

GRUPO VIII  
 SUBESTAÇÕES, EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E MATERIAIS (GSE)

CURVAS DE POTENCIAL DOS ELETRODOS DE ATERRAMENTO DO SISTEMA CCAT DE ITAIPU :  
 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DURANTE O COMISSIONAMENTO DO BIPOLO II

C.E.CAROLI - N.SANTOS

D.KÓVARSKY - P.E.F.FREIRE - L.J.PINTO

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS

MONASA/THEMAG/PTEL

1. INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão CCAT de Itaipu, sob condições de emergência, pode operar no modo monopolar, situação em que o retorno de corrente se dá pelo solo. Nestas condições aparecem gradientes de potencial em estruturas metálicas em contacto com o solo (cercas, tubulações, sistemas de transmissão, de distribuição e de telecomunicações) localizadas na área de influência dos seus eletrodos de aterramento. Em particular os eletrodos de Ibiúna estão localizados numa região de subsolo de alta resistividade o que resulta em uma área de influência de razoável extensão.

O eletrodo do Bipolo II em Ibiúna foi implantado nas proximidades do eletrodo do Bipolo I, causando alteração nas curvas de potenciais deste último, cujas medições foram apresentadas em [1] e [3].

O presente trabalho relata as técnicas utilizadas para a previsão das curvas de potenciais dos eletrodos do Bipolo II, bem como das alterações esperadas para as curvas de potenciais do Bipolo I em Ibiúna. São apresentados ainda os resultados das medições realizadas, que são comparados com os citados cálculos prévios.

São também abordados, neste trabalho, alguns aspectos adicionais referentes à estabilidade das curvas de potencial ao longo do tempo, e um método particular de medição de resistência de aterramento dos eletrodos e à distorção nas curvas de potencial devido ao efeito da proximidade enere eletrodos.

2. CURVAS TEÓRICAS DE POTENCIAIS NO SOLO

As curvas teóricas foram calculadas tendo em vista dois objetivos:

- a adoção das medidas preventivas nas cercas, tubulações e circuitos telefônicos localizados na área de influência dos eletrodos; e
- a disponibilidade de curvas de potenciais previstos para comparação com as medições a serem realizadas quando do comissionamento dos eletrodos do Bipolo II.

2.1 Foz do Iguaçu

Para o eletrodo de aterramento do Bipolo II, em Foz do Iguaçu, Foi adotada como curva ptévia de potenciais, a resultante da média entre as curvas relativas às medições feitas nas direções NE, NO, SE e SO para o eletrodo de aterramento do Bipolo I.

A adoção desta curva média mostrou-se adequada devido a:

- uniformidade das camadas do solo na região (camadas paralelas);
- reduzida distância entre os Eletrodos I e II (aproximadamente 12 km);
- reduzida área de influência do eletrodo, resultante da baixa resistividade do solo;
- semelhança entre as curvas de potenciais medidas do eletrodo do Bipolo I nas várias direções.

A obtenção desta curva seguiu as seguintes etapas:

- mudança de referência das quatro curvas disponíveis, de modo que a origem dos eixos passasse a concordar com os vértices das curvas;
- cálculo das médias dos potenciais à mesma distância do vértice de cada curva, e construção de uma curva média de potenciais;
- mudança de eixos da curva média, de modo a referenciá-la para a terra remota.

A curva média finalmente obtida corresponde a um eletrodo equivalente (com o mesmo perímetro do Eletrodo II), com forma circular e com o potencial máximo igual à média dos potenciais máximos do eletrodo do Bipolo I. A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, as etapas acima comentadas.

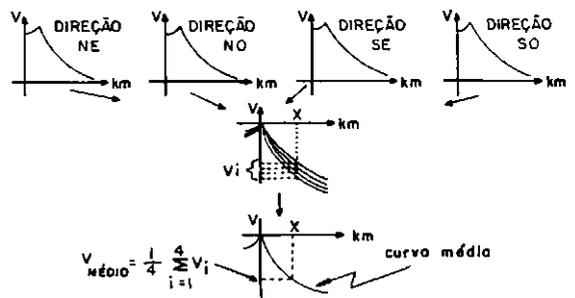


Figura 1  
 Foz do Iguaçu - Bipolo II  
 Avaliação da Curva dos Potenciais Previstos (média)

A Figura 2 apresenta a curva dos potenciais previstos no solo obtida para o eletrodo do Bipolo II, em Foz do Iguaçu. Esta Figura 2 apresenta, também, uma curva medida, (direção Sul) comentada adiante, no item 3.3.

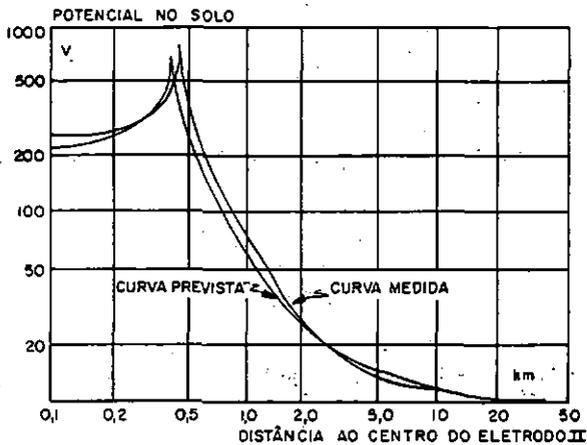


Figura 2  
Foz do Iguaçu - Bipolo II  
Curvas de Potencial no Solo  
Prevista e Medida - Direção Sul

2.2 Ibiúna

Em Ibiúna, a determinação das curvas previstas de potenciais revelou-se mais complexa do que em Foz do Iguaçu, devido à:

- existência de uma camada de solo inclinada (ver Figura 3);
- extensa área de influência do eletrodo, resultante do substrato rochoso de elevada resistividade;
- proximidade existente entre os eletrodos dos Bipolos I e II (ver Figura 3).

A Figura 3 apresenta o modelo de solo na região dos eletrodos de Ibiúna. Verifica-se a existência de uma camada de solo inclinada, de baixa resistividade, que se insere como uma cunha entre a fina camada superficial e o substrato rochoso. A linha identificada por "traço" delimita o fim da "cunha" de solo de baixa resistividade, quando a camada de alta resistividade quase aflora à superfície do solo. Este modelo foi originalmente obtido a partir de levantamentos realizados antes da construção do Eletrodo I, [1]. Conclusões tiradas a partir das medições efetuadas por ocasião dos testes do eletrodo I - inclinação das curvas de potencial e poço perfurado até a profundidade de 75 m - permitiram definir a inclinação de 0,5 graus para a camada em cunha. Para a camada rochosa, foi feita uma série de simulações (utilizando programa que representa solo em camada inclinada [1]), tentando ajustar o modelo de solo para as curvas medidas (ver Figura 4). Em função da proximidade existente entre os dois eletrodos, conforme pode ser visualizado na Figura 3, foi necessária não só a elaboração das curvas de potenciais

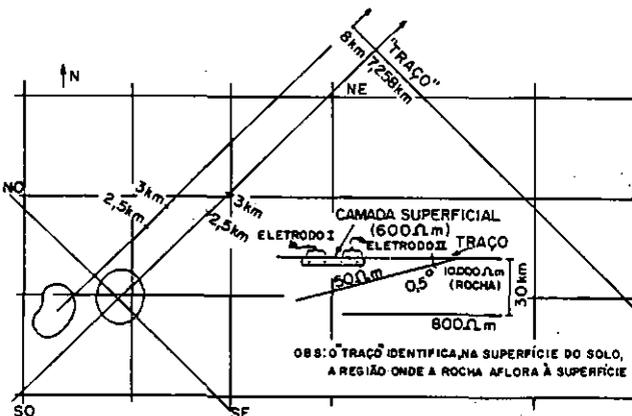


Figura 3  
Ibiúna - Bipolos I e II  
Modelo do Solo e Direções  
para Cálculo das Curvas Previstas

previstas para o Eletrodo II, mas também a reavaliação das curvas do Eletrodo I, já conhecidas.

