



**XXII SNPTEE  
SEMÍNÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GSE/21  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO -VIII**

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

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DO RIO MADEIRA – PRIMEIRO BIPOLO HVDC  
ELETRODOS DE ATERRAMENTO – INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICAS E CRITÉRIOS DE PROJETO**

**Paulo Edmundo da F. Freire (\*)  
PAIOL ENGENHARIA**

**Soren Nyberg  
ABB**

**Geraldo L. C. Nicola/ Patrícia de O. F. Borin  
ELETROBRAS ELETRONORTE**

**João Neves T. Filho  
ETE**

**Marcus Danilo Perfeito  
CONSÓRCIO THEMAG/ARCADIS LOGOS**

**RESUMO**

Os eletrodos de aterramento de um sistema de transmissão HVDC são concebidos para a injeção de corrente contínua no solo, tanto para a corrente de desequilíbrio do bipolo quando na condição de funcionamento normal, ou para a plena corrente quando em operação monopolar com retorno pela terra. Os eletrodos de aterramento foram localizados e concebidos com base em extensas pesquisas geológicas, de modo a atender os requisitos de projeto, considerando tanto as suas condições operacionais (máxima elevação de temperatura do solo, vida útil, gradientes de potenciais no solo etc.), como os efeitos de interferência nas instalações dentro da sua área de interferência. Ambos os eletrodos são do tipo vertical, consistindo em subeletrodos lançados no interior de poços com 35 cm de diâmetro, a profundidades variáveis, dependendo da geologia em cada local selecionado. O eletrodo de Araraquara está localizado a 34 km da subestação conversora, sendo composto por 160 subeletrodos, com profundidades entre 20 m e 40 m. O eletrodo de Porto Velho está localizado a 56 km da subestação conversora, e tem 60 subeletrodos, cada um com 90 m de profundidade. A configuração de subeletrodos vertical foi escolhida de modo que se pudesse lançar a parte ativa dos eletrodos dentro do lençol freático e do fluxo de água, perfilagem eletromagnética e coleta de amostras de solo e água, para a medição da condutividade térmica e a análise de eletro-osmose de risco.

Este trabalho apresenta os estudos geológicos realizados para a seleção das áreas de construção dos eletrodos, e, posteriormente, para apoiar o desenvolvimento do projeto.

Nas extremidades norte e sul da linha HVDC foram prospectadas, respectivamente, 5 e 6 áreas, por meio de medições magnetotélúricas. Com base nesses levantamentos preliminares foi escolhida a melhor localização para o eletrodo em cada extremidade. Posteriormente, a geologia de cada uma destas áreas foi examinada em detalhes, por meio de sondagens em superfície (eletroresistividade) e com a perfuração de poços - para caracterização geotécnica, medição do nível do lençol freático e do fluxo de água, perfilagem eletromagnética e coleta de amostras de solo e água, para a medição da condutividade térmica e a análise de eletro-osmose de risco.

A geologia dos dois locais é muito distinta. Araraquara está localizada no centro da bacia Paraná, acima de um enorme complexo aquífero, que resulta em um solo com resistividade muito baixa. Porto Velho está localizada na borda do Cráton Sul-Amazônico, com substrato cristalino raso e recoberto por solos jovens e não consolidados, o que resulta em um solo com alta resistividade.

O Edital exige que as medidas de mitigação dos efeitos de interferência em instalações metálicas devem ser tomadas dentro de um raio de 15 quilômetros ao redor de cada eletrodo. Em Araraquara, a ABB locou o eletrodo em um lugar seguro em relação ao gasoduto Bolívia-Brasil e suas extensões (alimentadores das cidades Ibatinga, Itápolis e Matão). Em Rondônia, devido à alta resistividade do solo, a ABB optou por local o eletrodo terra em local mais distante da estação conversora e da área urbana de Porto Velho. Neste local, as simulações indicam que não há risco de interferência na Subestação Conversora e na zona urbana de Porto Velho, embora as instalações elétricas próximas possam estar sujeitas a interferência ligeira ou moderada. Para os transformadores da rede de distribuição de energia (MRT - monofásico com retorno de terra), serão necessárias algumas medidas de mitigação para evitar a saturação dos enrolamentos primários.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistemas de transmissão em corrente contínua, Eletrodos de aterramento, aterramento, modelagem do solo.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Os eletrodos de aterramento têm a função de drenar para o solo a corrente contínua de desequilíbrio da operação do dipolo ou devido à operação monopolar. Entre os requisitos específicos dos eletrodos de aterramento do sistema HVDC do Complexo do Rio Madeira, destacam-se:

- A resistência de aterramento dos eletrodos deve ser igual a ou menor do que  $0,35 \Omega$ ;
- Os eletrodos de aterramento devem ser concebidos para funcionar em condições anódica ou catódica;
- A operação monopolar do bipolo será limitada a 220 horas/ano (2,5% do tempo de funcionamento);
- Quando em operação bipolar normal, os eletrodos deverão ser projetados para operar continuamente com desequilíbrio máximo de 40 A (cerca de 1,5% da corrente nominal do polo);
- O Transmissor deve tomar as medidas para mitigar os efeitos de interferência, corrosão em dutos e saturação de transformadores, devido à circulação de corrente contínua no solo em um raio de 15 km ao redor dos eletrodos;
- O projeto dos eletrodos deve considerar a seguinte condição crítica de operação monopolar: operação contínua com 2625 A e com sobrecarga de 3490 A por 30 minutos.

