais e vales, das áreas de remanescente florestal tanto no Rio de Janeiro como no Pará, bem como das condições especiais de tração e características dos feixes de subcondutores, buscou-se aplicar uma solução em estruturas de aço treliçadas visando otimizar a locação nestes trechos, viabilizar a logística construtiva, atender aos requisitos mecânicos, além de prover maior confiabilidade e resiliência para o sistema.

No dimensionamento das séries de estruturas das LEs, foram consideradas hipóteses de carregamento específicas, de rompimento de feixe de condutores e condição de contenção de cascata, de forma a minimizar os possíveis efeitos de colapso em virtude de eventuais ações de furto e vandalismo. Além disso, foram incluídas as hipóteses associadas ao vento de alta intensidade, aprimorando a segurança estrutural e caracterizando o ineditismo em projetos de Linhas de Eletrodo no país.

Considerando os aspectos particulares de cada Linha de Eletrodo e ainda os requisitos de coordenação de isolamento, foi definida uma série de estrutura para cada Linha, com estruturas de suspensão leve e pesada de deflexão até 8° e torres de ancoragem leve, média e pesada. Na LE T. Rio a altura máxima é de 40m e na LE Xingu 51m.

2.4 Faixa de servidão



Para a LE T.Rio foi adotada uma largura da faixa de servidão de 15,0m. De forma de minimizar os impactos construtivos, fundiários, socioeconômicos e, principalmente, ambientais, devido à predominância de mata atlântica na região atravessada pela LT, buscou-se implantar a mesma no bordo interior da faixa de servidão da LT HVDC, conforme indicado na Figura 3. Com este compartilhamento de faixas, foi possível otimizar e aumentar a sinergia de implantação do empreendimento, em virtude da longa extensão da LE T.Rio, com 150km.

Na LE Xingu, devido à localização do eletrodo de terra, o traçado segue em rota diferente do HVDC e, por isso, não foi aplicável o compartilhamento de faixa. Apesar de o Eletrodo de Terra da Xingu-Rio estar próximo ao do Sistema Xingu-Estreito (Bipolo 1), estabeleceu-se uma rota afastada da LE Bipolo 1, a fim de mitigar os impactos e riscos de colapso mútuo de ambos os

sistemas HVDC, devido a possíveis ações de vandalismo. Na LE Xingu foi estabelecida uma faixa de servidão de 20,0m,

FIGURA 3 - Esquemático do compartilhamento faixa LE T.Rio, para a configuração típica.

2.5 Estudos de Interferência

Devido ao compartilhamento da faixa do HVDC pela a LE T.Rio, tornou-se necessário considerar aspectos/avaliações específicos no desenvolvimento do projeto eletromecânico da LE, quanto à locação das estruturas, condições especiais de balanço das catenárias de ambas as linhas e análise de risco de aproximação condutor-condutor e condutor-estrutura.

Como a LT HVDC já se encontrava em estágio mais avançado de construção, nos casos onde houve necessidade de mitigação dessas interferências, procedeu-se com ajustes na Linha de Eletrodo, tais como: variantes para afastar seu eixo das torres, cabos e/ou estais do HVDC, bem como o alteamento, substituição ou inserção de torres na LE para deslocar verticalmente sua catenária.

A avaliação completa do compartilhamento incluiu análises e estudos desenvolvidos particularmente para cada vão da Linha, considerando os seguintes critérios:

Critério 1 - Balanço do condutor HVDC sobre os condutores ou torres da LE.

Critério 2 - Balanço do condutor LE sobre o condutor HVDC, torres e seus estais;

Para avaliação destes critérios, considerou-se apenas um dos feixes (HVDC ou Eletrodo) sob condição de balanço, estando o outro (Eletrodo ou HVDC) em repouso. O balanço dos condutores foi verificado para a condição de vento máximo com período de retorno de 50anos. Todos os vãos foram devidamente verificados no PLS-Cadd.

Apesar da altura média do HVDC ser significativamente maior que a da LE, foram detectadas situações que exigiam um tratamento especial, ocasionadas, basicamente, devido às diferenças na elevação do terreno entre as duas linhas, potencializadas pela existência de grandes vãos e relevo acidentado em ambas as Linhas.