2.3 Eletrodo de Aterramento do Bipolo II

Conforme pode ser visualizado na Figura 3, o Eletrodo II, em Ibiúna, encontra-se mais próximo do "traço" do que o Eletrodo I. Cumpre então, primeiramente, avaliar o efeito deste deslocamento nas curvas de potencial medidas do Eletrodo I, de modo que as mesmas possam servir de ponto de partida para a obtenção das curvas previstas para o eletrodo do Bipolo II. Uma análise qualitativa do efeito da camada de solo em "cunha" indica que o deslocamento do ponto de injeção de corrente no solo na direção do "traço" resulta numa elevação da curva de potenciais. De modo a avaliar quantitativamente este efeito, foi conduzido um estudo com o modelo de solo constante da Figura 3, porém simplificado pela não consideração da fina camada superficial de resistividade mais elevada.

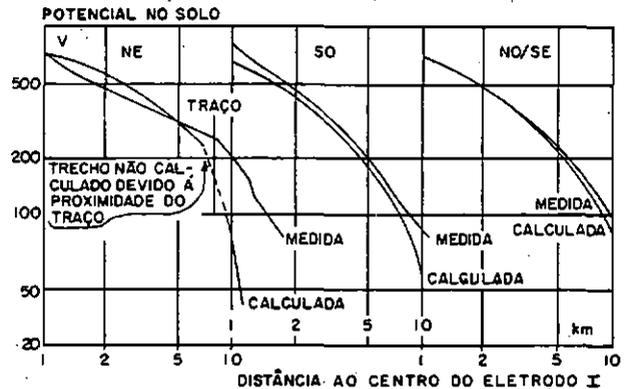


Figura 4  
Ibiúna - Bipolo I  
Curvas de Potencial Medidas e Calculadas  
Ajuste do Modelo de Solo

Com base no modelo de solo ajustado, foram feitas duas séries de simulações utilizando o mesmo programa já citado. Nestas séries foram simuladas injeções de corrente a 8000 m e 7258 m do "traço", correspondendo aos centros dos Eletrodos I e II. Foram, então, comparados os gradientes de potencial obtidos nas duas simulações realizadas, para as seguintes direções:

- NE - perpendicular e no sentido do "traço";
- SO - perpendicular e no sentido oposto ao "traço";
- NO/SE - paralela ao "traço".

Estas comparações permitiram confirmar a expectativa de que o efeito da diminuição da distância entre o eletrodo e o "traço" seria de elevar os gradientes de potencial no solo. Verificou-se que, entre 1 e 1,5 km do centro do Eletrodo II, a diferença nos gradientes elevou-se em cerca de 10%, enquanto que, entre 9,5 e 10 km, esta diferença nos gradientes reduziu-se para cerca de 5%. Observa-se, portanto, uma diminuição no valor das diferenças entre os gradientes devidos a cada um dos eletrodos, à medida em que se considera pontos mais afastados dos mesmos. Conclui-se, portanto que, em termos de potencial absoluto, a diferença entre as curvas de potencial dos dois eletrodos, a 1 km do centro dos mesmos, será inferior a 10%. Nota-se que, graficamente, fica impossível distinguir as duas curvas a partir de aproximadamente 8 km do centro de cada eletrodo, podendo-se admitir que as curvas passam a ser coincidentes. A Figura 5 exemplifica este aspecto para a direção SO. Não foram calculadas as diferenças entre gradientes localizados a menos de 1 km do centro do eletrodo, devido ao fato de que o programa considera a fonte pontual e não um anel, o que leva a distorções no cálculo de potenciais na área muito próxima ao eletrodo. Para esta área, localizada no interior de um círculo de raio de 2 km a partir do seu centro, foi tentado um

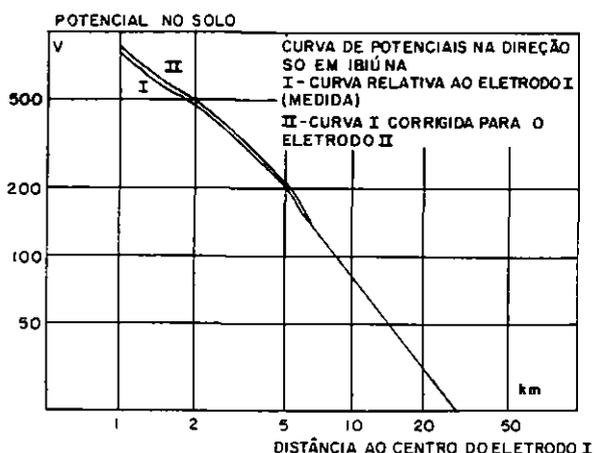


Figura 5  
Ibiúna - Bipolo II  
Curva Prevista de Potenciais no Solo  
Direção Sudoeste

ajuste das curvas prévias de potencial com o auxílio de um programa de computador que representasse a geometria do eletrodo. Esta tentativa não revelou-se totalmente adequada, visto que o programa disponível permitia, apenas, a simulação de um modelo de solo de duas camadas paralelas, enquanto que a configuração do solo na área dos eletrodos de Ibiúna é bem mais complexa, com camadas não paralelas e, ainda, apresentando variações de acordo com a direção considerada.

Os resultados obtidos a partir dessas simulações em computador foram utilizados, então, apenas para uma avaliação qualitativa das curvas de potencial na região próxima ao anel do eletrodo, tendo sido muito importantes os resultados obtidos para a direção Oeste, que quantificaram devidamente a esperada influência face à presença do eletrodo do Bipolo I.

Devido aos aspectos acima mencionados, e também por uma questão de coerência com a metodologia adotada no cálculo das curvas previstas de potencial para o eletrodo do Bipolo II de Foz do Iguaçu, optou-se pela adoção de uma curva de potenciais média única, apenas para a região próxima ao anel do eletrodo do Bipolo II, a partir das medições das curvas relativas ao eletrodo do Bipolo I.

Essa curva de potenciais média foi obtida de acordo com a sistemática já exposta para Foz do Iguaçu (item 2.1).

A Figura 6 apresenta a curva de potenciais na direção Oeste, que stravease o eletrodo de terra do Bipolo I, obtida pela simulação em computador (curva I). Verificou-se que, ao invés do decaimento suave que a curva média (curva II) apresentava a partir do pico (acima do anel do eletrodo II), ocorria um brusco decaimento no potencial no trecho de solo localizado entre os dois eletrodos. Observou-se, ainda, que a inclinação da curva no trecho de solo no interior do anel do eletrodo do Bipolo I apresentava, aproximadamente, a mesma inclinação do trecho seguinte, que se inicia a 1,1 km do centro do eletrodo II e prossegue para além dos dois eletrodos.