Devido ao fato do eletrodo de aterramento de um sistema HVDC ser uma instalação de grandes dimensões, a obtenção de um modelo de solo adequado para os cálculos de projeto e estudos de interferências, deve ser feita a partir de medições de resistividade por meio de diferentes técnicas que permitam a obtenção das características das camadas superficial, intermediária e profunda do solo. A estrutura do solo tem grande influência sobre o projeto do eletrodo HVDC porque afeta diretamente o cálculo da elevação do potencial de terra - GPR, o qual afeta o cálculo da elevação de temperatura do solo e a definição da área de interferência do eletrodo.

## 2.0 - INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICAS

Para os dois eletrodos, a primeira atividade foi a seleção da área com base nas medições magnetotelúricas. Em ambos os locais selecionados, foram feitas campanhas de sondagens elétricas verticais (SEV), utilizando o arranjo Schlumberger, com espaçamentos entre eletrodos de até 1000 m cujos resultados determinaram os modelos superficiais de solo. Para cada eletrodo, o modelo de solo obtido a partir da combinação dos modelos superficial e profundo, permitiu a concepção preliminar de projeto, geometria básica, e também a obtenção do perfil de potenciais na superfície do solo, para a determinação das áreas de interferência e para os cálculos de interferência.

Os poços perfurados permitiram a coleta de amostras de solo e água, para a determinação da sua composição, assim como a realização de diversas medições, tais como perfilagem eletromagnética do poço, profundidade do embasamento rochoso e parâmetros hidráulicos do solo: nível do lençol freático e vazão de água. O conhecimento do nível do lençol freático e da profundidade do embasamento é necessário para a determinação do comprimento dos subeletrodos, que devem ser restritos no topo ao nível do lençol freático e na base ao embasamento rochoso.

As amostras de solo foram usadas para os ensaios de eletrosmose e permeabilidade hidráulica no laboratório de geotecnia do COPPE e também para a medição de parâmetros térmicos do solo, feitos na Suécia. Parâmetros térmicos do solo são necessários para o cálculo da máxima elevação da temperatura do solo cuja temperatura não deve atingir a temperatura de ebulição da água para evitar ressecamento e risco de avalanche térmica do eletrodo.

Solos com conteúdo de argila podem dar origem ao fenômeno da eletrosmose, transporte de moléculas de água pela corrente elétrica, que pode resultar na secagem do solo, dependendo da polaridade da corrente. O conhecimento da permeabilidade do solo, fluxo da água subterrânea e níveis topográficos da área do eletrodo, permite o cálculo da pressão hidráulica natural na área e a verificação se ocorrerá a compensação natural do fenômeno da eletrosmose.

A perfilagem elétrica dos poços subterrâneos foi utilizada para a verificação do modelo de solo determinado a partir das sondagens elétricas verticais (SEVs). Esta verificação é importante para o projeto do eletrodo, pois constitui uma medição direta da resistividade do solo no qual os subeletrodos estarão imersos e permite inferir o conteúdo de argila nessa camada de solo.

Os dados dos levantamentos geológicos desenvolvidos nos terrenos de Araraquara e Porto Velho em 2011, assim como os modelos de solo obtidos, estão nos itens a seguir.

## 2.1 Araraquara

Neste site foram realizadas as seguintes investigações:

- Dez poços à percussão, com a coleta de amostras de solo para classificação (jan/2011);
- Sondagens elétricas verticais – SEVs, em 63 pontos distribuídos pela área do eletrodo (jan/2011);
- Três SEVs complementares com 1000 m de espaçamento (jul/2011), para definir a caracterização das camadas intermediárias do solo;
- Perfuração de dois poços de 3", com sonda rotativa, para classificação do solo, determinação da profundidade do embasamento rochoso e para coleta de amostras indeformadas Denison para análise de eletrose;
- Limpeza e bombeamento dos dois poços (ago/2011), para perfilagem elétrica, coleta de amostras de água para análise de condutividade e medições da dinâmica hidráulica: vazão e nível de regime permanente do lençol freático.

A combinação da curva de resistência aparente do solo, obtida a partir das medições de superfície pelo arranjo Schlumberger, com o modelo de solo profundo obtido com as medições magnetotelúricas, permitiu a obtenção do modelo de solo, ver Tabela 1, estratificado em seis camadas. Para as duas primeiras camadas foram considerados valores médios, uma vez que estas camadas tem espessura variável ao longo do perímetro do eletrodo: 2-8 m para o lençol freático e 10-38 m para o embasamento rochoso.