São exemplificados a seguir alguns casos críticos das situações detectadas ao longo do estudo detalhado desenvolvido em toda a extensão da LT:

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

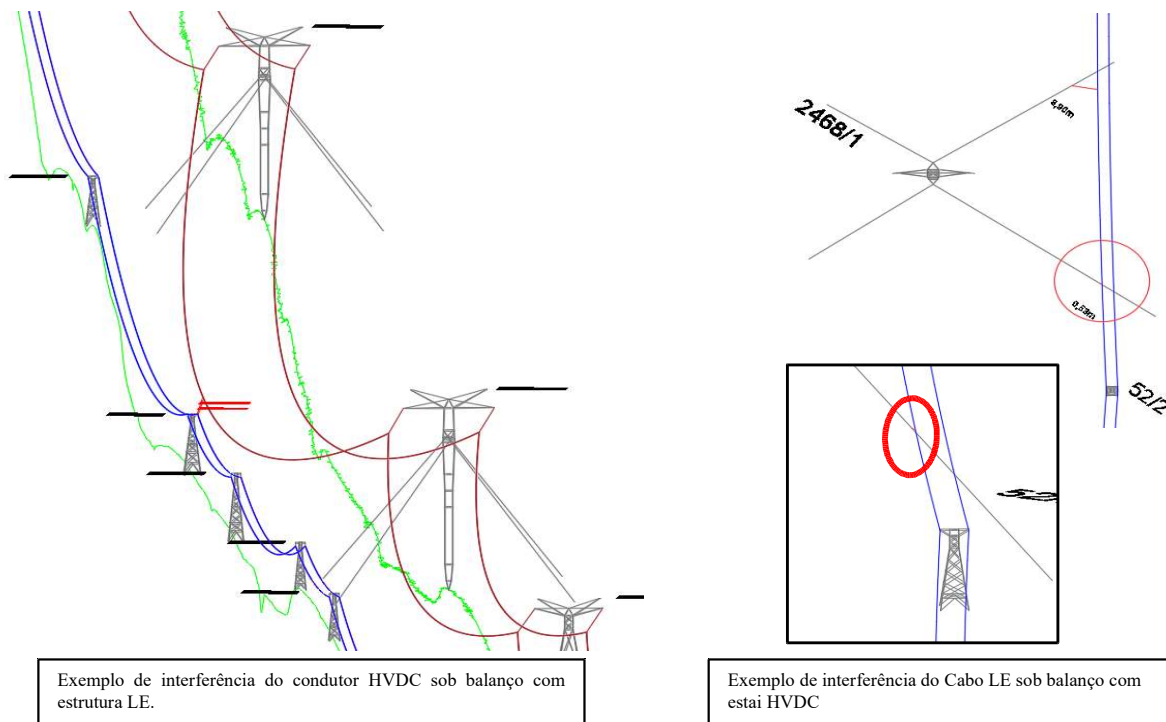


FIGURA 4 – Exemplo de verificação de interferência entre Linha de Eletrodo e HVDC.

Critério 3 - Interferência/aproximação entre sistemas de aterramento de estruturas

A configuração do sistema de aterramento das estruturas da LE foi devidamente analisada quanto à possível interferência com cabos contrapesos do HVDC. Foi desenvolvida conferência *in loco* e implementados em campo mudanças no caminhamento do cabo contrapeso, para eliminar a sobreposição/aproximação entre os sistemas de aterramento. A figura a seguir apresenta a configuração do sistema de aterramento das estruturas da LE.

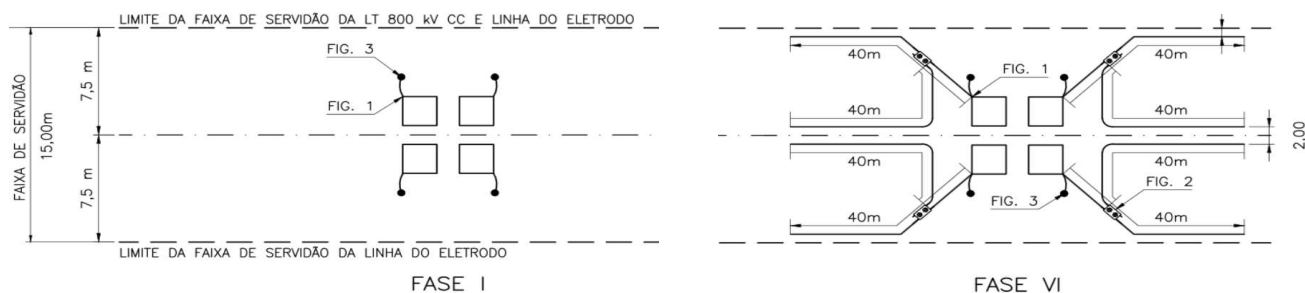


FIGURA 5 – Configurações do Sistema de Aterramento das Estruturas LE. Fase I (mais simples) e Fase VI (mais ramificada).