Com base na análise qualitativa acima exposta, e na curva de potenciais média obtida (curva II na Figura 6), foi possível construir a curva III que retrata a curva de potenciais esperada para a direção Oeste, até 1,5 km do centro do eletrodo de terra do Bipolo II.

Conforme o exposto, as curvas de potencial nas direções SE, NE, SO, NO e O foram compostas pelos seguintes trechos:

- trecho a: do centro do eletrodo até 2 km - curva média obtida, com exceção da direção Oeste que possui uma curva específica;
- trecho b: de 1,5 km até 10 km - curva do eletrodo de terra do Bipolo I nas direções correspondentes, corrigidas segundo os fatores de conversão que consideraram a maior proximidade entre o Eletrodo II e o "traço" (estas fatores foram obtidos a partir das duas

séries de simulações com o modelo de solo de camada inclinada);

- trecho c: além de 10 km - curvas do eletrodo de terra do Bipolo I nas direções correspondentes.

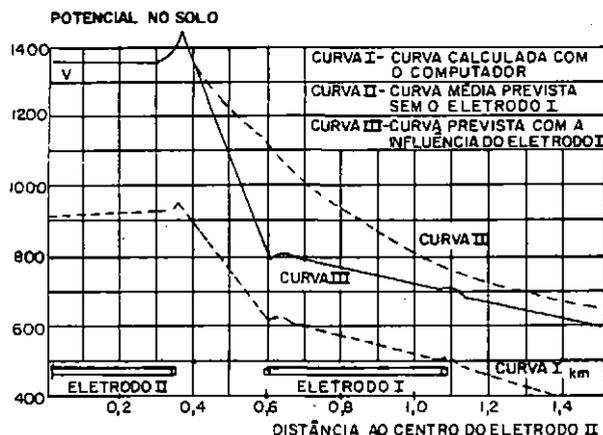


Figura 6  
Ibiúna - Bipolo II  
Avaliação da Curva Prevista - Direção Oeste

A composição destes três trechos, para cada uma das direções consideradas, permitiu a obtenção das quatro curvas previstas de potenciais no solo para o Eletrodo II de Ibiúna.

A transição entre os trechos b e c ocorre naturalmente, conforme pode ser observado na curva da Figura 5. Entre os trechos a e b foi previsto um "overlap" no intervalo de 1,5 a 2 km, de modo a permitir a seleção do ponto ótimo de "casamento" dos trechos.

Adotou-se como critério de identificação do ponto ótimo, o local em que ambas as curvas (trechos a e b) apresentassem os mesmos gradientes (ou bastante próximos) para uma mesma distância do centro do eletrodo, conforme se observa na Figura 7.

Com a realização de um "casamento" preliminar entre os trechos a e b das diversas direções de medição, verificou-se que os potenciais no centro do Eletrodo II apresentavam ligeiras discrepâncias entre si.

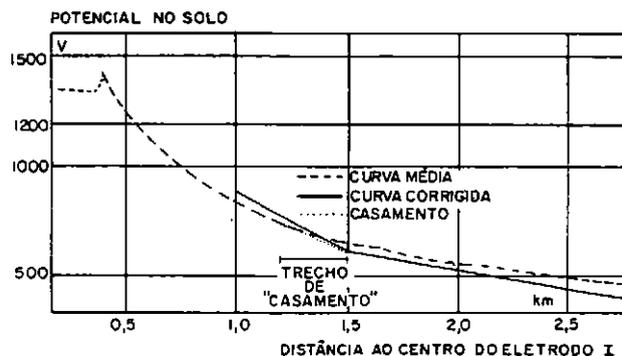


Figura 7  
Ibiúna - Bipolo II  
Ajuste da Curva Prevista - Direção Sudoeste

Foi, então, calculada a média dos valores encontrados para esses potenciais e procedeu-se a um novo ajuste, ou "casamento", consolidando o valor do potencial no centro do eletrodo (ver Figura 7).

As curvas previstas de potenciais no solo (direções Oeste e Sudeste), para o eletrodo de aterramento do Bipolo II, de Ibiúna, encontram-se nas Figuras 10 e 11, juntamente com as curvas medidas, adiante comentadas.

## 2.4 Eletrodo de Aterramento do Bipolo I

A influência do Eletrodo II sobre as curvas de potenciais do Eletrodo I, de Ibiúna, foi avaliada qualitativamente da mesma forma como exposto no item anterior (direção Oeste).

A Figura 8 apresenta a curva de potenciais no solo medida antes da construção do Eletrodo II, e a curva prevista considerando a influência do mesmo. Para esta avaliação selecionou-se a curva SE do Eletrodo I, que era a que mais se aproximava da área do Eletrodo II. Nas demais direções não se procedeu à avaliação prévia, pois não se esperavam alterações sensíveis fora da área compreendida entre os dois eletrodos. O ajuste, nestes casos foi feito "a posteriori" conforme se explica adiante.

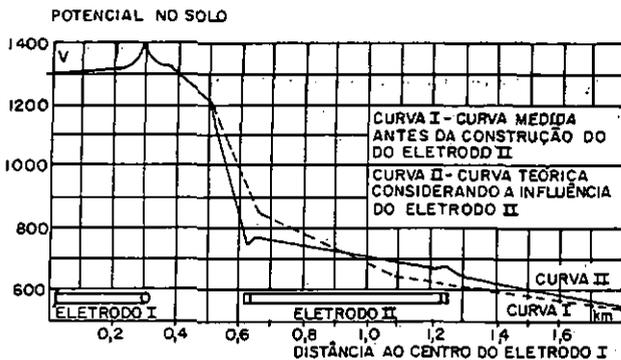


Figura 8  
Ibiúna - Bipolo I  
Avaliação da Curva Prévia - Direção Leste

## 3. CURVAS MEDIDAS DE POTENCIAIS NO SOLO

### 3.1 Metodologia Adotada para a Execução das Medições

O método adotado para obtenção das curvas de potencial [2], [3], consiste na medição de diferenças de potencial entre pares de pontos no solo, ao longo de direções aproximadamente radiais. O potencial de qualquer ponto é assim obtido como uma somatória de diferenças de potencial. Todas as medições foram referidas à corrente de 2930 A, valor básico adotado nos cálculos para definição de medidas preventivas, e que corresponde à máxima corrente monopolar de um bipolo, em condições de baixa temperatura ambiente em ambas as Conversoras. A referência para um ponto muito distante, a "terra remota", foi obtida pela medição da diferença de potencial entre pontos das direções de medição e um ponto distante 100 km (em Ibiúna) e 29 km (em Foz do Iguaçu) dos respectivos eletrodos, medição esta feita com o auxílio das redes das Concessionárias de Telefonia das respectivas regiões.

Foram realizados dois tipos de medições:

- potenciais em pares de pontos no solo; destinados à construção das curvas de potenciais;
- potenciais de pontos via estações telefônicas; com o objetivo de se obter valores absolutos de potenciais no solo que serviriam posteriormente como referências para as curvas de potenciais.