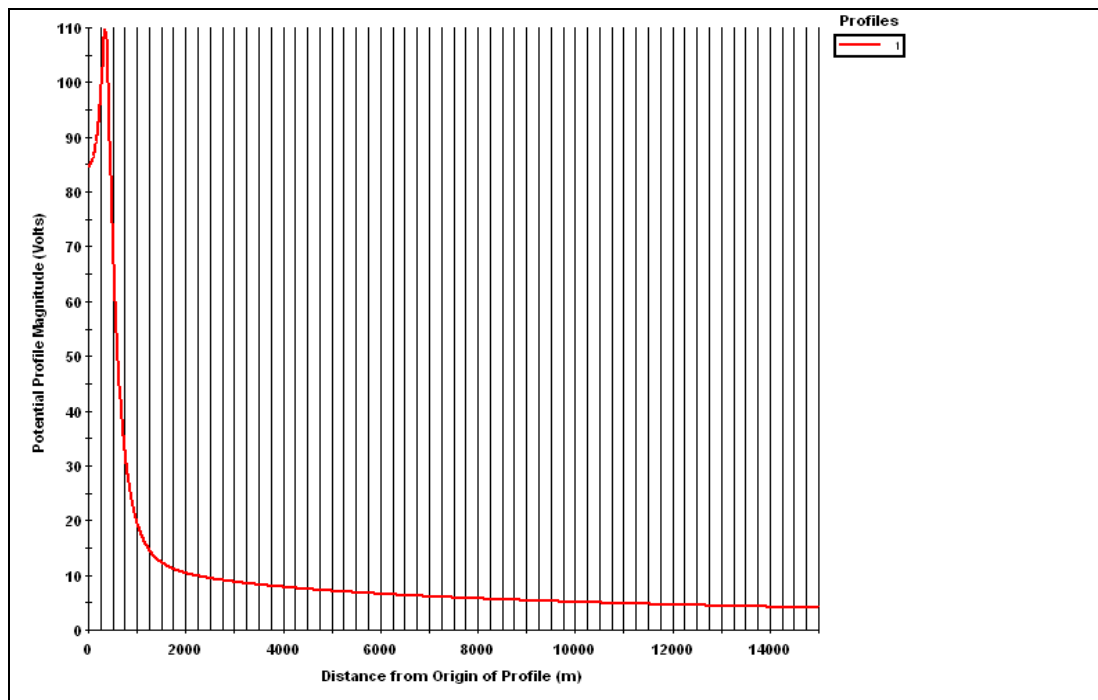


Figura 1 – Perfil de potenciais na superfície do solo em Araraquara com injeção de 3,5 kA no eletrodo de aterramento do Bipolo 1

Tabela 1 – Combinação dos modelos Schlumberger e Magnetotelúrico

Camada	Resistividade	Espessura	Profundidade
Solo superficial, acima do lençol freático – arenoso	1170 $\Omega$ m	4 m	4 m
Aquífero Bauru – arenoso	15 $\Omega$ m	25 m	29 m
Aquífero Serra Geral – camada superior – basalto	200 $\Omega$ m	90 m	119 m
Aquífero Serra Geral – camada inferior – basalto	45 $\Omega$ m	350 m	469 m
Aquífero Guarani – arenito	7 $\Omega$ m	1000 m	1469 m
Embasamento cristalino	175 $\Omega$ m	$\infty$	$\infty$

## 2.2 Porto Velho

A Figura 2 apresenta o mapa geológico de Porto Velho com os pontos onde foram feitas medições magnetotelúricas que resultaram nos três modelos de solo obtidos pela GeoVista e apresentados na Tabela 2. A região de Triunfo apresenta duas formações principais: a formação sedimentar Içá, amarelo no mapa geológico, e a suíte intrusiva Serra da Providência, marrom. Pesquisas realizadas na área selecionada para o eletrodo revelaram solo de composição variada, com camadas de areia, argila e silte não bem definidas por causa de variações laterais devido à sua origem deposicional, comum em ambientes lacustres, compatível com a formação Içá.

Considerando a conveniência de situar o eletrodo em área sedimentar, tão profunda quanto possível, foi escolhido o local **pov001** para a construção do eletrodo. A seleção deste local também considerou a ausência de afloramentos rochosos nas proximidades, bem como a natureza do solo, composta principalmente de arenito não muito coeso (o que acabou dificultando a perfuração para a caracterização do subsolo). Em áreas próximas, a cerca de 20 - 30 km da área selecionada existem afloramentos da suíte intrusiva Serra da Providência, compostos por rochas graníticas, que provavelmente formam o embasamento sob os sedimentos na área do eletrodo.

Neste local foram desenvolvidas as seguintes investigações:

- Três tomografias elétricas do solo, caminhamento elétrico, na direção N-S;
- Cinco sondagens elétricas verticais (SEVs);
- Quatro sondagens rasas manuais;
- Quatro poços de 3" perfurados com sonda rotativa, dois de 80 m e dois de 40 m, para identificação da profundidade do embasamento rochoso e coleta de amostras indeformadas Denison para análise de eletrose;
- Perfilagem elétrica dos poços.

