

# TESTES EM ELETRODOS UTILIZADOS EM MEDIDAS MAGNETOTELÚRICAS

**Aluno:** Denis Fernando da Silva, bolsista PIBIC/CNPq

**Escola:** Universidade de Taubaté (UNITAU)

**Orientador:** Dr. Ícaro Vitorello, pesquisador da Divisão de Geofísica Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

## RESUMO

A medida das variações do campo telúrico requer instrumentos estáveis para a coleta de dados em uma faixa de longo período. Parte integrante dos equipamentos utilizados nas medições são os eletrodos, responsáveis pela aquisição dos dados referentes às variações do campo elétrico. Deste modo, torna-se de fundamental importância o fato de que estes eletrodos estejam em excelentes condições de uso para aumentar a confiabilidade dos dados adquiridos em trabalhos de campo. Aqui, o objetivo é analisar quais dentre os eletrodos disponíveis no Laboratório da Divisão de Geofísica Espacial do INPE estão em condições de oferecer os melhores resultados nas medições magnetotelúricas. Para isto foram feitos testes para saber como se comportariam estes eletrodos. Os pares de eletrodos referentes às direções Norte-Sul e Leste-Oeste foram colocados lado a lado separados por uma distância de 75 metros e ligados ao Sistema Magnetotelúrico de Longo Período (LRMT), que é o aparelho que mede a variação da tensão entre os eletrodos. Os resultados serão apresentados com base nestes valores de variação de tensão fornecidos pelo LRMT, sob a forma de comparação entre os diferentes pares de eletrodos.

## REFERÊNCIAS

Filloux, J. H., "Instrumentation and experimental methods for oceanic studies", In *Geomagnetism* Vol. 1 (ed. Jacobs, J. A.), (Academic Press, London 1987);

Junge, A., "A New Telluric KCl Probe Using Filloux's AgAgCl Electrode", In *Pure and Applied Geophysics* Vol.134, Número 4, Dezembro de 1990;

Petiau, G., and Dupis, A. (1980), "Noise, Temperature Coefficient, and Long-time Stability of Electrodes for Telluric Observations", In *Geophysical Prospecting* 28, 792-804.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL  
DE PESQUISAS ESPACIAIS

**RELATÓRIO DE BOLSA  
DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
PIBIC**

**Assunto:** Indução Eletromagnética no Platô da Serra do Mar

**Orientador:** Ícaro Vitorello

**Aluno:** Denis Fernando da Silva

**Período da Bolsa:** 01/08/1998 até 31/07/1999

## 1. Introdução

Este relatório detalha as atividades realizadas, neste programa de iniciação científica, relacionado com as aplicações de sistemas de aquisição de dados de indução eletromagnética para faixas de alta e de baixa frequência das ondas eletromagnéticas naturais. Primeiramente, foi revista a base teórica de indução geomagnética, e em seguida foram realizados os trabalhos experimentais inicialmente propostos. Todas as tarefas programadas foram feitas dentro do prazo previsto, as quais estão relacionadas com os estudos de indução eletromagnética, testes de calibração dos instrumentos do laboratório, e participação na coleta e análise de dados colhidos em trabalhos de campo.

## 2. Estudos Bibliográficos

### 2.a. Conceitos

A fim de realizar o trabalho proposto foi necessário iniciar com revisões sobre as teorias básicas sobre indução eletromagnética, desde as Equações de Maxwell e algumas aplicações em casos particulares, para as quais a densidade de cargas em certas ocasiões é considerada como sendo zero.

Em seguida, foi realizado um estudo sobre um caso especial das ondas eletromagnéticas, as chamadas ondas planas, já que a propagação dessas ondas ilustra de forma perfeita a dependência mútua entre campos elétricos e magnéticos sobre a superfície da Terra. A variação de um campo magnético com o tempo gera um campo elétrico. A variação com o tempo deste campo elétrico gera um campo magnético também variável e assim o processo se repete indefinidamente. Também é importante conhecer como a onda eletromagnética se propaga em um meio condutor, ou seja, na ausência de cargas livres mas não na ausência de correntes elétricas. O vetor de onda neste caso é um número complexo e dependente de  $\mu_0$ ,  $\epsilon$ ,  $\omega$  e  $\sigma$  e a espessura pelicular é definida a partir da componente imaginária do vetor de onda. Quando uma onda se desloca na direção de propagação, sua amplitude é atenuada por  $e^{-1}$ . Aplicando ao vetor de onda um caso particular para o qual o meio em estudo é um bom condutor, simplificamos assim a equação para a espessura pelicular

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega \sigma}}, \quad (1)$$

onde:

$\mu_0$  é a permeabilidade no vácuo;

$\omega$  é frequência angular;

$\sigma$  é a condutividade.

