



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GSE/27
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – VIII

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

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO HVDC DO RIO MADEIRA– BIPOLO 1
COMISSIONAMENTO DO ELETRODO DE ARARAQUARA – AJUSTE DO VALOR DA RESISTÊNCIA DO
ELETRODO E DO MODELO DE ESTRUTURA RESISTIVA DA CROSTA LOCAL**

**Paulo Edmundo da F. Freire (*)
Paiol Engenharia**

**João Neves de Teixeira Filho
Geraldo Luiz Costa Nicola
Patrícia de Oliveira Freitas
Eletrobras Eletronorte**

**Marcus Danilo Perfeito
Consórcio Themag / Arcadis Logos**

**Soren Nyberg
ABB Suécia**

**Sueli Yoshinaga Pereira
Unicamp**

RESUMO

Este trabalho apresenta os cálculos iterativos conduzidos para o ajuste simultâneo do valor de resistência de aterramento do eletrodo de Araraquara, Bipolo 1, assim como do modelo de estrutura resistiva da crosta local, por meio da correção do desvio estático presente na curva de resistividades aparentes, medida pela técnica magnetotelúrica. O modelo final obtido foi confirmado pelo excelente ajuste obtido entre os valores calculado e medido de potencial duto-solo no Gasbol, o gasoduto Bolívia-Brasil que passa a 26 km do eletrodo. O trabalho foi desenvolvido com base nas sondagens geofísicas realizadas na fase de seleção do local de construção do eletrodo, complementado nos dados levantados nos testes de comissionamento do eletrodo, a saber, resistência de aterramento do eletrodo, potenciais na superfície do solo e potenciais duto-solo.

KEY WORDS

Sistema de Transmissão HVDC, eletrodo de aterramento, comissionamento, modelagem da crosta, geofísica.

1 INTRODUÇÃO

O eletrodo de aterramento do Bipolo 1 de Araraquara é constituído por 160 subeletrodos verticais, em poços de 35 cm de diâmetro com comprimento de 20 m a 40 m, ocupando uma área de perímetro aproximadamente retangular (550 x 900 m). O eletrodo encontra-se a 34 km da Estação Conversora de Araraquara, e a 26 km de distância do gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol), operado pela TBG. As extremidades dos ramais do Gasbol, que suprem as cidades de Matão e Itápolis (operados pela GasBrasiliano) estão ainda mais próximas, a apenas 20 km do eletrodo. Para o projeto deste eletrodo foi construído um modelo de estrutura resistiva da crosta local, elaborado a partir da composição de sondagens geofísicas rasas (pela técnica de eletroresistividade - ER) e profundas (magnetotelúricas - MT). Este modelo foi utilizado para o cálculo do valor de projeto da resistência de aterramento do eletrodo e para os estudos prévios de interferências.

Os testes de comissionamento do eletrodo incluíram a medição da sua resistência, o que foi feito pela técnica da queda e tensão, com o auxílio de um eletrodo auxiliar remoto enterrado a 11 km de distância, ao longo do trajeto da linha do eletrodo. A resistência medida (0.052 Ω) foi superior ao valor de projeto calculado (0.037 Ω) e, ainda assim, foi necessário um aumento complementar do valor medido, uma vez que o eletrodo auxiliar utilizado na medição não podia ser considerado um efetivo "terra remoto". O valor mais baixo calculado para a resistência do eletrodo pode ser atribuído a um modelo de resistividade da crosta distorcido pelo "desvio estático". Este desvio é característico de medições geofísicas que incluem a medição de potenciais no solo, tais como as técnicas de eletroresistividade e magnetotelúrica. O desvio estático ocorre devido à existência de não-homogeneidades locais e rasas nas estações de medição geofísica, com dimensão bem menor do que a profundidade prospectada pelo método, e que dão origem à acumulação de cargas elétricas nas interfaces destas heterogeneidades com o meio predominante, resultando em campos elétricos localizados que são somados aos campos associados às camadas mais profundas da crosta local.

A literatura técnica em Geofísica apresenta uma ampla gama de *papers* relativos à Estrutura Geoeétrica Crustal, também conhecida como Assinatura Geoeétrica da Crosta. Geralmente, estes modelos são baseados em sondagens magnetotélúricas profundas, não sendo usual a construção de modelos geoeétricos completos da crosta, que incluam desde a camada superficial do solo até as camadas da crosta mais profundas. Para a aplicação no projeto de um eletrodo HVDC, é necessário um modelo 1D, que seja localmente representativo e detalhado para as camadas superficiais em um raio de 1 km em torno do centro do eletrodo (volume de subsuperfície em que o eletrodo estará enterrado), e regionalmente representativo para as camadas profundas para um raio de algumas dezenas de km em torno do eletrodo.

Os modelos obtidos a partir de estações de sondagem magnetotélúricas dão informações desde a superfície do solo até muitos quilômetros de profundidade, não fornecendo, porém, informações detalhadas e precisas sobre as camadas mais rasas. O modelo completo precisa, então, ser construído a partir da combinação de três modelos complementares entre si – um raso, prospectado pelo método da eletroresistividade (ER), um “*near-surface*”, obtido a partir de medições TEM (*Transient Electromagnetic*) ou AMT (áudio magnetotélúrico), e um profundo, adquirido por meio de sondagens magnetotélúricas (MT).

A penetração dos campos elétricos e magnéticos na crosta da Terra tem característica de propagação difusa, regida por equações de difusão, associadas a campos que apresentam atenuação exponencial com a profundidade. As técnicas geofísicas acima mencionadas são volumétricas, e apesar de sua baixa resolução, são bastante adequadas para a modelagem de grandes volumes de rochas de subsuperfície.

Para o processamento das sondagens geofísicas foram utilizados os programas IPI2win-IP e IPI2win-MT, desenvolvidos na Universidade de Moscou (<http://geophys.geol.msu.ru/>). Para a simulação dos eletrodos de aterramento foi utilizado o programa AutoGrid, do pacote MultiGroundZ, desenvolvido pela empresa canadense SES - Safe Engineering Services & Technologies Ltd (www.sestech.com).