Nas medições de potenciais em pares de pontos foram utilizados dois tipos de planilhas. O primeiro tipo contém os resultados das medições, desde o centro do eletrodo até o último ponto de medição de cada rota. O segundo contém as chamadas "medições auxiliares", que são as medições realizadas com pequenos espaçamentos, ou com espaçamento ampliado. As medições com pequeno espaçamento (da ordem de metros), feitas próximo ao perímetro do eletrodo, tiveram por objetivo o detalhamento dos "bicos" das curvas de potenciais. As medições com espaçamentos ampliados, mediram, em cada rota, o potencial entre o centro do eletrodo e um ponto da superfície sobre o anel, e deste até aproximadamente 500 m adiante, e tiveram por objetivo a verificação das

medições com espaçamento normal (da ordem de 100 m). Os potenciais de pontos no solo via estações telefônicas foram obtidos por meio de medições de potenciais em pares de pontos no solo espaçados entre si por grandes distâncias, utilizando pares telefônicos.

Em Ibiúna foi realizado um amplo levantamento de diferenças de potenciais no solo via estações da TELESP, tendo sido necessária a utilização de alguns pontos intermediários para a obtenção do potencial até o ponto remoto, a 100 km dos eletrodos.

Em Foz do Iguaçu foi suficiente um número mais reduzido de medições, via estações da TELEPAR.

### 3.2 Metodologia Adotada para o Traçado das Curvas de Potenciais

Desde o momento em que as medições foram concluídas no campo, até a obtenção das curvas finais de potenciais no solo, diversas etapas intermediárias foram executadas, obedecendo à seguinte sequência:

- processamento das medições nas diversas direções consideradas;
- cálculo dos potenciais absolutos a partir das medições feitas via estações telefônicas da TELEPAR e da TELESF;
- cálculo dos potenciais nos centros dos eletrodos;
- montagem das curvas finais de potenciais no solo.

O processamento das medições de potenciais na superfície do solo foi realizado no campo, à medida em que eram recebidos os resultados das medições, feitas pelas diversas equipes ao longo das rotas.

O seu objetivo básico foi a detecção de eventuais erros de medição, com base nos cálculos prévios disponíveis, de modo que, em caso de necessidade, fosse possível a realização de uma remedição imediata. Este processamento resultou em duas famílias de curvas, uma para o eletrodo de Ibiúna e outra para o de Foz do Iguaçu, deslocadas em relação ao eixo das tensões (vertical), já que as referências de potencial no centro dos eletrodos eram valores teóricos e incompletas no eixo das distâncias (horizontal), já que limitavam-se ao último ponto de medição em cada direção considerada.

Com base nos potenciais absolutos nos centros dos eletrodos, estabelecidos a partir das medições realizadas via estações telefônicas, e com o auxílio das curvas previstas, foi possível a correção das curvas em relação ao eixo das tensões.

Finalmente, para a conclusão dos trechos finais das curvas nas diversas rotas de medição, até então incompletas, foram utilizadas as curvas previstas.

### 3.3 Medições em Foz do Iguaçu

Foram medidas as diferenças de potenciais no solo em oito direções, sendo que em quatro delas (N, S, E e O) as medições prosseguiram até grandes distâncias (entre 3300 m e 4100 m do centro do eletrodo) e nas outras (NE, NO, SE e SO) até cerca de 500 a 600 m. Inicialmente, todas as medições estavam programadas para ir até cerca de 4000 m do eletrodo, porém, após realizadas as medições nas direções N, S, E e O, optou-se por reduzir o alcance das medições restantes, tendo em vista que os resultados das primeiras apresentavam um perfil bastante semelhante entre si e, também, em relação à curva prevista, o que permitia a extrapolação, com segurança, para toda a área de influência.

Para o estabelecimento da referência de potencial com relação à terra remota, foram realizadas medições de diferenças de potenciais entre seis pontos no solo, nas redes telefônicas da TELEPAR, em São Miguel e em Santa Terezinha.

A Figura 9 apresenta a localização dos seis pontos de medição, bem como do centro do Eletrodo II, com a indicação das diferenças de potencial medidas, referidas para 2930 A de corrente na eletrodo II. A diferença de potencial entre os assinantes MA e CA não pôde ser medida, devido a estes assinantes não pertencerem à mesma rede, porém uma boa estimativa pôde ser feita com base na curva teórica dos potenciais (traçada a partir das medições relativas ao eletrodo do Bipolo I), pois os dois assinantes são equidistantes dos Eletrodos I e II.

A diferença de potencial entre o centro do eletrodo e o assinante AB foi obtida a partir das medições de potenciais no solo na rota de medição Sul.

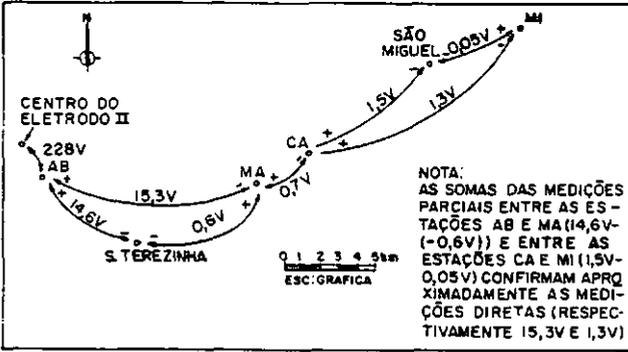


Figura 9  
Foz do Iguaçu - Bipolo II  
Diferenças de Potencial no Solo  
Medições na Rede Telefônica da TELEPAR

Como o assinante MI equidista dos eletrodos I e II aproximadamente 29 km, o potencial no solo, neste assinante, é o mesmo para ambos os eletrodos e igual a 10 V, conforme resultou dos testes referentes ao eletrodo do Bipolo I. Partindo do assinante MI, com 10 V, e somando as diferenças de potencial medidas no solo até o centro do Eletrodo II, obtêm-se:

$$II$$

$$V = 10 + 1,3 + 0,7 + 15,3 + 228 = 255,3 \text{ V}$$

ce

Desprezando-se a casa decimal, foi adotado o valor de 255 V como o potencial absoluto no centro do Eletrodo II em Foz do Iguaçu.

Definido o valor absoluto do potencial no centro do eletrodo, e utilizando-se os resultados das medições de diferenças de potencial no solo nas diversas direções consideradas, foram obtidos os perfis finais das curvas de potenciais, desde o centro do eletrodo até o último ponto de medição em dada rota, faltando portanto apenas a definição da porção final de cada curva.

Para a conclusão das diversas curvas de potencial foi utilizado, então, o trecho final da curva teórica, sendo mantida a tendência desta última de atingir o valor de 10 V a 29 km do centro do Eletrodo II, conforme utilizado para o cálculo de potencial absoluto no centro do eletrodo.

A Figura 2 apresenta a curva medida na rota Sul, juntamente com a curva de potenciais prevista, calculada conforme o exposto no item 2.1 deste trabalho.

### 3.4 Medições Realizadas em Ibiúna

#### 3.4.1 Eletrodo II

Foram medidas as diferenças de potenciais no solo em oito direções, seis das quais atingindo grandes distâncias (entre 10 km e 15 km) do centro do eletrodo, sendo que em apenas duas rotas foram mais reduzidas as distâncias atingidas (NO com 5,7 km e SO com 2,9 km).