Fazendo-se um desenvolvimento das Equações de Maxwell chegamos à seguinte relação entre  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$ , chamada impedância  $Z$ :

$$Z = \frac{E}{H} = (1-i)\sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}}, \quad (2)$$

$$\rho = \frac{Z \cdot Z^*}{\mu_0 \omega}, \quad (3)$$

onde:

$\rho$  é a resistividade;

$Z^*$  é o complexo conjugado de  $Z$ .

Sobre a teoria de ondas eletromagnéticas, o que mais nos interessa são as relações (1) e (3), que são muito importantes para o método magnetotelúrico (MT).

Após os estudos sobre eletromagnetismo em geral [ Kraus & Carver, 1986 ], iniciou-se o estudo sobre o método MT em si. Basicamente, o método MT busca determinar a distribuição da condutividade elétrica das camadas abaixo da superfície terrestre através de medições das variações dos campos elétricos e magnéticos na superfície da Terra. Estas variações temporais podem ser analisadas por computador para se obter o seu espectro, a resistividade aparente, e a fase em função da frequência [ Vozoff, 1972 ]. Consequentemente, podemos saber a profundidade correspondente a esta resistividade aparente. Quanto menor a frequência da onda, maior a profundidade atingida nas medições. Neste método, os pares de componentes ortogonais horizontais dos vetores campo elétrico e campo magnético ( $E_x$ ,  $H_y$  ou  $E_y$ ,  $H_x$ ) são medidos, como já foi dito, através da variação com o tempo desses vetores sobre a superfície da Terra. Uma análise dos problemas eletromagnéticos de condições de contorno para a chamada terra homogênea demonstra que a resistividade é dada pela equação

$$\rho(\omega) = \frac{1}{\mu\omega} |I(\omega)|^2 = \frac{1}{\mu\omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = \frac{1}{\mu\omega} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2, \quad (4)$$

onde:

$I(\omega)$  é a impedância intrínseca da Terra;

$I(\omega)$  e  $\rho(\omega)$  são independentes da frequência para uma Terra verdadeiramente homogênea. De qualquer modo, para Terra estratificada a medida da resistividade é dada pela seguinte expressão

$$\rho_a(\omega) = \frac{1}{\mu\omega} |Z(\omega)|^2, \quad (5)$$

onde:

$Z(\omega)$  é a impedância na superfície da Terra.

A resistividade aparente  $\rho_a(\omega)$  representa uma média ponderada para todas as camadas e é a resistividade equivalente de um “meio espaço” homogêneo para a frequência  $\omega$ . Para um meio anisotrópico ou para uma Terra não homogênea lateralmente, a impedância aparece como uma quantidade tensorial.

## **2.b. Aplicações**

Após um primeiro contato com as técnicas do MT, iniciou-se paralelamente um levantamento básico sobre a estrutura geológica da região em estudo, a Bacia de Taubaté, ou seja, sobre processos de sedimentação e rochas sedimentares [ Padilha et

al., 1991 ]. Outro estudo de revisão também realizado é sobre o modelo de Terra estratificada, contendo camadas com resistividades diferentes, modelo este que se aproxima das condições reais [ Cagniard, 1952 ]

Foi realizado também uma revisão sobre o comportamento de eletrodos, mais especificamente sobre ruídos e tempo de estabilização dos eletrodos que utilizamos (Cd-CdCl<sub>2</sub> e Pb-PbCl<sub>2</sub> ). Estas soluções ficam contidas em pequenos vasos cilíndricos com um fundo de porcelana porosa para fornecer melhor contato com o solo. O motivo da utilização de eletrodos com estas substâncias reside no fato que apresentam baixo ruído e levam pouco tempo para estabilizar [ Petiau & Dupis, 1980 ].