2 SONDAÇÕES GEOFÍSICAS REALIZADAS NO LOCAL DO ELETRODO 1

A campanha geofísica para a seleção do local de construção do eletrodo foi conduzida pela ABB em 2010, e incluiu sondagens geoeétricas em seis estações pré-selecionadas. Estas estações estão localizadas ao longo da Formação Adamantina (Grupo Bauru), que consiste em arenitos eólicos datados do Cretáceo que repousam sobre os derrames basálticos da Formação Serra Geral (Grupo São Bento). Nas estações Arq001 a Arq006 foram feitas sondagens MT pelo INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Para o local escolhido do eletrodo, próximo à estação Arq005, foram realizadas sondagens elétricas complementares, por eletroresistividade e também pela perfuração de poços (2011), para apoio ao projeto do eletrodo.

A Figura 1 apresenta o mapa da área prospectada em Araraquara, com a localização das estações MT, dos Eletrodos 1 e 2 e da Subestação Conversora. As linhas lilás e azul indicam os gasodutos que atendem as cidades da região, onde foram feitas medições de potenciais duto-solo, quando do comissionamento do Eletrodo 1.

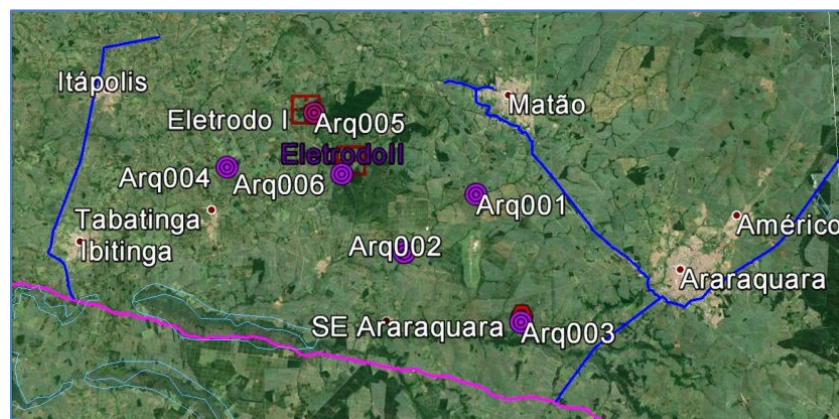


Figura 1: mapa da área de interesse, com a identificação das principais cidades, da Estação Conversora e dos dois eletrodos de aterramento (dos Bipolos 1 e 2), do gasoduto Gasbol (lilás) e dos seus ramais de distribuição (azuis), e das estações onde foram feitas as sondagens magnetotélúricas (Arq001 a Arq006).

2.1 Campanha de Sondagens Magnetotelúricas (MT)

A sondagem MT consiste na medição de campos elétricos e magnéticos naturais, na superfície do solo e em dois eixos ortogonais XY e YX. A Figura 2 apresenta as duas curvas de resistividade aparente medidas pelo INPE na estação Arq005, cerca de 1 km ao norte do Eletrodo 1. A curva XY tem como referência o campo elétrico medido na direção EO (magnético), e a curva YX tem como referência o campo elétrico medido na direção NS (magnético). Pode-se observar que não são significativas as diferenças de estrutura resistiva nas duas direções, o que significa dizer que as curvas apresentam baixa anisotropia. A curva verde é a média geométrica das curvas XY e YX, representando, portanto, um modelo 1D (camadas horizontais paralelas).

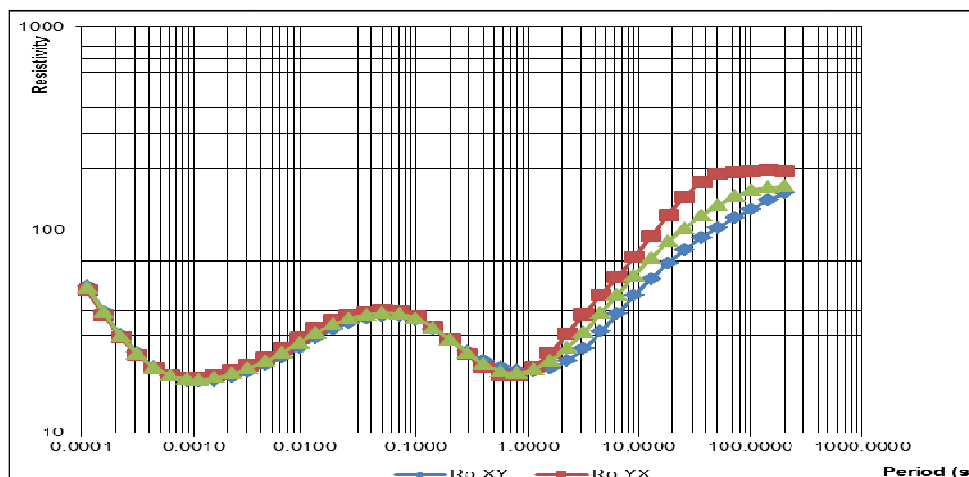


Figura 2: curvas de resistividade aparente medidas nos eixos XY e YX e média geométrica (verde) na estação Arq005.

2.2 Campanha de Sondagens de Eletroresistividade (ER)

As medições ER são também conhecidas como sondagens elétricas verticais (SEV). Foram feitas 63 sondagens Schlumberger com separações de eletrodos de corrente (AB) de até 100 m, em torno do perímetro da área de eletrodo, e mais três alinhamentos adicionais na parte central do terreno, com separação até 1000m.

Para cada espaçamento de medição foi feita a média geométrica dos valores de resistividade aparente. A inversão da curva média de resistividades aparentes com o programa IPI2Win-IP, resultou em um modelo estratificado em cinco camadas (Figura 3). Considerando-se que os desvios estáticos que afetam as medições ER apresentam distribuição Gaussiana, esta ampla amostragem significa que a curva média de resistividades aparentes é estatisticamente válida (> 20 amostras) e livre de desvio estático.