Critério 4 - Aproximação entre as fundações das torres da LE e dos estais HVDC

A locação da torre da LE considerou também o impacto construtivo e interação entre as respectivas fundações. As torres da LE que eventualmente viessem a causar interferência quanto a este aspecto foram reposicionadas, de forma a mitigar riscos tanto durante a fase de construção como de operação do empreendimento.

Critério 5 - Tombamento das torres da LE sobre os estais HVDC.

A locação das torres da LE foi verificada e ajustada também quanto ao seu possível risco de tombamento sobre os estais do HVDC.

3.0 - CRITÉRIOS ESPECIAIS DE DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO

As linhas de eletrodo de sistemas HVDC possuem baixo nível de isolamento (no caso específico, LTCA 34,5kV) e, via de praxe, não possuem cabos para-raios. Portanto, estão suscetíveis a falhas de isolamento por ocorrência de descargas atmosféricas diretas incidentes sobre a mesma ou por sobretensões oriundas de manobras ou outras condições operativas especiais no elo CC. Assim, se a linha do eletrodo estiver em operação (ou seja, com sistema HVDC em modo Monopolar, com retorno terra), caso ocorra incidência de descargas atmosféricas, haverá um curto-circuito sustentado pelo sistema.

Contudo, algumas características de operação se diferem com relação aos sistemas CA e de Bipolos CC, pois como a Conversora é uma fonte de corrente e sendo a Linha de Eletrodo um circuito de terra, durante o curto-circuito não haverá sobrecorrente. Além disso, a resistência equivalente da LE sob curto (em situações típicas de curto) não sofrerá alterações significativas (conforme detalhado a seguir). Como resultado, tem-se um curto-circuito sustentado junto à torre, onde a corrente que flui para a terra será determinada em função da resistência de aterramento da torre e da resistência do bundle de condutores à jusante do ponto de curto (até o Eletrodo de Terra).

Este comportamento especial sob condição de curto-circuito cabo-terra na torre torna-se fundamental para definição da coordenação de isolamento da Linha, pois a extinção do arco se dará de modo autônomo na cadeia, especificamente sobre o centelhador. Portanto, o *gap* do centelhador deverá ser dimensionado para ser capaz de promover a auto-extinção do arco. A corrente de curto máxima permitida é, então, fator determinante para a definição dos requisitos do sistema de aterramento e o dimensionamento da cadeia de isoladores.

Estes aspectos foram amplamente considerados/avaliados no projeto dos sistemas HVDC de Itaipu (1) a (3). Todavia, alguns fatores destes sistemas são menos críticos que os existentes no Sistema Xingu-Rio, tais como menor nível de sobretensão, menor comprimento das linhas de eletrodo, topologia de terreno (levemente ondulado) e condições de locação mais favoráveis (vãos curtos e menor altura média).

Assim, frente às solicitações e condições especiais de operação desta Linha de Eletrodo quanto a curtos-circuitos, e considerando o escasso registro de informações/publicações técnicas associadas ao comportamento/modelagem de arcos de magnitude não elevada (da ordem de até 1 kA), julgou-se de fundamental importância a realização de ensaios de curto-circuito sustentado, de forma, a verificar/validar o desempenho e comportamento associados ao fenômeno de auto-extinção destes arcos, em especial, quanto à eficácia dos centelhadores da cadeia de isoladores e performance das ferragens.

A análise da distribuição das correntes de curto-circuito ao longo na Linha de Eletrodo é feita a partir do circuito equivalente indicado a seguir:



FIGURA 6 - Circuito para Cálculo da Corrente de Arco

No gráfico da figura a seguir são apresentadas as correntes de curto-circuito para a condição de falta na linha de eletrodo em função da distância a partir da Conversora (L_1), para diferentes resistências de aterramento de estrutura.