Os poços perfurados até à profundidade de 90 m encontraram apenas sedimentos, não atingindo o embasamento rochoso. O modelo de solo obtido a partir das sondagens Schlumberger (SEVs) indica que o embasamento rochoso começa a 130 m de profundidade. Combinando a curva de resistividade aparente obtida a partir das medições de superfície pelo arranjo Schlumberger, com o modelo de solo profundo obtido com medidas magnetotelúricas, foi desenvolvido o seguinte modelo de solo, estratificado em quatro camadas:

- 1ª camada – solo acima do lençol freático – com 2555  $\Omega\text{m}$  e 55 m de espessura
- 2ª camada – solo abaixo do lençol freático – com 80  $\Omega\text{m}$  e 70 m de espessura
- 3ª camada – crosta superior – com 1600  $\Omega\text{m}$  e 15 km de espessura; e
- 4ª camada – crosta inferior e manto – 150  $\Omega\text{m}$  (infinito).

Tabela 2 – Modelos de solo obtidos pela Geovista.

Station	Soil above ground-water		Soil below ground-water		Basement, upper crust		Basement, lower crust 1		Basement, lower crust 2	
	Thick-ness (m)	Resist. ( $\Omega\text{m}$ )	Thick-ness (m)	Resist. ( $\Omega\text{m}$ )	Thick-ness (m)	Resist. ( $\Omega\text{m}$ )	Thick-ness (m)	Resist. ( $\Omega\text{m}$ )	Thick-ness (m)	Resist. ( $\Omega\text{m}$ )
pov001	20	1200	66	44	15000	1600	22000	90	$\infty$	150
pov006	21	700	120	30	8500	5930	7900	500	$\infty$	100
pov002, 003, 004	22	900	32	60	10000	12000	10000	1000	$\infty$	150

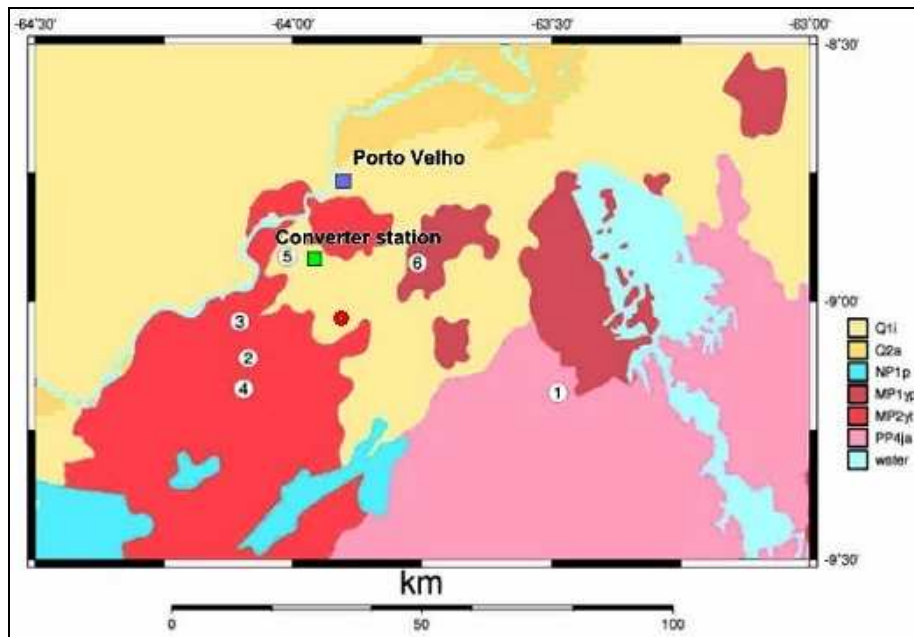


Figura 2 – Mapa geológico de Porto Velho, com a localização dos locais de medição magnetotelúricas.

### 3.0 - CÁLCULOS DE INTERFERÊNCIAS

Para os eletrodos do Bipolo I, em condição de operação monopolar com retorno pela terra e corrente de sobrecarga de 3,5 kA, foram estabelecidos os seguintes limites de interferência:

- 200 V para potencial de toque;
- 35 V para estruturas longas isoladas (cercas elétricas, dutos metálicos não enterrados etc.);
- 10 V para saturação de transformadores; e
- 4 V para corrosão de tubulações metálicas enterradas.

A aplicação direta do valor de 37,5 V como limite para o potencial de toque deve ser considerada apenas no caso de estruturas metálicas longas e isoladas, como as cercas elétricas e dutos de sistemas de irrigação móveis. No entanto, a maioria dos dutos utilizados em sistemas de irrigação é feito de material isolante. A exceção é o sistema de irrigação conhecido como "pivô central". Cercas convencionais, de fio de aço suportado por postes de madeira, não transferem a diferença absoluta de potencial do solo de uma extremidade para a outra, porque os moirões em paralelo apresentam uma resistência transversal que diminui significativamente o potencial transferido, e reduzem o potencial de toque.