A Tabela 1 apresenta a coluna geoeletrica rasa com a sua interpretação geológica, revelando uma fina camada de solo superficial seco e de resistividade média. A segunda camada, de alta resistividade (quase 2000 Ω m) e com cerca de 2m de espessura, está provavelmente associada a um subsolo arenoso bem drenado. A terceira camada é composta pelos arenitos da Formação Bauru abaixo do freático, portanto saturados de água. A quarta camada, também saturada de água e boa condutora, é uma média dos arenitos das camadas inferiores da formação Bauru e dos basaltos alterados do topo da Formação Serra Geral.

O último segmento da curva de resistividades aparentes, com espaçamento de 100m a 500m, apresenta tendência ascendente. A resistividade desta última camada não é bem determinada, por ser baseada em apenas três SEV de longo espaçamento, sendo os últimos dois pontos ($AB/2 = 400$ e 500 m) definidos por uma única sondagem. O valor da resistividade dos basaltos Serra Geral, com cerca de 200 m de espessura em Araraquara (conforme estabelecido na literatura técnica), será mais bem definido pela combinação das curvas SEV e MT.

Os modelos geoeletricos das duas camadas de baixa resistividade são possivelmente afetados pelo chamado princípio de equivalência, sendo a relação espessura/resistividade a característica mais bem resolvida pela sondagem nestas camadas, o que significa que elas podem ser substituídas por camadas mais finas de mais baixa resistividade, sem impacto significativo na forma da curva de resistividades aparentes.

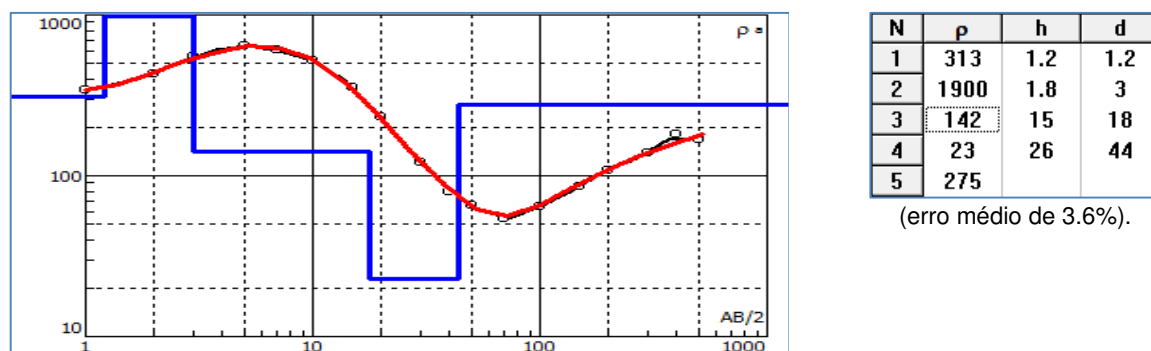


Figura 3: curva média de resistividades aparentes (vermelha) e modelo de resistividade estratificado em cinco camadas (azul e tabela).

Tabela 1: interpretação geológica da coluna geoeletrica rasa para o Eletrodo 1.

Camada	Características da camada	Resistividade (Ωm)	Espessura (m)	Profundidade (m)
Solo superficial	Solo com alterações lateríticas (arenoso-argiloso de origem aluvionar) e matéria orgânica	313	1.2	1.2
Subsolo	Solo arenoso e seco acima do freático	1900	1.8	3
Formação Bauru	Arenito duro abaixo do freático	142	15	18
Transição entre as Fm. Bauru e Serra Geral	Arenito e basalto alterado abaixo do freático	23	26	44
Fm. Serra Geral	Basalto fissurado com água (aquífero)	275	∞	∞

3 RESISTÊNCIA CALCULADA PARA O ELETRODO 1

A combinação das colunas geoeletricas ER + MT, permitiu a construção do modelo geoeletrico 1D, estratificado em seis camadas, conforme apresentado na Tabela 2. Para as duas primeiras camadas estabeleceram-se os valores médios, uma vez que as espessuras destas camadas, determinadas tanto por sondagens em superfície como por poços perfilados, variam ao longo do perímetro eletrodo (2 a 8m acima do freático e 10 a 38m abaixo do freático).

A simulação da configuração do eletrodo de aterramento Araraquara com este modelo de resistividade (com o programa AutoGrid), resultou na resistência de 0,037 Ω .

Tabela 2: modelo de resistividade 1D, resultante da combinação dos modelos geoeletricos ER + MT.

Camada	Resistividade (Ωm)	Espessura (m)	Profundidade (m)
Solo arenoso superficial – acima do freático	1170 Ωm	4m	4m
Aquífero Bauru – arenito	15 Ωm	25m	29m
Aquífero Serra Geral - basalto	200 Ωm	90m	119m
Topo do Grupo São Bento - Formações Serra Geral + Botucatu – basalto + arenito	45 Ωm	350m	469m
Grupo São Bento - Formações Serra Geral + Botucatu + Pirambóia	7 Ωm	1000m	1469m
Grupos Passa Dois e Tubarão	175 Ωm	∞	∞

4 MEDIÇÕES E COMISSONAMENTO DO ELETRODO 1

Dentre os testes de comissionamento realizados para o eletrodo do Bipolo 1 de Araraquara, três foram utilizados neste trabalho (os dois primeiros emitidos pela ABB para a Eletronorte):

- Medição da resistência de aterramento do eletrodo - [ABB, Technical Report 1JNL100174-182, 27/03/2013];
- Medição de potenciais na superfície do solo - [ABB, Test Report - Low Power P2 - Ground Return, 23/11/2013]; e
- Potenciais no Gasbol – desenvolvido pela Eletronorte com o apoio da TBG, operadora do gasoduto Bolívia-Brasil.