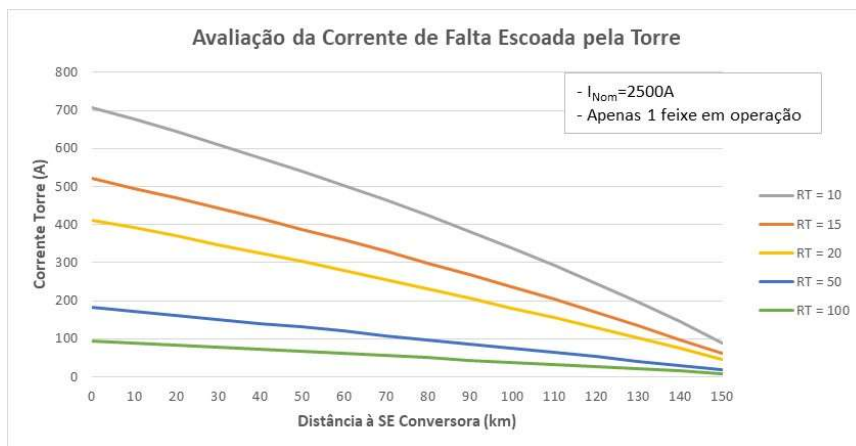


FIGURA 7 - Corrente de curto-circuito sustentado em função da distância à Conversora (L1).

A partir da análise dos comportamentos da corrente na condição de falta, considerou-se, conservativamente, a resistência de aterramento mínima de projeto de 20Ω . Assim, a corrente de curto-circuito estaria limitada a 150A para a LE Xingu e a 412A para LE T.Rio.

4.0 - ENSAIOS DAS CADEIAS DE ISOLADORES

4.1 Sistema HVDC Itaipu – Ensaios CESI

Por ocasião do projeto do sistema HVDC de Itaipu, foi desenvolvida verificação do fenômeno de extinção de arco em ar (corrente contínua) nas Linhas de Eletrodo, sendo realizados ensaios em laboratório (1) a (4). Os valores de tensão aplicada foram de 2,85kV e 4kV. O ensaio foi feito considerando uma cadeia de isoladores antifog com gap tipo hastes verticais, chifres verticais e chifres horizontais. As distâncias do gap variaram de 6 a 50 cm. Para cada corrente de arco-gap foram aplicados 10 ensaios (shots). Os resultados obtidos à época [3] são apresentados na Tabela 1.

Gap m	E Volts	I_1^* Amps	I_1 Amps	Numbers of Falls / Total N /	Average Time to Extinguish seconds
VERTICAL ROD GAP RESULTS					
0.20	2850	55	34	0 / 10	0.42
0.35	2850	106	63	0 / 10	0.45
0.50	2850	200	159	0 / 10	0.46
0.20	4300	48	40	0 / 10	0.42
0.35	4300	107	93	0 / 10	0.50
0.50	4300	126	100	0 / 10	0.53
0.20	4300	155	125	1 / 15	-
0.35	4300	216	179	2 / 10	-
0.50	4300	320	272	3 / 3	0.57
0.20	4300	320	250	0 / 10	1.1
0.35	4300	340	294	0 / 10	-
0.50	4300	445	348	3 / 3	-
0.20	4300	540	381	3 / 3	-
VERTICAL HORN GAP RESULTS					
0.20	4300	321	241	0 / 10	0.98
0.35	4300	430	325	0 / 10	0.52
0.50	4300	55	40	2 / 20	0.44
0.20	3000	50	40	0 / 30	0.44
0.35	3000	106	87	0 / 30	0.51
0.50	3000	200	154	0 / 30	0.51
0.20	4300	340	241	0 / 10	0.51
0.35	4300	445	348	0 / 10	0.64
HORIZONTAL HORN GAP RESULTS					
0.06	3000	50	N/A	0 / 2	0.53
0.20	3000	106	87	0 / 10	0.47
0.35	3000	200	154	0 / 10	0.51
0.50	3000	340	241	0 / 10	0.51
0.20	4300	540	381	0 / 10	0.64

Nota: A corrente I_1^* é a prospectiva (esperada por cálculo) e I_1 a medida

TABELA 1 - Resultados de Ensaio Extinção de Arco - CESI.

Para o sistema Itaipu, a condição crítica foi a Linha de Eletrodo de Ibiúna, que possui 70 km de extensão. Para a corrente em cada condutor desta Linha do Eletrodo, de 1,3 kA, e resistência de aterramento de 10Ω , a corrente de arco foi estimada em 300 A. Desta forma, para este sistema ficou estabelecida uma cadeia com 2 isoladores 170x320 mm e centelhador tipo chifre vertical com gap de 20 cm.