Para a avaliação do potencial máximo transferido por uma cerca, foram consideradas três condições diferentes de resistência transversal dos moirões (incluindo a resistência interna da peça de madeira e a sua resistência de aterramento devido à parte enterrada):

- $R = 80 \Omega$  - Moirão de madeira molhada em solo de baixa resistividade (100  $\Omega.m$ );
- $R = 800 \Omega$  - Moirão de madeira molhada em solo de alta resistividade (1000  $\Omega.m$ );
- $R = 8000 \Omega$  - Moirão de madeira seca em solo de alta resistividade (1000  $\Omega.m$ ).

A segunda condição acima também pode representar cercas de madeira seca, com alta resistência interna, em solo de baixa resistividade, sendo uma condição intermediária. Para as três alternativas de resistividade do solo, ou de resistência transversal, foram também calculadas duas configurações adicionais, com quatro ou seis arames de aço. A hipótese de cercas com resistência do moirão igual a 800  $\Omega$ , incluindo tanto a resistência longitudinal como a sua resistência de aterramento, foi selecionada como a situação mais realista e, considerando este critério, as cercas não devem ser submetidas a diferença de potencial no solo superior a 200 V. A conclusão da pesquisa foi que, de modo a não transferir um potencial de toque potencial superior a 37,5 V, as cercas devem ser seccionadas em segmentos que sejam submetidos a um potencial máximo de 200 V na superfície do solo.

A maioria dos estudos estabelece 4 V como limite para corrosão de dutos enterrados metálico, conforme estabelecido nos itens 2.2 e 4.3 da ref. [3]:

- "A partir de diversos projetos HVDC tem-se a experiência de que somente os gasodutos muito bem revestidos são influenciados quando a tensão para o terra remoto está abaixo de 4 V. Na prática isso significa que, se instalações do porte de redes de energia elétrica, telecomunicações ou ferrovias têm o ponto de aterramento mais próximo do eletrodo com potencial inferior a 4 V, então não é de se esperar interferência"; e
- "Para serem totalmente imunes a interferências, dutos não devem estar localizados a menos de 50 km do eletrodo. Deve-se, no entanto, ter em mente que o critério de 4 V baseia na exposição permanente à corrente de terra".

A ref. [5] afirma: "A experiência de outros projetos têm mostrado que dificilmente quaisquer efeitos negativos devido a um eletrodo podem ser notados quando o potencial cai abaixo de 4 V, nem mesmo para instalações sensíveis, como dutos. Instalações menos sensíveis provavelmente podem lidar com potenciais mais elevados, por exemplo, até cerca de 10 V para postos de transformação e, correspondentemente, para campos elétricos mais fortes."

### 3.1 Araraquara

A Figura 3 apresenta as equipotenciais de 4 V e 10 V em torno do eletrodo de Araraquara. As equipotenciais na superfície do solo até 20 V têm um padrão assimétrico, devido às variações na espessura da cobertura de areia da Formação Bauru, sobre os basaltos da Formação Serra Geral.

Não foi necessário nenhum seccionamento de cerca em torno do eletrodo Araraquara, uma vez que o potencial máximo na superfície do solo não atinge 200 V. Dentro do raio de 2,1 km não existe nenhum transformador que possa sofrer saturação, uma vez que todos têm enrolamento primário com as três fases ligadas em delta, e que os circuitos secundários são curtos, não sendo, portanto, submetidos a gradientes significativos de potenciais na superfície do solo. Não é esperada nenhuma perda significativa de massa de estruturas metálicas enterradas, devido ao período máximo projetado de 220 horas/ano de operação monopolar. Não existem dutos metálicos enterrados dentro da área definida pela equipotencial de 4 V, em um raio de 13 km em torno do eletrodo.