As curvas de potenciais medidas nas oito direções com corrente no Eletrodo II, apresentam o mesmo aspecto geral das curvas medidas com corrente no eletrodo do Bipolo I, o que é justificado pela proximidade dos dois eletrodos. O potencial do centro do Eletrodo II foi determinado com base nas medições dos pontos de amarração, cujo potencial em relação à terra remota era conhecido por medições, feitas anteriormente, através das linhas telefônicas da TELESP.

As rotas de medição Norte, Oeste, Nordeste e Noroeste passaram por pontos de medição da rede telefônica, o que possibilitou uma amarração entre as medições de FURNAS e

da TELESP.

Para o cálculo do potencial no centro do Eletrodo II, a partir dos diversos pontos de amarração, foram necessárias, em geral, as seguintes etapas:

- obtenção do potencial absoluto no ponto de amarração;
- cálculo da diferença de potencial entre o centro do eletrodo e o ponto de medição no solo (ao longo de uma rota) coincidente ou mais próximo do ponto de amarração;
- cálculo da diferença de potencial entre o ponto de amarração e o ponto de medição mais próximo dele ao longo de uma rota, quando necessário;
- cálculo do potencial absoluto no centro do eletrodo pela soma das parcelas acima.

De acordo com esta sistemática, foram calculados quatro valores de potencial no centro do Eletrodo II, de 1268 V a 1303 V, tendo sido selecionado o valor de 1286 V, média aritmética dos resultados obtidos.

Definido o valor absoluto do potencial no centro do eletrodo, foram então reprocessados os resultados das medições de diferenças de potencial no solo em todas as direções consideradas, o que resultou na definição do traçado final das curvas de potencial, desde o centro dos eletrodos até o último ponto de medição em cada rota.

Portanto, para a conclusão das curvas de potencial, restaria apenas a definição da porção final das mesmas, tendo sido então admitido que a última curva equipotencial relativa ao Eletrodo I (30 V), poderia ser considerada como comum para ambos os eletrodos.

Foi elaborada, em seguida, uma tabela que relacionou, para cada uma rotas de medição, as distâncias do centro do Eletrodo II à equipotencial de 30 V do Eletrodo I. Com base nos pontos constantes desta tabela, complementados por alguns valores de potenciais absolutos no solo, obtidos através das medições feitas em pontos da TELESP, foram construídas as porções finais das curvas de potenciais no solo do Eletrodo II de Ibiúna.

As Figuras 10 e 11 apresentam as curvas medidas nas direções Oeste e Sudeste, juntamente com as curvas calculadas.

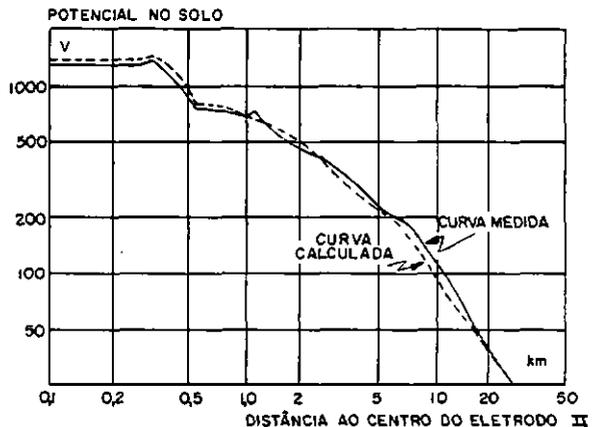


Figura 10  
Ibiúna - Bipolo II  
Curvas de Potencial no Solo, Calculada e Medida  
Direção Oeste

#### 3.4.2 Eletrodo I

Tendo em vista a proximidade existente entre os dois eletrodos de Ibiúna, foi realizada uma série de medições com o objetivo de quantificar as alterações sofridas pelas curvas de potencial do Eletrodo I, após a construção do Eletrodo II.

Foram feitas medições em seis rotas, a saber: N, NO, SO e E-SE (até 4 km do centro do Eletrodo I), E (até 16 km) e SE (até 12 km).

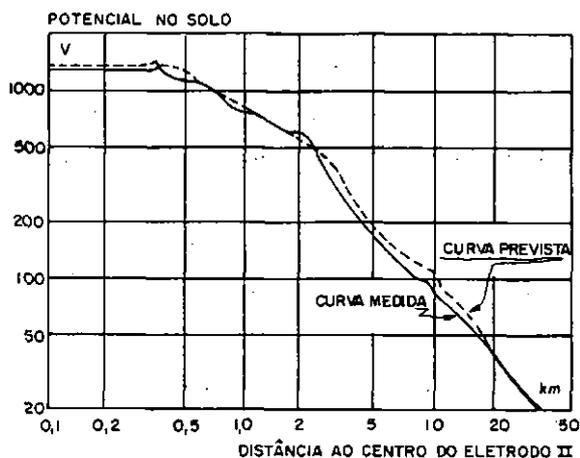


Figura 11  
Ibiúna - Bipolo II  
Curvas de Potencial no Solo Prevista e Medida  
Direção Sudeste

Os resultados destas medições permitiram a constatação, nas curvas de potencial do Eletrodo I, de três efeitos decorrentes da implantação do Eletrodo II em área vizinha ao mesmo, a saber:

- redução da resistência de aterramento do Eletrodo I;
- distorção das curvas de potencial na região próxima ao Eletrodo II;
- influência desprezível nas partes das curvas de potencial afastadas dos eletrodos.

Qualitativamente, estes efeitos se traduziram na redução dos potenciais no centro do eletrodo e no "bico" das curvas de potenciais sobre o Eletrodo I, no surgimento de um patamar de potencial no setor compreendido entre as direções Leste e Sudeste (região onde se localiza o Eletrodo II) e na não alteração das partes das curvas de potencial a grandes distâncias dos eletrodos. Para distâncias acima de 2-3 km do centro do Eletrodo I, as curvas de potencial agora medidas resultaram idênticas àquelas obtidas antes da implantação do Eletrodo II, o que permitiu elaborar um critério para a consolidação das curvas do eletrodo do Bipolo I a partir das novas curvas e das curvas anteriores.

A construção do Eletrodo II em área vizinha ao Eletrodo I teve o efeito de reduzir a resistência de aterramento deste último. Fez-se, portanto, necessária a avaliação do novo valor de potencial do solo no centro do Eletrodo I, tendo em vista o estabelecimento de um referencial a partir do qual seriam reconstruídas as diversas curvas de potenciais.

Com base nos três efeitos resultantes da proximidade entre os Eletrodos I e II, acima citados, foi elaborado um método analítico para determinação do potencial no centro do Eletrodo I. Este método utilizou as medições de potenciais no solo realizadas antes e após a construção do Eletrodo II. Como os pontos de medição nas rotas N, NO, E e SE foram comuns a ambas as séries de medições foi possível calcular o desvio ocorrido no valor da diferença de potencial entre cada par de pontos, resultante da construção do Eletrodo II.

A somatória dos desvios, para cada uma dessas quatro rotas, resulta no desvio total de potencial entre as curvas obtidas nas duas séries de medições.

A rota SO não foi considerada neste cálculo, devido à não coincidência de todos os seus pares de pontos de medição utilizados nas duas séries.