Estes ensaios e alguns parâmetros desenvolvidos serviram de balizamento aos novos ensaios para as Linhas de Eletrodo Xingu-Rio.

4.2 Ensaio Xingu-Rio - KEMA

Visando a verificação das ferragens das Linhas de Eletrodo T.Rio e Xingu, em especial, considerando as particularidades da LE T.Rio, estabeleceu-se a necessidade de se executar o ensaio de auto-extinção de arco nas cadeias de isoladores. Para isto, foram pesquisados os principais laboratórios no mundo, sendo o KEMA, na República Tcheca, o que possuía as condições técnicas e disponibilidade de agenda necessária.

O circuito de teste é apresentado na Figura 8, sendo consideradas a resistência R_1 da torre sob arco, com corrente de curto (I), e resistência R_2 onde passa a corrente total (IL) da Linha de Eletrodo e que exerce força de deslocamento do arco. A tensão de ensaio foi de 4 kV, limitada pela capacidade da fonte do laboratório.

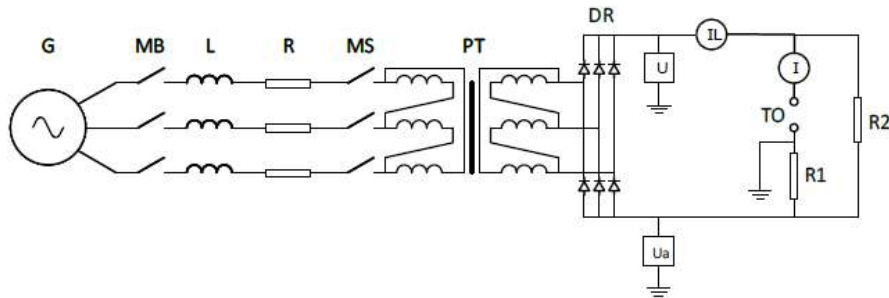


FIGURA 8 - Circuito de Ensaio

O “mockup” do arranjo no laboratório e o esquema com as dimensões do ensaio são apresentados na Figura 9.

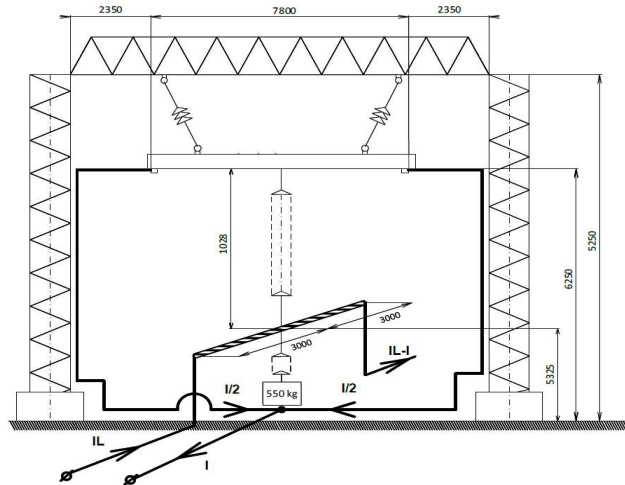


FIGURA 9 - Mockup do arranjo no Laboratório e Esquema de Ensaio

Foram ensaiadas as cadeias compostas de 3 isoladores e de 5 isoladores de vidro temperado convencional (146 x 255 mm) com centelhador tipo chifre vertical, conforme apresentado na Figura 10. As cadeias com 3 isoladores possuem gap de 300mm e as cadeias com 5 isoladores um gap de 592mm. Os resultados dos ensaios são apresentados na TABELA 2. Nos gráficos da FIGURA 11 são apresentados os oscilogramas dos ensaios #4 e #17.

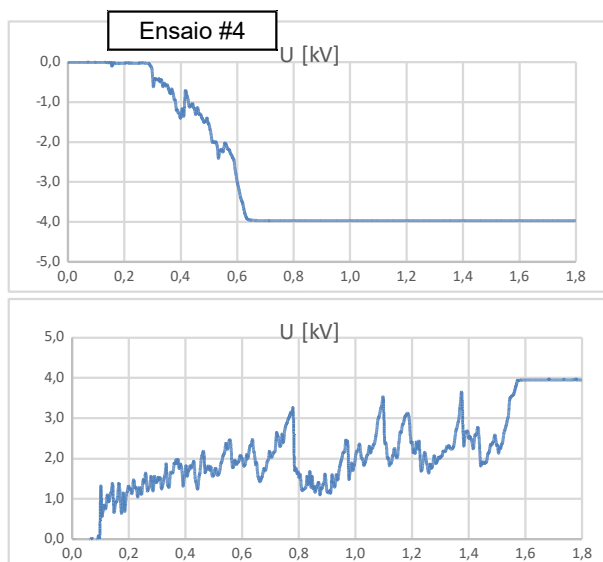


FIGURA 10 - Cadeia de Isoladores ensaiadas com 3 e 5 isoladores, indicando o centelhador tipo chifre vertical