As medições de resistência de aterramento foram feitas pela técnica da queda de tensão, com uma máquina de solda CC e um eletrodo auxiliar enterrado a 11 km de distância, ao longo do trajeto da linha do eletrodo. A Figura 4.a apresenta a curva de resistência para o eletrodo, referenciada para a corrente nominal de 2625 A. O valor medido de resistência do eletrodo foi de 0,052 Ω , a uma distância de 1,8 km do seu centro. A inversão da curva no seu início é devido a medições feitas na área interna do eletrodo.

As medições de potenciais na superfície do solo foram feitas durante um teste de operação monopolar, com retorno pela terra, com uma corrente de 406 A. Durante este teste foram medidas diferenças de potenciais na superfície do solo, desde o centro do eletrodo até uma distância de 942 m, ao longo de uma direção radial que passa pela quina NO do eletrodo. A Figura 4.b apresenta o perfil de potenciais na superfície do solo, referido à corrente nominal de 2625 A e verticalmente ajustado para coincidir com o potencial de 52 V a uma distância de 800 m (direção da quina do eletrodo), tal como determinado pela curva de potenciais na superfície do solo para o modelo final do Eletrodo 1.

A medição dos potenciais no gasoduto Gasbol resultou em um potencial duto-solo de 2.9V no ponto mais próximo do duto, a 26 km de Eletrodo 1 (para uma injeção de corrente nominal de 2625 A).

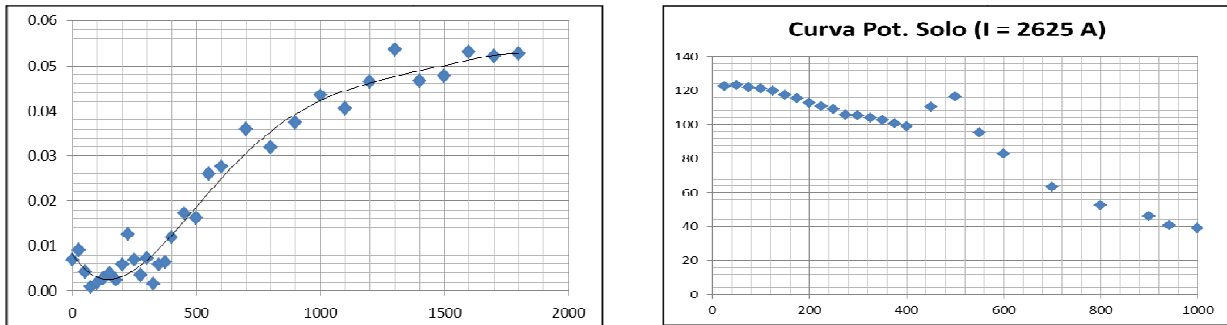


Figura 4: curvas de resistência (Ω) e potenciais na superfície do solo (V) x distância (m) desde o centro do eletrodo.

5 AJUSTE DO MODELO DE RESISTIVIDADE DA CROSTA

Com base na resistência medida para o Eletrodo 1, de 0,052 Ω , foi feito o ajuste da curva de resistividades aparentes da Bacia do Paraná no local de construção do Eletrodo 1.

5.1 Ajuste da Resistência do Eletrodo

Considerando-se que a 1,8 km de distância do centro do eletrodo, o terra remoto ainda não foi alcançado, é necessário ajustar o valor da resistência medida, a fim de incluir a parcela da resistência de terra desde 1,8 km até o terra remoto. Para este ajuste foi desenvolvido um processo iterativo, de acordo com as seguintes etapas:

- 1) ajustar o modelo geoeletrico da crosta no local do eletrodo, corrigindo o desvio estático da curva MT;
- 2) calcular a resistência do eletrodo e o potencial no solo a 1,8 km do eletrodo, simulando a injeção da corrente nominal no mesmo (com o software AutoGrid);
- 3) dividir o valor potencial no solo a 1,8 km do centro do eletrodo pela corrente injetada, para o cálculo da contribuição para a resistência do eletrodo deste ponto até o terra remoto;
- 4) adicionar esta resistência calculada ao valor medido (0,052 Ω) para obter o verdadeiro valor da resistência para o terra remoto;
- 5) comparar os valores de resistências calculado pela simulação (passo 2) e ajustado (passo 4) - se eles igualarem o processo de ajuste está concluído, caso contrário, deve-se reiniciar o processo, para uma nova iteração, até que o ajuste seja obtido.

Para o potencial no solo de 21 V a 1,8 km, pode-se calcular o seguinte valor da resistência residual a ser adicionado à resistência medida: $V_r = V(1,8 \text{ km}) / A = 21/2625 = 0,008 \text{ } \Omega$.

Pode-se, portanto, considerar que o verdadeiro valor da resistência do eletrodo é $R = 0,052 + 0,008 = 0,06 \text{ } \Omega$.

5.2 Ajuste do Modelo de Resistividade da Crosta

A Figura 5 apresenta a curva de resistividades aparentes combinada dos dois métodos de sondagem - ER (vermelho) e MT (azul), após a transformação do eixo horizontal da curva ER de espaçamento (m) para período (s). A curva ER + MT (verde) é o resultado da composição das duas curvas medidas após a conversão da escala horizontal, considerando que o ajuste deve atender aos seguintes critérios:

- foi descartada a cauda da curva de ER (períodos > 0,0001s), a partir do ponto de sobreposição com a curva MT;
- foi feito o deslocamento para cima da curva MT (por um fator de 2,4), que é o ajuste necessário para que a simulação resulte na resistência final do eletrodo, de 0,06 Ω ; e
- a inversão da curva de resistividade aparente é feita com a restrição de minimização do número de camadas.

O descarte da cauda da curva ER justifica-se pelo fato de a mesma é resultante de apenas três sondagens com espaçamento superior a 100 m, o que não é uma amostragem estatística válida. Além disso, para este espaçamento, a corrente injetada pelo equipamento de medição não é suficiente para proporcionar uma boa precisão na leitura de resistência.