Cumpre observar que este desvio total só se refletiu integralmente no centro do Eletrodo I, reduzindo-se gradativamente até tornar-se desprezível, a uma distância tal que as curvas de potencial pré e pós Eletrodo II passaram a coincidir. Como será mostrado mais adiante, esta distância foi da ordem de 3 km.

Este processo pode ser melhor entendido se admitirmos que o Eletrodo II não se constitui em um elemento capaz de modificar as curvas de potenciais do Eletrodo I, limitando-se apenas em distorcê-las nas suas proximidades.

Segundo este raciocínio, se selecionarmos uma determinada rota e, partindo de uma distância bastante afastada dos eletrodos, refizermos as medições de diferenças de potenciais no solo nos mesmos pontos utilizados nas medições feitas sem a presença do Eletrodo II, veremos que os valores medidos praticamente não se alterarão até atingirmos a proximidade dos eletrodos. A partir de aproximadamente 3 km, começarão a ocorrer desvios, para menor, nos valores medidos, desvios estes que se ampliarão à medida em que nos aproximarmos dos eletrodos. O afastamento entre as curvas de potenciais poderá ser expresso, então, pelo valor acumulado dos desvios, que será máximo no centro do eletrodo.

O gráfico da Figura 12 apresenta o comportamento dos desvios acumulados, a partir do centro do Eletrodo I, para cada uma das quatro rotas citadas. As curvas resultantes têm origens distintas, já que por ocasião das medições sem a presença do Eletrodo II não se julgou necessário distribuir, por serem insignificantes, as diferenças entre os valores apurados para o centro do Eletrodo I nas diversas rotas. Verifica-se que as quatro curvas tendem assintoticamente para um mesmo valor de potencial no centro do Eletrodo I, a saber, 1250 V e, ainda que esta convergência ocorre a uma distância aproximadamente, 3 km do centro do eletrodo.

Conclui-se, portanto, que a nova referência de potencial no centro do Eletrodo I, válida para todas as rotas de medição, é de 1250 V e que as novas curvas de potencial (considerando a existência do Eletrodo II) coincidirão com as curvas antigas (sem o Eletrodo II) a partir de aproximadamente, 3 km do centro do Eletrodo I.

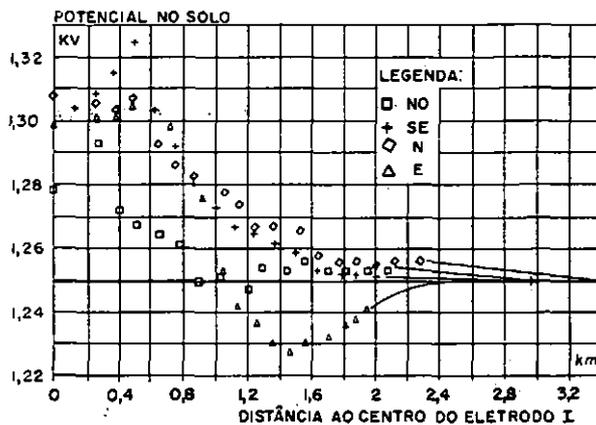


Figura 12  
Ibiúna - Bipolo I  
Novo Potencial no Centro do Eletrodo  
Método Gráfico

Cada ponto do gráfico da Figura 12 foi calculado a partir da expressão que indica o desvio de potencial acumulado do centro do eletrodo até o ponto de medição:

$$V = V_{ce} - \sum_{i=1}^n (\Delta V_i - \Delta V_i) \quad \text{antigo} \quad \text{novo}$$

onde:

$V$  = potencial do solo no ponto de medição n;

$V_{ce}$  = antigo valor de potencial no centro do Eletrodo I (sem Eletrodo II)

$\Delta V$  = diferença de potencial entre os pontos de medição (i - 1) e (i)

As linhas em continuação aos símbolos da Figura 12 a partir de 2,2 km, indicam a tendência das curvas de convergir para o potencial de 1250 V.

Conforme constatado, portanto, no gráfico da Figura 12, as novas curvas de potenciais no solo do Eletrodo I partem do valor de 1250 V no seu centro e, a aproximadamente 3 km de distância do mesmo, se encontram

com as antigas curvas de potenciais.

O critério adotado para a elaboração das curvas de potenciais nas direções não medidas quando já existia o Eletrodo II consistiu, portanto, na manutenção do perfil de potenciais medidos sem a presença desse eletrodo, ajustando-se porém os gradientes de potenciais de modo a respeitar a redução de potencial no centro do Eletrodo I.

Para a definição do ajuste de cada curva, foi calculado um fator de redução a ser aplicado nos pares de pontos medidos sem a presença do Eletrodo II, localizados até 3 km do centro do Eletrodo I.

Este fator varia para cada direção considerada, e é calculado pela expressão:

$$\text{Fator} = \frac{\frac{V_n}{CE} - \frac{V}{3 \text{ km}}}{\frac{V_n}{CE} - \frac{V}{3 \text{ km}}}$$

onde:

$V_n$  = potencial no centro do eletrodo na curva CE antiga (sem Eletrodo II)

$V$  = potencial do centro do eletrodo na curva CE nova (com Eletrodo II)

$V$  = potencial do ponto de medição mais próximo 3 km de 3 km (comum às curvas nova e antiga)

As Figuras 13 e 14 apresentam as curvas nas rotas Oeste e Sudeste até 3 km do centro do Eletrodo I.

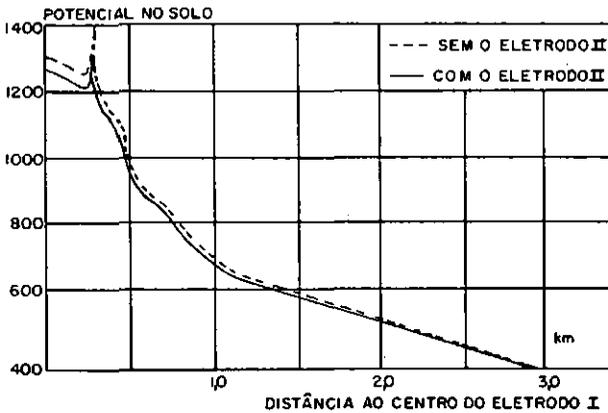


Figura 13  
Ibiúna - Bipolo I  
Curvas de Potenciais no Solo Medições  
Com e Sem o Eletrodo II - Direção Oeste

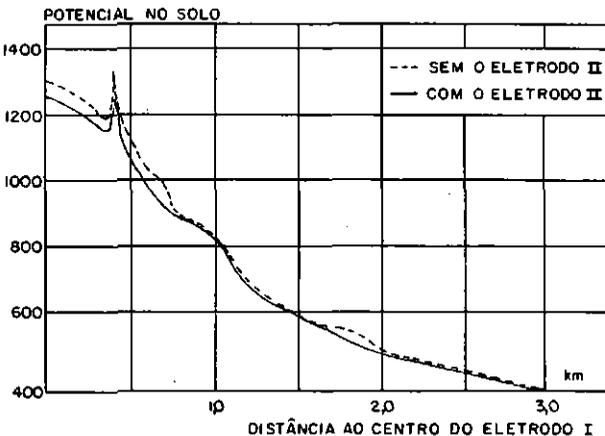


Figura 14  
Ibiúna - Bipolo I  
Curvas de Potencial no Solo Medições  
Com e Sem o Eletrodo II - Direção Sudeste

#### 4. CONCLUSÃO

Foi realizado um amplo levantamento de potenciais, especialmente na área de influência dos eletrodos de Ibiúna e, além da consolidação da metodologia de elaboração de curvas de potenciais de eletrodos de terra, puderam ser avaliados os seguintes aspectos:

- efeitos decorrentes da proximidade entre dois eletrodos de aterramento nas respectivas curvas de potencial;
- estabilidade das curvas de potenciais ao longo do tempo;
- metodologia para verificação dos resultados obtidos, e para a obtenção de um modelo em estrela do circuito formado por dois eletrodos de terra sujeitos a um acoplamento resistivo mútuo.