TABELA 2 - Resultados de Ensaio de Extinção de Arco

Número do Ensaio	Corrente Inicial do Arco I (A)	Tempo de Extinção (ms)	Tipo de Cadeia
4	320	333	3 isoladores
5	329	325	
6	329	500	
7	330	440	
8	330	290	
9	330	700	
10	712	320	

Número do Ensaio	Corrente Inicial do Arco I (A)	Tempo de Extinção (ms)	Tipo de Cadeia
11	713	235	3 isoladores
12	712	265	
13	1.020	369	
14	1.022	260	
15	1.420	437	
16	1.360	1.135	5 isoladores
17	1.647	1.500	



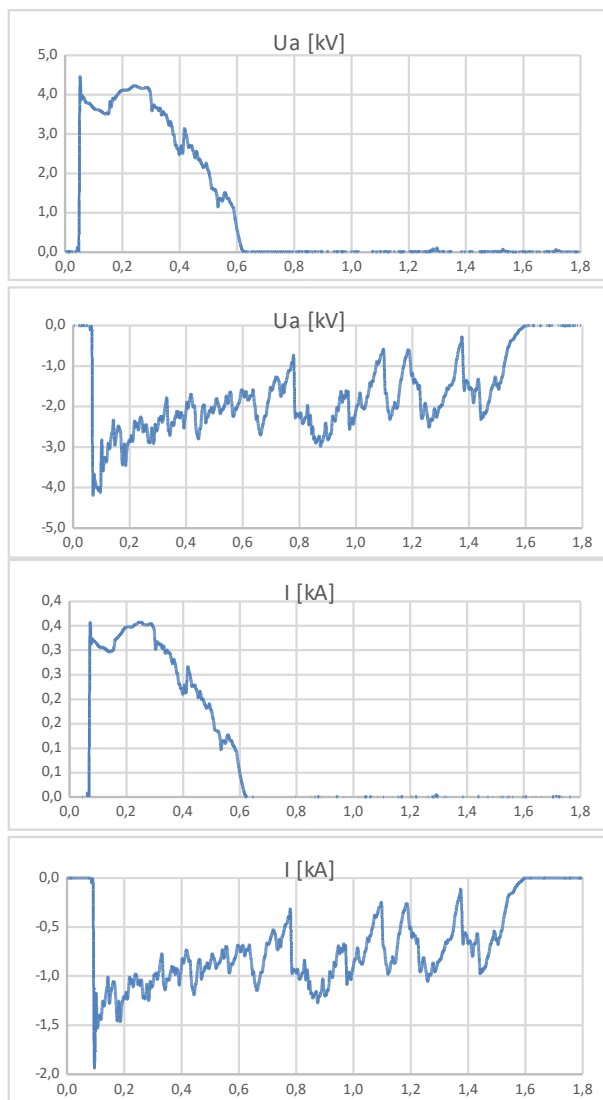


FIGURA 11 - Oscilogramas Ensaio #4 e #17. Valores de U, Ua e I.

Considerando tanto os ensaios realizados para o Projeto Xingu-Rio, bem como os desenvolvidos para o projeto Itaipu, concluiu-se que um gap de 300mm atende completamente toda a LE Xingu, pois a corrente máxima do ensaio de auto-extinção, de 1.022A, está significativamente acima da maior corrente de curto-circuito prevista, de 150A.

Por sua vez, apesar de a cadeia de 3 isoladores ser capaz de atender também a corrente de curto esperada da LE T.Rio, de 412A, pelo princípio da precaução, julgou-se conveniente adotar a cadeia de 5 isoladores, devido à maior suportabilidade desta e algumas limitações do ensaio, como a não representação do fenômeno transitório e a tensão de ensaio estar limitada a 4 kV (sendo inferior à tensão máxima de 9,87kV). Assim, na LE T.Rio aplicou-se a cadeia com 5 isoladores nos 47 km iniciais junto à Conversora, sendo o restante com 3 isoladores, como na LE Xingu.