O ajuste do "desvio estático" pode ser feito tanto na curva ER como na MT, ou em ambas as curvas. Como a curva de ER foi calculada a partir da média geométrica de várias sondagens Schlumberger (66), considerou-se a premissa de que houve a compensação dos desvios estáticos das várias medições, e que o desvio estático residual não é significativo. Esta suposição é razoável se considerarmos que os desvios estáticos apresentam uma distribuição normal e que o número de sondagens é suficiente em termos de amostragem estatística (> 20). Por conseguinte, todo o ajuste do "desvio estático" foi feito apenas na curva de resistividades aparentes MT, que foi deslocada verticalmente por um fator de 2,4, a fim de resultar em um modelo de resistividade compatível com a resistência ajustada para o Eletrodo 1.

A transição entre as curvas ER e MT é o resultado de um mero ajuste gráfico, e a minimização do número de camadas evita o aparecimento de camadas não existentes, que podem ser atribuídas a processos numéricos, não sendo representativas da geologia local.

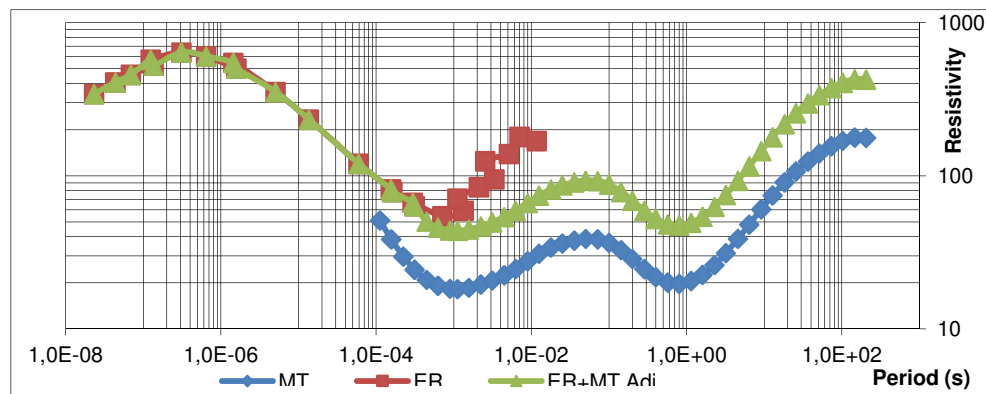


Figura 5: curvas de resistividades aparentes - ER (vermelha) e MT (azul), e curva ajustada ER+MT (verde).

A Figura 6 apresenta a curva combinada de resistividades aparentes (linha vermelha) e sua inversão 1D (linha azul), que resultou no modelo geoeletrico com sete camadas, cuja interpretação geológica está na Tabela 3. O erro associado ao modelo calculado (azul), quando comparado à curva pré-inversão (vermelha), é inferior a 5%.

Os parâmetros das camadas superiores são provenientes das sondagens elétricas e os parâmetros das camadas mais profundas foram extraídos da curva MT verticalmente ajustada. A sobreposição dos dois métodos geofísicos (ER e MT) ocorre na região da camada superior dos basaltos da Formação Serra Geral, que deve ter uma largura total da ordem de 200 m.

As três primeiras camadas são constituídas pelos arenitos da Formação Bauru, com as suas resistividades diferenciadas em função do conteúdo de água. A quarta camada representa a transição entre as Formações Bauru e Serra Geral. A quinta camada, com resistividade média de 125 Ωm e 850 m de espessura, é representativa do Grupo São Bento, incluindo os basaltos da Formação Serra Geral e os arenitos das formações Botucatu e Pirambóia. A sexta camada, de baixa resistividade (34 Ωm), pode ser associada aos grupos Passa Dois (sedimentos marinhos) e Tubarão (sedimentos glaciais e pós-glacial) sobre o embasamento cristalino (825 Ωm).

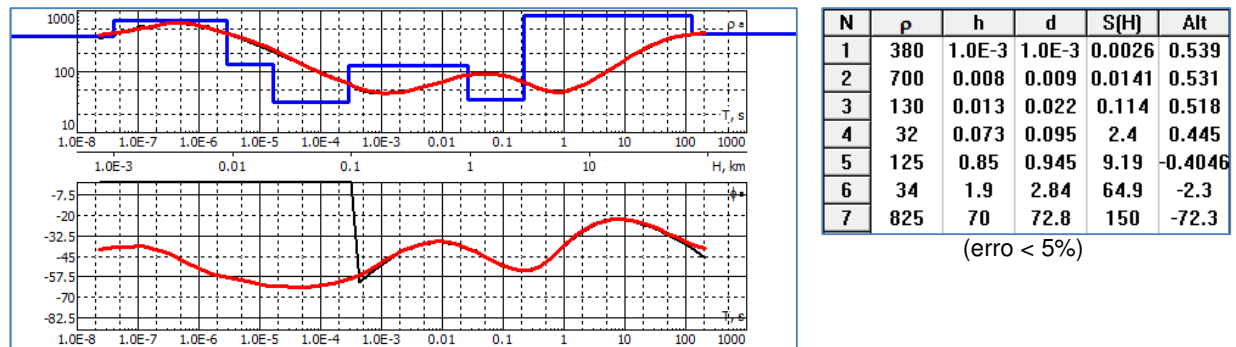


Figura 6: curvas de resistividades aparentes e fase (vermelha) e modelo de resistividade estratificado em sete camadas (azul e tabela).

Tabela 3: interpretação geológica do modelo geoeletrico da crosta para o eletrodo do Bipolo 1.