A metodologia para a elaboração das curvas de potenciais foi descrita com detalhe no texto do trabalho. Os três aspectos acima relacionados são brevemente comentados nos Anexos I, II e III a seguir.

#### ANEXO I

##### EFEITO DE DISTORÇÃO DAS CURVAS DE POTENCIAIS DO ELETRODO I NA DIREÇÃO QUE CRUZA A ÁREA ONDE SE LOCALIZA O ELETRODO II

De modo a permitir uma quantificação do efeito de distorção causado pelo Eletrodo II na curva de potenciais do Eletrodo I que passa sobre o mesmo, foram feitas duas séries de medições na rota E-SE. Esta rota parte do centro do Eletrodo I e se estende até 3 km do centro do mesmo, passando pelo centro do Eletrodo II.

A primeira série de medições foi feita da mesma forma que em todas as outras direções, isto é, com todos os cabos alimentadores do Eletrodo II conectados no seu barramento; a segunda série de medições foi feita com todos os alimentadores das diversas seções do Eletrodo II desligados. As curvas obtidas estão plotadas, respectivamente, em linha cheia e tracejada na Figura 15.

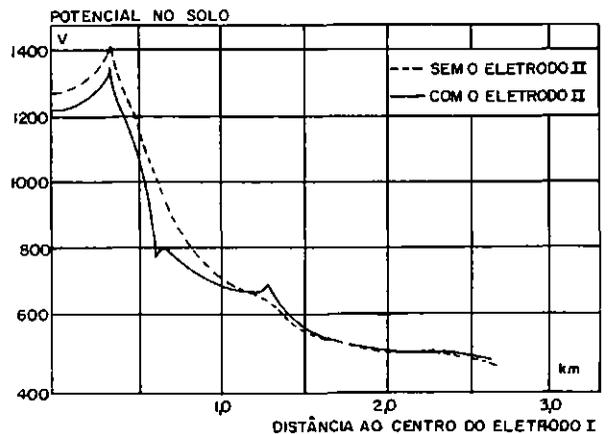


Figura 15  
Curvas de Potencial no Solo Medições  
Com e Sem o Eletrodo II - Direção Leste-Sudeste

Verifica-se que a segunda série de medições resultou em uma curva de potenciais muito semelhante à antiga curva do Eletrodo I, antes da construção do Eletrodo II. Esta última série de medições confirmou, portanto, a expectativa de que o efeito de distorção das curvas de potencial no solo do Eletrodo I é causado predominantemente pela circulação de correntes pelos alimentadores e pelo barramento do Eletrodo II, sendo muito reduzida a circulação de correntes pelo coque. Estas correntes são captadas pelo setor Oeste do Eletrodo II (mais próximo do Eletrodo I) e descarregadas pelo setor Leste do mesmo.

Conforme pode ser observado na Figura 15, o perfil da curva de potenciais E-SE revela uma elevação dos gradientes de potencial na região localizada entre os eletrodos, e uma brusca redução dos mesmos na região sobre o Eletrodo II, sendo que a partir de 1,5 km do centro do Eletrodo I a curva de potenciais denota o decaimento normal, não mais influenciada pelo Eletrodo II.

A inexistência do Eletrodo II foi, portanto, simulada na prática pela desconexão dos alimentadores de suas seções, na casa de chaveamento, tendo sido constatado que a introdução do Eletrodo II realmente produz, na curva, o patamar aludido.

**ANEXO II**

**ESTABILIDADE DAS CURVAS DE POTENCIAIS NO TEMPO**

Como as curvas medidas de potencial destinam-se à previsão de influências na área dos eletrodos ao longo de toda a vida útil dos mesmos [5], buscou-se obter uma avaliação de eventuais variações que pudessem ter lugar com o passar do tempo. Para isto aproveitou-se a ocasião da remediação das curvas do eletrodo do Bipolo I em Ibiúna, após 2,5 anos de sua medição inicial [2], [4]. Esta comparação foi realizada procurando eliminar os efeitos da implantação do Eletrodo II, examinados no anexo I, e que resultam na redução da resistência de aterramento do Eletrodo I. Para esta análise escolhemos a curva Norte, típica daquelas pouco afetadas pelo Eletrodo II pois situa-se geograficamente afastada do mesmo, e a curva SE, típica dentre aquelas muito afetadas pois localiza-se já bem próximo ao Eletrodo II, como se verifica na Figura 16.

Em cada rota foi tomada a relação entre os gradientes medidos depois e antes da implantação do Eletrodo II, que deram origem à Figura 17. Para distâncias menores do que 1,0 km do centro do Eletrodo I, ambas as curvas mostram amplas oscilações, que podem ser atribuídas à presença do Eletrodo II, sendo porém mais pronunciadas na curva SE, cuja rota mais se aproxima desse eletrodo. A maiores distâncias, a relação tende à unidade por valores inferiores, pois como mencionado, a resistência de aterramento do Eletrodo I reduziu-se com a implantação do Eletrodo II.

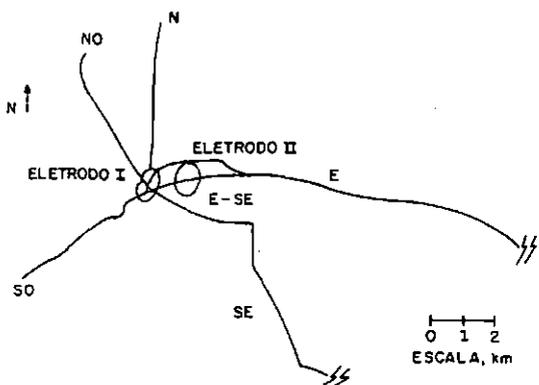


Figura 16  
Ibiúna - Bipolo I  
Direções de Medição com  
Corrente no Eletrodo I

Observa-se que, em ambas as curvas a relação oscila em torno da média, o que pode ser atribuído a variações locais na resistividade, ou talvez a deslocamentos na posição de algum ponto de medição. Nas outras curvas o comportamento foi parecido, podendo-se aceitar uma faixa de  $\pm 10\%$  para as variações (de caráter oscilatório) provocadas pela passagem do tempo, conforme se depreende da Figura 17.