4.3 Ensaios mecânicos

Além da avaliação do comportamento da auto-extinção das cadeias, outro objetivo do ensaio foi avaliar a confiabilidade mecânica do conjunto das ferragens, visando a mitigação de riscos de rompimento/queda da

cadeia, em consequência de fenômenos de curto-circuito. Assim, após a aplicação de sucessivos ensaios de curto, procedeu-se com a inspeção visual de integridade das ferragens, na sequência com ensaios mecânicos da cadeia completa e, por fim, ensaio destrutivo superior à carga de ruptura. Foi observado o atendimento a todos os requisitos.



FIGURA 12 - Efeito do arco no centelhador e ensaio mecânico destrutivo a cadeia, comprovando o atendimento aos requisitos de integridade.

5.0 - CONCLUSÕES

Considerando a relevância/impacto dos critérios e requisitos associados a este projeto, configurou-se um contorno de condicionantes especiais e únicos para esta Linha de Eletrodo, o qual demandou a análise conjunta e integrada de diversos fatores técnicos e construtivos, com estudos e avaliações específicas ao longo da fase de Projeto. Tais aspectos de avaliação caracterizam-se significativamente diferenciados e imprescindíveis de serem considerados tendo em vista a excepcionalidade desta linha com relação aos demais Sistemas HVDC já implantados.

Desta forma, como resumo das análises e verificações desenvolvidas é possível consolidar as seguintes constatações abaixo:






- A análise e definição de critérios de projeto especiais, do estudo detalhado das interferências, bem como do controle das condições de implantação em campo, visam mitigar os eventuais riscos operativos de forma a atender a confiabilidade da interligação, considerando o compartilhamento de faixa de servidão entre HVDC e L.Eletrodo;
- As considerações especiais aplicadas as séries de estruturas, com uso de torres treliçadas, hipóteses de contenção de cascata e ventos de alta intensidade, representam um projeto estrutural inédito no Brasil e de maior confiabilidade;
- A aplicação da cadeia de isoladores com 3 isoladores convencionais (254x146mm) e centelhador tipo chifre vertical com gap 30 cm atendem ao requisito de auto extinção do arco CC em ambas as Linha de Eletrodos Xingu e Terminal Rio;
- Para a Linha de Eletrodo Terminal Rio, devido à sua grande extensão, pelo princípio da precaução, julgou-se conveniente adotar nos 47km iniciais junto à conversora, a cadeia com 5 isoladores convencionais (254x146mm) com gap de 59,2cm.
- As ferragens projetadas atendem as especificações elétricas e mecânicas de uma Linha de Eletrodo
- O uso de compartilhamento de faixa de servidão do Bipolo pela Linha de Eletrodo se mostrou uma alternativa tecnicamente confiável e ambientalmente sustentável, sendo uma excelente solução de mitigação dos impactos socioeconômicos e fundiários do empreendimento, bem como para a operação e manutenção do sistema.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. A. O. Peixoto e outros, "DC Arc Extinction on Long Electrode Lines for HVDC Transmission" Proceedings of the International Conference on DC Power Transmission, June 4-8, 1984, Montreal, CA.
- [2] A. Elli, "Study of Behavior of Free-Air Gaps Placed on the DC Electrode-line During Self-extinguishing Test", Relatório, CESI, 1979.