Camada	Resistividade (Ωm)	Espessura (m)	Profundidade (m)
Solo superficial com matéria orgânica	380 Ωm	1 m	0,5 m
Solo arenoso (Fm. Bauru), acima do freático	700 Ωm	8 m	7,5 m
Solo arenoso (Fm. Bauru), abaixo do freático	130 Ωm	13 m	18 m
Fundo da Fm. Bauru e topo da Fm. Serra Geral	32 Ωm	73 m	78 m
Grupo São Bento - Formações Serra Geral + Botucatu + Pirambóia	125 Ωm	850 m	~ 950 m
Grupos Passa Dois e Tubarão	34 Ωm	1900 m	~ 2700 m
Embasamento cristalino	825 Ωm	∞	∞

6 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ELETRODO DO BIPOLO 1

O Eletrodo 1 em Araraquara é constituído por 160 poços com as seguintes profundidades - 74 x 20 m, 50 x 30 m e 36 x 40 m. As diferentes profundidades são uma consequência das ondulações da Formação Bauru (arenito, antigas dunas de areia), sobre os basaltos da Formação Serra Geral, cujo topo é relativamente plano. O poço médio tem 27,6 m, calculado pela média das profundidades ponderada pelas quantidades, sendo que cada poço tem os primeiros 8m preenchidos com brita, restando uma extensão média de 19,6 m para a parte ativa.

O eletrodo equivalente é composto, portanto, por 160 subeletrodos verticais, cada um constituído por um eletrodo com 19,6 m de extensão ativa, a partir de 8 m abaixo do nível do solo (Figura 7). O modelo geoeletrico foi ajustado de forma que a resistência de aterramento calculada por simulação com software AutoGrid é 0,06 Ω .

A Tabela 4 apresenta os potenciais na superfície do solo calculados para uma injeção de corrente nominal de 2625 A. A Figura 8 apresenta os perfis de potenciais na superfície do solo em uma direção radial, desde o centro do eletrodo até uma distância de 33 km. Pode-se constatar que antes de 2 km as duas curvas são diferentes, uma vez que o gradiente de potencial no solo na quina do eletrodo é mais elevado do que na direção lateral. A partir de 2 km as curvas tendem a sobrepor-se e caem lentamente para o potencial de 4,2 V, a 18 km de distância.

Os gráficos da Figura 9 apresentam a sobreposição das duas curvas de potencial na superfície do solo - uma medida pela ABB e a outra calculada por simulação, em um trecho que vai de 500 a 1000 metros a partir da quina do eletrodo, onde pode ser constatado o bom ajuste entre as duas curvas. O desvio entre as curvas medida e calculada tende a diminuir à medida que os pontos de medição afastam-se do eletrodo. Entre 700 e 1000 m o desvio é inferior a 5%. O modelo geoeletrico do local de construção do eletrodo foi aproximado por um modelo de camadas horizontais e homogêneas, apesar da topografia ondulada da área de estudo. Este padrão topográfico, além das variações locais de resistividade, justifica os desvios constatados na distribuição dos potenciais nas proximidades do eletrodo.

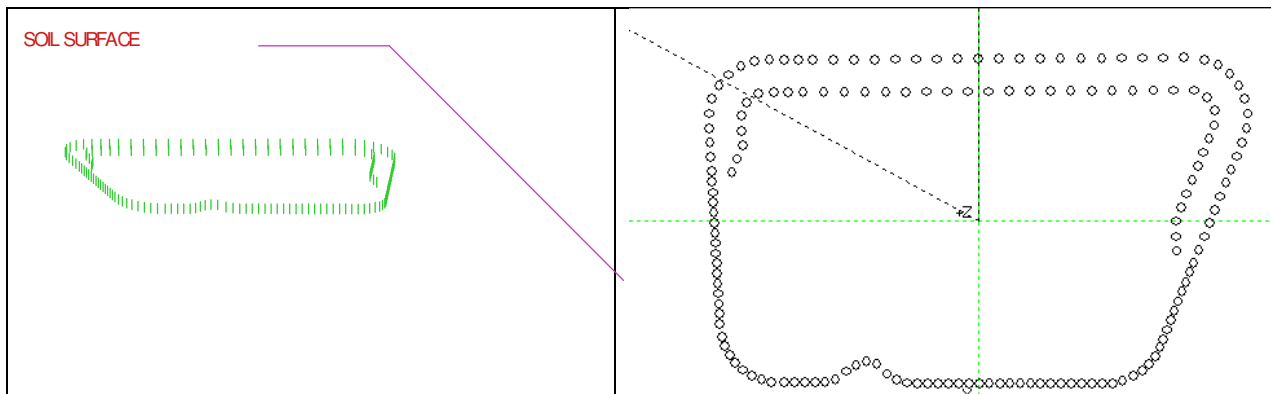


Figura 7: geometria do eletrodo do Bipolo 1 (3D e vista em planta) e direções em que foram feitos os cálculos de potenciais na superfície do solo (N e NO).

Tabela 4: potenciais na superfície do solo, para uma injeção da corrente nominal de 2625 A.

Distancia (km)	5	9	12	15	18	21	24	27	30	33
Potencial (V)	10	7	5.7	4.8	4.1	3.6	3.1	2.8	2.5	2.2