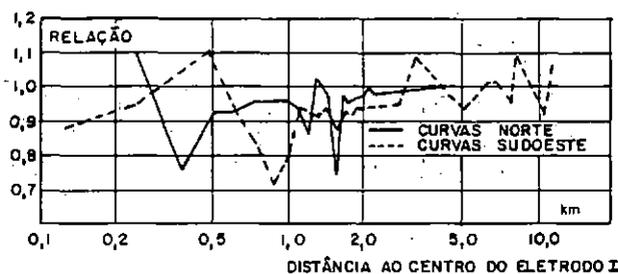


Figura 17  
Ibiúna - Bipolo I  
Comparação de Gradientes

**ANEXO III**

**VERIFICAÇÃO DOS POTENCIAIS MEDIDOS NOS ELETRODOS DE IBIÚNA, E CÁLCULO DE UM MODELO EM ESTRELA DOS DOIS ELETRODOS CONSIDERANDO O ACOPLAMENTO RESISTIVO ENTRE OS MESMOS**

De modo a se dispor de uma verificação adicional para os resultados das medições realizadas em Ibiúna, foram feitas duas séries de medições de potenciais entre os dois eletrodos.

Cada uma destas séries consistiu na injeção de corrente em um dos eletrodos, e na medição de potenciais entre pares de pontos que se iniciam na casa de chaveamento do eletrodo energizado e prosseguem até a casa de chaveamento do eletrodo vizinho, conforme ilustrado na Figura 18.

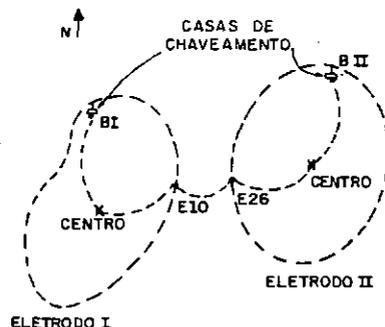


Figura 18  
Ibiúna - Bipolos I e II  
Pares de Pontos onde foram Medidas as  
Diferenças de Potenciais, Utilizadas no Cálculo  
da Resistência Mútua entre os Eletrodos

A Figura 19 apresenta os perfis de potenciais obtidos a partir destas medições, e tendo por referência os valores estabelecidos de potencial absoluto para os centros dos eletrodos.

A Figura 20 apresenta o circuito equivalente em estrela que é possível obter a partir das medições indicadas nas Figuras 18 e 19.

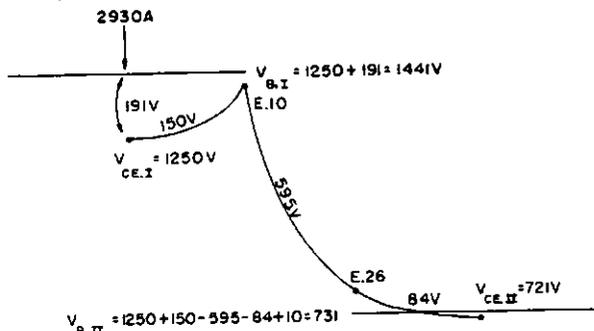
Cumprir destacar a excelente concordância observada entre os dois valores de resistência mútua obtidos, respectivamente  $0,250 \Omega$  e  $0,254 \Omega$  para corrente nos Eletrodos I e II, com um desvio de apenas 0,8% em relação ao valor médio.

Esta verificação final permitiu a constatação da adequabilidade da metodologia utilizada na construção das curvas de potencial de ambos os eletrodos e do grau de precisão obtido para um levantamento de tamanha amplitude, considerando o elevado número de medições, a grande área abrangida pelas mesmas e ainda o longo tempo decorrido entre as diversas fases de medição.

Fica ainda demonstrado que é possível obter a resistência de aterramento de um eletrodo sem realizar medições até o ponto remoto, quando se conhece a resistência de aterramento de outro eletrodo vizinho e a diferença de potencial entre os mesmos, para injeção de corrente no primeiro. O mesmo princípio se aplica ao

caso de eletrodos compostos de muitos elementos, ou quando um eletrodo existente for aumentado.

INJEÇÃO DE CORRENTE NO ELETRODO I:



INJEÇÃO DE CORRENTE NO ELETRODO II:

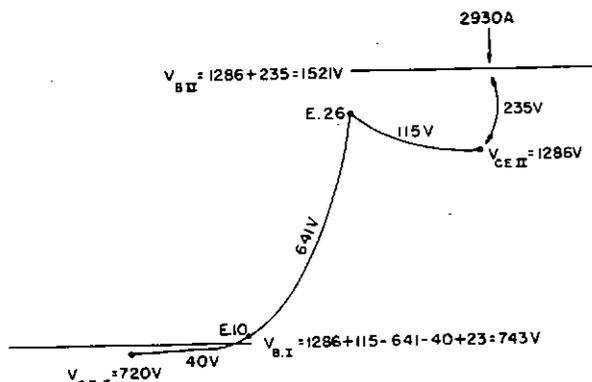


Figura 19  
Ibiúna - Bipolos I e II  
Potenciais Medidos nas Áreas dos Eletrodos

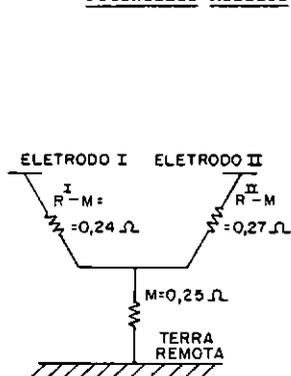


Figura 20  
Ibiúna - Bipolos I e II  
Modelo do Circuito Elétrico dos Eletrodos

Na Figura 20, identificamos:

- I II  
R , R - resistências de aterramento dos eletrodos I e II: 0,49Ω e 0,52Ω respectivamente;
- M - resistência de aterramento mútua entre os eletrodos I e II, Ω ;
- I  
M - idem, calculada a partir da injeção de corrente no Eletrodo I, Ω ;
- II  
M - idem, calculada a partir da injeção de corrente no Eletrodo II, Ω ;
- I II  
V , V - tensão no anel do eletrodo energizado para uma injeção de 2930 A nos eletrodos I ou II: 1441 V e 1521 V respectivamente;
- I II  
V' , V' - tensão no anel do eletrodo não energizado para uma injeção de 2930 A no eletrodo vizinho: 731 V e 743 V, respectivamente, para injeção nos Eletrodos I e II.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Kovarsky, L. Pinto, C.E. Caroli, N. Santos "Soil Surface Potentials Induced by Itaipu HVDC Ground Return Current - Part I - Theoretical Evaluation" - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, Nº 3, Julho 1988 pp 1204-1210.
- [2] C.E. Caroli, N. Santos, D. Kovarsky, M. Marques "Soil Surface Potentials Induced by Itaipu HVDC Ground Return Current - Part II - Measurements" - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, Nº3, Julho 1988 pp 1211-1216.
- [3] C.E. Caroli, N.Santos, J. Pereira, D. Kovarsky, C. Martini, L. Pinto. "Medição dos Potenciais na Superfície do Solo devido à Operação Monopolar do Sistema CCAT de Itaipu" VIII SNPTEE S. Paulo, 1986.
- [4] C.E. Caroli, N. Santos, J. Nagoya, J. Pereira, D. Kovarsky, M. Marques, L. Pinto, "Medição de Potencial de Toque em Cercas e Tubulações, nas Áreas de Influência dos Eletrodos do Sistema CCAT de Itaipu" IX SNPTEE - Belo Horizonte, 1987.
- [5] C.E. Caroli, N. Santos, D. Kovarsky, L. Pinto "Mitigation of Touch Voltages in Fences and Water Pipes, Caused by Itaipu HVDC Ground Electrodes" - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, Nº 1, Janeiro 1987, pp 281-288.