- [3] C. A. O. Peixoto e outros, "Sistema de Itaipu CC/CC. Estudos Elétricos das Linhas CC e do Eletrodo", VI SNPTEE, 1981.
- [4] C. A. O. Peixoto, C. M. Portela, D. J. Lobley, J. A. Jardini, "Electrode Line: Design Optimization and Environmental Impact Studies for Itaipu \pm 600 kV Lines and Electrodes Lines", Cigré Symposium 22-81, Stockholm, Sweden, 1981.
- [5] V. Jankov, M. Stobart, "HVDC System Performance with a Neutral Conductor", 978-1-4244-8286-3/10©2010 IEEE.
- [6] Engepro, consorcio Alumini-ICSK-FJEPC, Xingu Rio, "Linha do Eletrodo Terminal Rio. Estudo dos Comprimentos De Cadeias", Relatório, 2018.
- [7] Consorcio Alumini-ICSK-FJEPC, Grantel, Xingu Rio, ref.: XRTE-LE-T11-FC-DD-0001, "Ferragens para Cabo Condutor Desenhos", Relatório Técnico XRTE, 2018.
- [8] Consorcio Alumini-ICSK-FJEPC, Grantel, Chengdu Electric, Xingu Rio, ref.: XRTE-LE-T11-FC-DV-0002, "Ferragens para Cabo Condutor - Procedimentos de Ensaio de Arco Sustentado", Relatório 2018.
- [9] Kema test Report 5167-18, 5168-18, Extinção de arco cadeia de 3 e 5 isoladores respectivamente.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	Roberto Luís Santos Nogueira Engenheiro Eletricista, graduado em 1999 pela Universidade Federal do Rio Janeiro - UFRJ, M.Sc. em 2006 pela COPPE/UFRJ Sistemas de Potência. Atuou em Projetos Elétricos-Eletromecânicos de Linhas de Transmissão e P&D em consultorias de Engenharia Fluxo Engenharia e SNC-Lavalin/Marte Engenharia. Atuou no gerenciamento de Implantação de LTs e SEs na Isolux Concessões. Atualmente trabalha StateGrid Brazil Holding – SGBH como Gerente do Departamento de Engenharia.
	Allan Lacerda França Engenheiro Eletricista – ênfase em Eletrotécnica, 2009, CEFET/RJ. Pós graduado em Gestão em Eficiência Energética, 2011, UCP-RJ. Atuando, atualmente, no Departamento de Engenharia da StateGrid Brazil Holding – SGBH. Atuou em projetos elétricos e eletromecânicos na área de Linhas de Transmissão na SNC-Lavalin/Marte Engenharia, em diversos projetos no Brasil e no Canadá, e também na Colômbia.
	Kelly Chan Lam Engenheira Eletricista – ênfase em Eletrotécnica, graduada em 1999 pelo CEFET/RJ. Atualmente, atua, no Departamento de Engenharia da State Grid Brazil Holding – SGBH, com atuação anterior, na mesma empresa, na Divisão Técnica de O&M LT. Atuou em Projetos Eletromecânicos de Linhas de Transmissão, situados no Brasil e no Canadá, na Fluxo Engenharia e SNC-Lavalin/Marte Engenharia. Atuou, também, no CEPTEL, nos projetos relacionados ao Programa "Luz Para Todos" e ao Programa Computacional "DianE - Sistema de Análise e Diagnóstico de Equipamento".
	José Antonio Jardini Engenheiro eletricista (1963), mestre (1969) e doutor (1973) pela Escola Politécnica da USP. Trabalhou na Themag no cargo de superintendente e como professor e pesquisador na Escola Politécnica da USP (Professor Titular). Atuou nos projetos: sistema de transmissão de Itaipu, Cesp, Chesf, Eletronorte, Furnas, Eletrosul. É atuante no Cigré, nos comitês CE- B2 e CE-B4 e, no IEEE como Fellow Member e atuou como Distinguished Lecturer nas Sociedades de Potência (PES) e Industrial (IAS). Atualmente é consultor independente e diretor da J2 Consultoria e no Instituto Técnico de Automação e Estudos Elétricos (ITAEE).
	Fabián Alberto Rojas Lago Engenheiro Elétrico (PUCV-Chile), Master em Energia (PUC-Chile). Gestor de Projetos em Sbei-SK, com 10 anos de experiência em projetos de alta e meia tensão no Brasil e no Chile desenvolvendo projetos em corrente contínua e alternada, nas áreas de apoio à construção e de engenharia nas etapas de orçamentos, engenharia básica e de detalhamento.

Cláudio da Costa Teixeira, Engenheiro eletricista - ênfase em sistemas de potência, 1992, Escola Politécnica da USP.



Trabalhou na Siemens, Camargo Corrêa Brown Boveri e S&C Electric do Brasil, com atuação na automação de sistemas de distribuição subterrâneos e submersíveis da Eletropaulo, apresentado no IEEE PES T&D - Dallas em 2006. Desde 2010 trabalha na Grantel Equipamentos como responsável técnico de isoladores e ferragens para linhas de transmissão, co-autor do projeto do isolador coluna suporte 800kV utilizado como solução à causa do desligamento do sistema interligado ocorrido em 2009 conforme relatório EPE.

Membro do COBEI, IEEE e CIGRÉ.