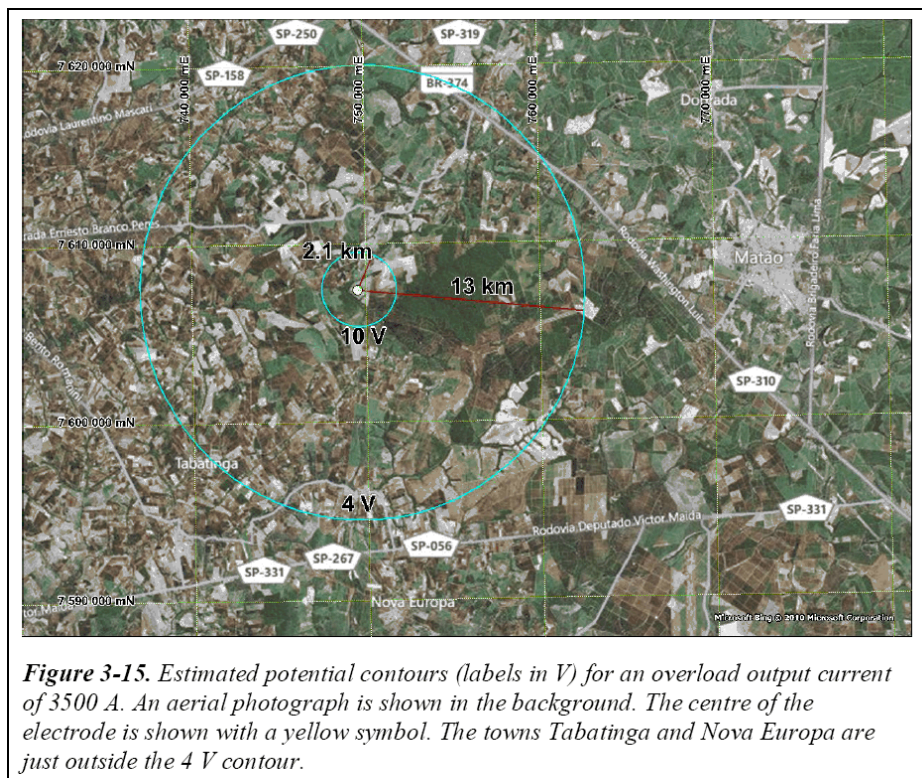


Figura 3 – Curvas equipotenciais de 4 V e 10 V no entorno do eletrodo de Araraquara, resultantes da injeção de 3,5 kA de corrente contínua

### 3.2 Porto Velho

A Figura 4.a apresenta as equipotenciais de 4 V, 35 V e 10 V ao redor do eletrodo de Porto Velho. A Figura 4.b apresenta as quatro linhas de seccionamento de cercas. Os cálculos de saturação dos transformadores são apenas estimativos, considerando a complexa topologia da rede de distribuição na região no entorno do eletrodo e as incertezas quanto aos seus parâmetros elétricos. Para os transformadores monofásicos supridos pelas linhas de distribuição monofásicas com retorno pela terra – MRT, cálculos preliminares indicam que:

- Não é esperado qualquer risco associado à circulação de corrente contínua nos enrolamentos secundários dos transformadores MRT, devido ao fato dos circuitos secundários de baixa tensão serem curtos;
- O núcleo do enrolamento primário pode saturar, especialmente no caso de transformadores MRT localizados dentro do raio de 15 km em torno do eletrodo, onde os gradientes de potenciais no solo serão mais elevados;
- Não é esperada saturação dos transformadores de potência da planta Triunfo, porém, pode ocorrer saturação dos transformadores na subestação Itapuã.

Os níveis calculados de corrente contínua circulando nos enrolamentos dos transformadores de 500 kV, ver Tabela 4, revelam que, se o eletrodo tivesse sido construído no ponto MT-6, a 21 km da subestação conversora, ocorreria saturação durante a operação monopolar do Bipolo I com retorno pela terra. Além do risco de saturação do transformador conversor, um eletrodo nesta localização com a mesma geometria do construído no local MT-1, apresentaria uma resistência de 0,61  $\Omega$ , quase o dobro do máximo especificado pelo Edital Aneel.

As medições magnetotélúricas mostraram que o embasamento rochoso vai ficando mais raso e com maior resistividade à medida se aproxima do leito do rio Madeira (ver ref. [6]). A consequência desta característica geológica reflete-se no aumento da resistência do eletrodo de aterramento e da sua área de interferência, à medida que o mesmo é aproximado do rio. Fica, portanto, justificada e demonstrada a escolha de um local distante para a construção do eletrodo, na direção sudeste em relação à Subestação Conversora e ao leito do rio Madeira.

Tabela 3 – Distâncias para instalações de 500 kV e potenciais no solo para os locais MT-1 e MT-6

Subestações 500 kV	Local MT-1		Local MT-6	
	D (km)	Pot. (V)	D (km)	Pot. (V)
SE Coletora	56	1,7	21	33
UHE Sto. Antônio	63	1,4	24	22
UHE Jirau	134	0,5	115	0,5

Tabela 4 – Valores máximos calculados e admissíveis de corrente contínua nos enrolamentos dos transformadores de 500 kV

	Santo Antônio	Jirau	Back to Back	Bipole 1
Rmin/fase ( $\Omega$ )	1,0180 $\Omega$	1,0180 $\Omega$	0,4720 $\Omega$	0,1100 $\Omega$
Max I <sub>DC</sub> bias (A)	0,3455 A	0,3455 A	0,4630 A	3,7240 A
Site 1 (pov-001)	0,0075 A	0,0332 A	0,0188 A	0,0805 A
Site 2 (pov-006)	0,0936 A	0,8557 A	0,555 A	2,37 A