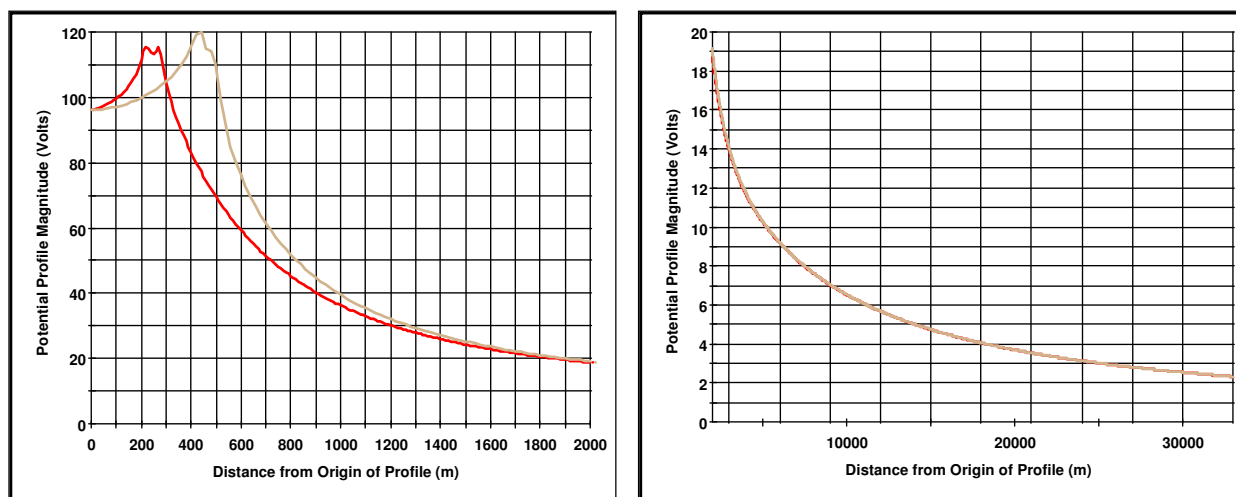


Figura 8: curva de potenciais na superfície do solo calculado ao longo de duas direções radiais desde o centro do eletrodo (para uma corrente injetada de 2625 A) – a) passando pela quina (direção NO), b) na direção N.

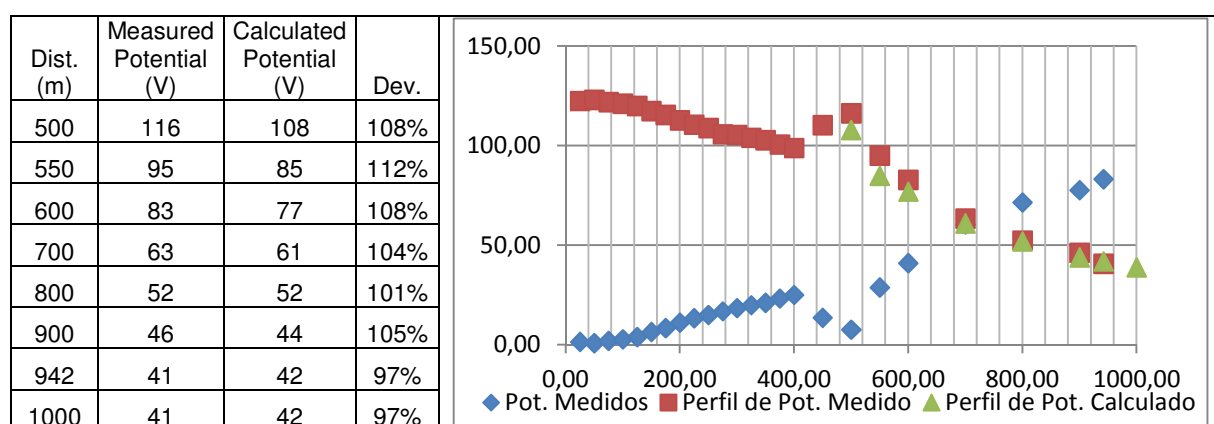


Figura 9: potenciais na superfície do solo (direção da quina) - medidos (azul), calculados (verde) e ajustados (vermelho) – em um raio de 1 km do centro do Eletrodo 1, para a corrente injetada de 2625 A e GPR de 120 V.

7 POTENCIAL DUTO-SOLO NO GASODUTO GASBOL

Em consequência da elevação da resistência de aterramento do eletrodo, a reavaliação das áreas de interferência revelou um potencial duto-solo um pouco mais elevado do que o anteriormente calculado para o gasoduto Gasbol, mas ainda abaixo do limite máximo de 4V, conforme ilustrado na Figura 10.

A Tabela 5 resume os potenciais duto-solo medidos em dois pontos de monitoração do gasoduto Gasbol, para as duas polaridades de corrente injetada no Eletrodo 1, os valores médios para as duas polarizações, e os valores calculados a partir dos potenciais na superfície do solo, obtidos a partir de simulação. Todos os potenciais são referenciados para a corrente nominal de 2625 A, tendo sido descontada dos potenciais medidos o valor de -0,85 V, resultante da polarização do duto pelo sistema de proteção catódica.

Cabe destacar o excelente ajuste obtido para os valores medidos e calculados no ponto de SP-133 (26 km), o mais próximo do eletrodo, com cerca de 3% de erro. Na estação SP-150A (33 km), localizada em Boa Esperança, onde o ramal da GasBrasiliano deriva do Gasbol para as cidades de Araraquara e Matão, o maior desvio entre os valores medidos e calculados pode ser atribuído principalmente a efeitos locais, uma vez que esta é uma estação de grandes dimensões e que abriga retificadores do sistema de proteção catódica, e também devido aos potenciais locais serem afetados pela descarga de correntes capturadas pelo ramal da GasBrasiliano.

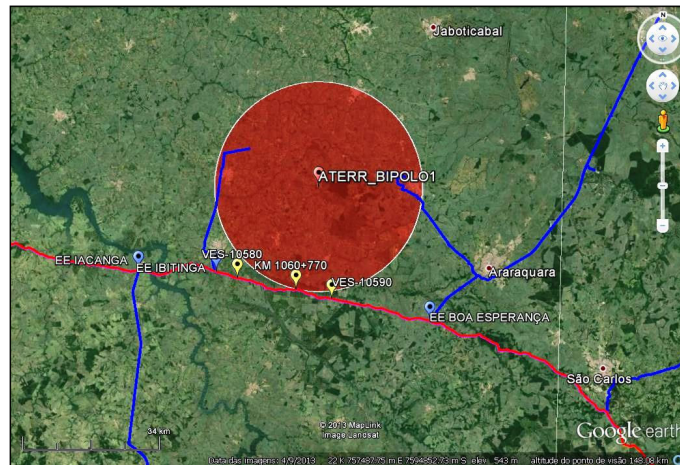


Figura 10: equipotencial de 2,9 V em torno do Eletrodo 1 (26 km de raio), que tangencia o gasoduto Gasbol e que corta as extremidades dos seus ramais.