### **3. Atividades experimentais**

Foram realizadas atividades de calibração e aferição da qualidade de alguns dos aparelhos do laboratório, como por exemplo os eletrodos a serem utilizados pelo Sistema Magnetotelúrico de Longo Período ( LRMT ). De acordo com o fabricante, a tensão DC entre cada par de eletrodos não poderia ultrapassar 5 mV e a resistência interna entre eles não deveria ser maior que 100 ohms para haver um perfeito funcionamento. Ao usar o multímetro para a medição desta tensão DC, o aparelho indicava um valor para esta tensão, e obviamente ao invertermos a polaridade, este valor apenas passava a ser negativo. Já para medirmos a resistência, esta variava de acordo com a posição do ohmímetro nos terminais dos eletrodos, e na maioria das vezes esta variação não era tão pequena.

Foram realizadas também atividades envolvendo programas comerciais de análise de dados, como o PROCMT e o EMPROG. O PROCMT é um programa que faz a análise dos dados e os apresenta na forma de séries temporais dos sinais medidos dos campos elétricos e magnéticos em suas respectivas direções, além de fazer gráficos de resistividade aparente contra frequência, e fase contra a frequência. Porém, esta tarefa de desenhar gráficos geralmente era realizada no outro programa, o EMPROG, que permite uma melhor apresentação e visualização destas ilustrações, além de possibilitar várias mudanças nos parâmetros utilizados, facilitando várias operações que o PROCMT não permite realizar. Outro programa utilizado é o desenvolvido pela companhia Magellan, o qual utilizamos para descarregar os dados do Sistema de Posicionamento Global ( GPS ), arquivar e processar estes dados. Assim por exemplo, uma análise estatística nos dados armazenados nos permite fornecer a melhor posição média de um determinado local. O GPS é um aparelho que permite, entre outras coisas, determinar com exatidão a posição geográfica onde estamos fazendo as medições de campo.

Após conhecer a utilização dos programas e manuseio dos equipamentos, foi realizada uma primeira viagem ao campo para fazer testes com alguns dos aparelhos. Nesta viagem, pode-se verificar a instalação e funcionamento dos equipamentos do Sistema Audiomagnetotelúrico ( AMT ), MT e LRMT. Foram instalados, em uma mesma área, todos estes três tipos de aparelhos, para que pudesse ser feita uma comparação dos resultados obtidos por cada um dos equipamentos, visto que parte dos dados levantados por cada um dos equipamentos se sobrepõem. Deste modo, o uso simultâneo facilitou uma análise do desempenho de cada um dos aparelhos, e principalmente se os resultados foram os esperados. A diferença básica de funcionamento dos três aparelhos está na faixa de frequência em que cada um trabalha. O AMT opera com uma faixa de frequência que vai de 8 Hz até 2500 Hz. O MT

trabalha com uma faixa que vai aproximadamente de  $10^4$  Hz até  $10^{-2}$  Hz. Já o LRMT opera em uma faixa de frequência que vai de 0,25 Hz até  $10^{-4}$  Hz. Esta faixa de frequência em que o aparelho trabalha vai determinar a profundidade das medições. Portanto, o LRMT é o que apresenta uma maior profundidade em seus resultados.

Sobre os aparelhos do laboratório, é necessária a manutenção e limpeza de cada um dos equipamentos utilizados no trabalho de coleta de dados, principalmente após as viagens ao campo, já que nestas, parte dos aparelhos ficam expostos às condições climáticas. Toda esta manutenção tem o intuito de aumentar a vida útil dos equipamentos.

Em testes feitos com o LRMT, um dos sistemas apresentou um pequeno problema em um dos canais onde eram colocados um dos pares de eletrodos de sais de chumbo. O procedimento que adotamos foi trocar algumas das placas internas do sistema e observar durante testes de pequenos períodos os resultados que eram coletados. Percebemos que o mesmo não apresentava mais os problemas antigos, o que nos levou a crer que uma das placas trocadas realmente não estava com suas condições de uso normalizada. O procedimento a ser adotado agora é uma continuação da seqüência de testes até encontrarmos qual das placas trocadas anteriormente está defeituosa substituindo-a pelas antigas. A maior dificuldade com relação à manutenção do LRMT é a de que não foi fornecido pelo fabricante um esquema de seus circuitos internos, para que fosse possível analisar com mais confiança o verdadeiro funcionamento das partes que regem o sistema.