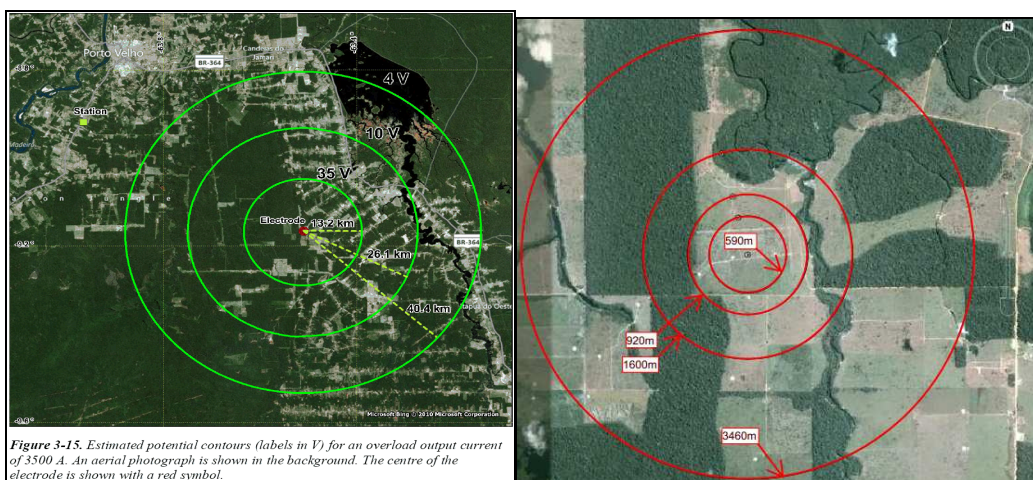


Figura 4 – Curvas equipotenciais de 35 V, 10 V e 4 V, no entorno do eletrodo de Porto Velho com a injeção de 3,5 kA de corrente contínua, e linhas de seccionamento de cercas ( $\Delta V \leq 200$ ).

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Pode-se concluir que os locais selecionados para ambos os eletrodos resultaram no atendimento de todos os requisitos estabelecidos pelo edital:

- Os valores de projeto de resistência dos eletrodos encontram-se abaixo do limite máximo de 0,35  $\Omega$ ;
- Não existe o risco de saturação dos transformadores nas subestações conversoras de 500 kV, especialmente em Porto Velho, e para outros transformadores importantes nas subestações e nas usinas geradoras da região;
- Não há risco de corrosão de tubulações enterradas e de saturação de transformadores de distribuição nos centros urbanos próximos aos eletrodos, especialmente em Porto Velho e municípios vizinhos.

O relatório EPRI [1] estabelece no início do item 7: "Como já descrito anteriormente, só se justifica estudar a viabilidade de um determinado local, se o campo distante foi ou deverá ser aceito por autoridades ambientais, proprietários de infraestrutura metálica etc." Para a obtenção de um bom modelo de solo, compatível com os cálculos de campos distantes, são necessárias investigações de resistividade das camadas profundas do solo.

A Referência [4], que trata da seleção do local de construção um eletrodo HVDC na Índia, confirma esta abordagem no Resumo - "Técnicas de mapeamento de alta resolução com a utilização de multi-eletrodos DC foram aplicadas para medições de resistividade de camadas superficiais do solo rasas e o método magnetotélúrico foi utilizado para a determinação das resistividades de camadas profundas, de 5 a 10 km. Com base nestes resultados, os locais adequados para os eletrodos de aterramento foram identificados."

Esta mesma referência diz sobre o primeiro local investigado: "Site-1 (NER): A área é quase plana e parecia ter uma cobertura de solo de boa espessura. Um total de 13 sondagens MT e três perfis de resistividade DC foram feitos neste site. Como a estrutura de resistividade profunda encontrada não foi considerada adequada, uma investigação mais detalhada da resistividade das primeiras camadas deste site não foi realizada." Isso significa que se as camadas profundas, de 5 a 10 km, não mostram resistividades baixas, não vale a pena investigar as camadas superficiais e aquele local deve ser descartado.

A literatura técnica relata ainda: "O histórico de falhas em outros projetos HVDC deve ser levado em conta. Dois projetos de eletrodos verticais sofreram danos - CU, em Minnesota e Dakota do Norte (EUA), e Cabora Bassa, na África. Eletrosmose foi atribuída como a causa da falha no projeto CU. Sobreaquecimento foi a causa da falha em Cabora Bassa. A experiência indica que, na maioria dos casos, um eletrodo severamente superaquecido não pode ser satisfatoriamente reparado."

O perfil de tensão calculado foi utilizado para a determinação dos níveis de interferência que ocorrem na área de interferência do eletrodo, e para a especificação das medidas de controle a serem tomadas nos sistemas interferidos. As medições a serem feitas quando da etapa de comissionamento dos eletrodos, irão revelar a verdadeira natureza dos perfis de tensão, e subsidiarão o dimensionamento das correções que eventualmente se fizerem necessárias, para o controle de interferências.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Epr EL-2020, HVDC Ground Electrode Design;
- (2) Cigré Working Group 14.21 – TF2 General Guidelines for the Design of Ground Electrodes for HVDC Links;
- (3) 488140-1 - Corrosion Impact Survey – Rio Madeira – Progress report 1 - Swerea/KIMAB;
- (4) Selection of Ground Electrode Sites using Geophysical Techniques for Resistivity Measurements for First  $\pm 800$  kV HVDC System in India - CIGRE 2008 (B4-105) - R N Nayak, R P Sasmal and Rajesh Suri (Power Grid Corporation of India Ltd.) and Dr. Ajay Manglik, Dr. S.K.Verma and Dr. D. Muralidharan (National Geophysical Research Institute);
- (5) GRV-10001 – "Compilation of geophysical data and modelling of electrode potentials, Porto Velho and Araraquara, Brazil", Hans Thunehed, GeoVista, 18 Jan 2010;
- (6) Curvas de Potencial dos Eletrodos de Aterramento do Sistema CCAT de Itaipu – Resultado das Medições no Comissionamento do Bipolo II – , D. Kovarsky, P. E. F. Freire and L. J. Pinto (GAP – Monasa/Themag/Ptel) and C. E. Caroli and N. Santos (Furnas Centrais Elétricas) – X SNPTEE, Curitiba, outubro de 1989;
- (7) Estudo do Sistema de Aterramento da UHE de Santo Antônio – Paulo Edmundo Freire e Vera Lúcia Gribel, XXII SNPTEE, out/2013.



## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Paulo Edmundo da Fonseca Freire** ([paulofreire@paiolengenharia.com.br](mailto:paulofreire@paiolengenharia.com.br)), Diretor da ELETRO-ESTUDOS Engenharia Elétrica Ltda. (PAIOL Engenharia - 19 3844-4488). Engenheiro Eletricista (1978) e Mestre em Sistemas de Potência (1984) pela PUC-RJ. Curso "Grounding & Eletromagnetic Fields" na Safe Engineering Services & technologies Ltd. (1994, Montreal, Canadá). Mais de 30 anos de experiência em estudos e projetos de sistemas de aterramento e de proteção contra descargas atmosféricas para redes de energia (SEs, LTs, Usinas Hidroelétricas, Termelétricas e Eólicas, Sistemas HVDC) e instalações comerciais, industriais e de transportes (metrô, monotrilho e ferrovia). Ex-professor da Universidade Gama Filho (RJ), instrutor/palestrante de cursos e eventos sobre os temas aterramento e proteção contra descargas atmosféricas e autor de inúmeros trabalhos apresentados em congressos e seminários. Serviços prestados no Brasil, Angola, e Chile.



**Sören Nyberg** nasceu em 1955, em Smedjebacken, Suécia. Começou a trabalhar na ASEA em 1975, hoje ABB. Graduou-se em engenharia em 2000 e concluiu mestrado em 2006. Atualmente é Engenheiro Especialista em Coordenação de Isolamento e Projeto de Eletrodos na ABB Ludvika. É também membro do IEC e Cigré.



**Geraldo Luiz Costa Nicola**, nasceu em 1951, São Paulo-SP (Brasil). Graduou-se em 1977 em Engenharia Elétrica, pela Universidade de Brasília, UnB, e atua na Eletrobras Eletronorte desde 1977, na área de expansão da transmissão, projeto de subestações, equipamentos, compensação de reativos e avaliação de implantação de novos empreendimentos em corrente alternada e HVDC 600 e 800 kV.



**Patrícia de Oliveira Freitas Borin**, nasceu em 1983, Brasília-DF (Brasil). Formada em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília, em julho de 2005. Atuou na empresa Engevix Engenharia de 2005 a 2007, onde esteve envolvida com projetos de usinas hidrelétricas e na empresa Themag Engenharia de 2007 a 2008, onde esteve envolvida com projetos de subestações de transmissão. Desde 2008 trabalha na Eletrobras Eletronorte, na área de expansão da transmissão, em sistemas de transmissão CA, equipamentos de alta tensão, compensação de reativos e transmissão em corrente contínua.



**João Neves Teixeira Filho** nasceu em 1959 em Floriano, Piauí (Brasil). Graduou-se em 1984 em Engenharia Elétrica, modalidade Eletrônica, pelo Instituto de Tecnologia de Governador Valadares, Minas Gerais, e concluiu Mestrado em Economia da Regulação e Defesa da Concorrência pela Universidade de Brasília em 2002. Tem especialização em Matemática (UniCEUB, Brasília 1987), Redes (computação) (PUC, Brasília 1998) e Análise Econômica do Setor Elétrico – Integração Energética da América Latina (UFRJ, Rio de Janeiro 2010). Atuou na área de inspeção em fábrica para equipamentos de subestações; planejamento energético e por sete anos esteve à frente da superintendência de planejamento da expansão, todos na Eletronorte, onde trabalha desde 1986. Atualmente é Diretor Técnico da Estação Transmissora de Energia, empresa estatal do Grupo Eletrobras Eletronorte.



**Marcus Danilo Perfeito** nasceu em 1962 em Morrinhos, Goiás (Brasil). Graduou-se em 1984 em Engenharia Elétrica, modalidade Eletricista, pela Universidade de Brasília, Brasília, e concluiu pós-graduação em Engenharia de Sistemas Elétricos pela Universidade de Itajubá, Minas Gerais, em 1993. Atuou na área de estudos e projeto de sistemas de proteção e controle de subestações. Atualmente Coordenador da Engenharia de Proprietário da Estação Transmissora de Energia, empresa do Grupo Eletrobras Eletronorte.