Tabela 5: potenciais duto-solo medidos e calculados em duas estações do Gasbol, para as duas polaridades do eletrodo.

	Medidos			Calculado
	Polo 1	Polo 2	Média	
SP-133	2.7 V	3.1 V	2.9 V	2.9 V
SP-150A	1.5 V	1.8 V	1.6 V	2.2 V

8 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia detalhada de modelagem da estrutura resistiva da crosta terrestre, para utilização em estudos de eletrodos de aterramento HVDC. Foi proposta uma metodologia para a correção dos desvios estáticos nas medições MT e para o ajuste da resistência de aterramento calculada para o eletrodo.

Algumas conclusões importantes podem ser extraídas deste trabalho:

- geofísica dispõe dos recursos necessários para a construção de um modelo resistivo da crosta, para o suporte ao projeto de eletrodos de aterramento HVDC e realização de estudos de interferências;
- a correção do desvio estático das sondagens geofísicas é essencial para a construção de um modelo adequado da estrutura resistiva da crosta, sendo disponíveis técnicas para lidar com esse ajuste;
- o modelo de estrutura resistiva 1D, construído a partir de uma combinação de diferentes técnicas de sondagem geofísica é regionalmente representativo, pelo menos para uma bacia sedimentar com reduzida anisotropia;
- a resistência medida do eletrodo sempre vai precisar de algum ajuste, uma vez que o eletrodo remoto auxiliar nunca estará efetivamente localizado no terra remoto.

9 REFERENCES

- 1) Freire P.E., Teixeira Filho J.N., Nicola G.L.C., Freitas P.O., Perfeito M.D. Nyberg S., Pereira S.Y.; Sistema de Transmissão do Rio Madeira – Primeiro Bipolo HVDC - Eletrodos de Aterramento – Investigações Geológicas e Critérios de Projeto, XXII SNPTTE, Brasília/Brazil, October/2013.
- 2) Freire P.E., Jardim J.A., Kovarsky D., Pereira S.Y.; Ground Resistivity Modelling for the Study of Large Grounding Systems, XVI ERIAC, Foz de Iguaçu, Argentina, May/2015.
- 3) Freire P.E., Teixeira Filho J.N., Nicola G.L.C., Freitas P.O., Perfeito M.D. Bartelotti M. Estrella M., Pereira S.Y.; Electrical Interference of the Bipole I Ground Electrode from Rio Madeira HVDC Transmission System on the Bolivia-Brazil Gas Pipeline – Preliminary Calculations and Field Measurements, Rio Pipeline 2015, Rio de Janeiro/Brazil, September/2015.
- 4) KIMBARK, E.W., Direct Current Transmission, John Wiley & Sons. 1971
- 5) Kovarsky D., Freire P.E.F., Pinto L.J., Caroli C.E., Santos N.; Curvas de Potencial dos Eletrodos de Aterramento do Sistema CCAT de Itaipu – Resultado das Medições no Comissionamento do Bipolo II, SNPTTE, 1989.
- 6) Manglik, A., Verma, S.K. Application of Magnetotelluric Technique in selection of Earth Electrode Sites for HVDC Transmission Systems: an example from NE India. e-Journal Earth Science India, Vol.2 (IV). October/2009.
- 7) Meju, M. A. Simple relative space-time scaling of electrical and electromagnetic depth sounding arrays: implications for electrical static shift removal and joint DC-TEM data inversion with the most-squares criterion. Geophysical Prospecting 53, 2005.

- 8) THUNEHED, H.; ÅSTROM, U.; WESTMAN, B. Geophysical and Geological Pre-investigations for HVDC Electrodes. IEEE PES PowerAfrica 2007 Conference and Exposition. Johannesburg, South Africa (p. 16-20).

10 DADOS BIOGRÁFICOS

	<p>Paulo Edmundo da Fonseca Freire (paulofreire@paiolengenharia.com.br) - nasceu em 1955, Diretor da PAIOL Engenharia (19 3844-4488). Engenheiro Eletricista (1978) e Mestre em Sistemas de Potência (1984) pela PUC-RJ, Doutorando em Geologia/Geofísica pela Unicamp. Curso "Grounding & Eletromagnetic Fields" na Safe Engineering Services & technologies Ltd. (1994, Montreal, Canadá). 35 anos de experiência em estudos e projetos de sistemas de aterramento e de proteção contra descargas atmosféricas para redes de energia e instalações comerciais, industriais e de transportes. Ex-professor da Universidade Gama Filho, instrutor/palestrante de cursos e eventos sobre os temas aterramento e proteção contra descargas atmosféricas e autor de trabalhos apresentados em congressos e seminários. Serviços prestados no Brasil, Chile, Angola, Quênia e Etiópia. Membro do Cigré e IEEE.</p>
	<p>Geraldo Luiz Costa Nicola - nasceu em 1951, São Paulo-SP (Brasil). Graduiu-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.</p>
	<p>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.</p>
	<p>João Neves Teixeira Filho - nasceu em 1959 em Florianópolis, Piau (Brasil). Graduiu-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 (UnCEUB, 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.</p>
	<p>Marcus Danilo Perfeito - nasceu em 1962 em Morrinhos, Goiás (Brasil). Graduiu-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.</p>
	<p>Sören Nyberg - nasceu em 1955, em Smedjebacken, Suécia. Começou a trabalhar na ASEA em 1975, hoje ABB. Graduiu-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.</p>
	<p>Sueli Yoshinaga Pereira - Professora Associada do Instituto de Geociências da Unicamp, possui formação em Geologia, Mestrado e Doutorado em Hidrogeologia. Pesquisas em caracterização geológica e hidrogeológica; geologia ambiental e geofísica visando a integração de diversas áreas de conhecimento para entendimento do meio físico de modo mais abrangente e aplicação nas diversas atividades humanas.</p>