Foram adquiridas neste período mais três baterias de 12 V e 65 Ah para atuar no campo e evitar que nosso trabalho de coleta de dados tivesse que ser interrompido por falta de baterias. Isto porque cada bateria usada em um LRMT dura em média 6 dias e não tínhamos baterias disponíveis para todos os equipamentos, algo que nos fornecesse uma margem de segurança. As baterias do laboratório são constantemente recarregadas para que estejam em boas condições de uso sempre que haja a necessidade de se fazer uma campanha ou testes dos equipamentos,

Outro problema que tínhamos em campo eram os cabos coaxiais, pois seus conectores de entrada dos eletrodos e o conector para ligação nos canais do LRMT apresentava uma isolação ruim, o que provocava um sinal com amostras de ruído durante as coletas. A solução encontrada foi separar o terra e o interno do cabo coaxial para diminuir o ruído e fazê-los com conectores do tipo banana. A outra ponta do cabo onde é conectado o eletrodo foi substituída por um outro do tipo borne que possibilitasse fazer uma melhor isolação para que não entrasse água e nem terra.

Apesar dos problemas de isolação terem sido resolvidos ainda ocorrem casos em que os conectores se soltam dos cabos, principalmente os conectores do tipo banana que ficam para fora do rolo e que sofrem com os impactos ao enrolarmos e desenrolarmos os cabos. Estamos buscando uma solução para esse inconveniente, que seria fazer um furo adicional na parede interna do rolo para que as pontas dos conectores banana ficassem presos e protegidos.

Antes de uma das viagens ao campo, foram realizados testes que simulavam situações reais encontradas durante a coleta de dados. Um problema que acontece quando os equipamentos estão em funcionamento é devido à ocorrência de alguma tempestade. Para que os aparelhos não sejam danificados pelos raios que atingem a região onde as medidas estão sendo feitas, os eletrodos são simplesmente desconectados temporariamente do LRMT. Durante este período, o aparelho continua funcionando, mas obviamente os dados coletados são prejudicados. Ocorre que quando os eletrodos

são conectados novamente ao LRMT, estes demoram um grande tempo para ter seu perfeito funcionamento restabelecido. A solução encontrada foi a seguinte: os terminais dos eletrodos são ligados uns aos outros, colocando-os em curto-circuito, antes dos eletrodos serem desconectados do LRMT. Após o período da tempestade, os eletrodos são ligados ainda em curto-circuito, e depois que este é desfeito, os eletrodos passam a ter o seu funcionamento normalizado mais rapidamente que o esperado. Este método mostrou-se muito eficaz nos testes realizados.

Foi desenvolvido um trabalho de campo nas regiões de Monteiro Lobato (SP), Santa Isabel (SP) e outra no Bairro de Freitas em São José dos Campos. Nos entretemos a estudar a influência da Estrada Ferro de Campos do Jordão (EFCJ) nos dados em que coletamos, pois nesta região a rede elétrica do trem provoca um ruído nos dados coletados e portanto é de grande importância que analisemos estas informações. A EFCJ permanece acionada durante todo o dia e apenas é desligada durante a noite. Deste modo, pode-se comparar os dados desses períodos e observar até qual região a EFCJ influencia nas medições. Em todas as localidades escolhemos regiões mais planas possíveis, preferencialmente descampadas, que são as indicadas para essas medidas.

A medida das variações do campo telúrico requer instrumentos estáveis para a coleta de dados em uma faixa de longo período. Parte integrante dos equipamentos utilizados nas medições são os eletrodos, responsáveis pela aquisição dos dados referentes às variações do campo elétrico. Deste modo, torna-se de fundamental importância o fato de que estes eletrodos estejam em excelentes condições de uso para aumentar a confiabilidade dos dados adquiridos em trabalhos de campo. Um importante teste realizado indicou quais dentre os eletrodos disponíveis no Laboratório da Divisão de Geofísica Espacial do INPE estão em condições de oferecer os melhores resultados nas medições magnetotelúricas, utilizando os equipamentos do LRMT. Em campo, os eletrodos do LRMT são instalados da seguinte forma: os pares de eletrodos são separados por uma distância de 150 metros e alinhados de acordo com as direções Norte-Sul e Leste-Oeste (Figura 1). Deste modo, as medidas são feitas entre duas direções perpendiculares entre si, cada qual com seu resultado. Neste teste, para cada aparelho do LRMT, os pares de eletrodos foram colocados lado a lado, separados por

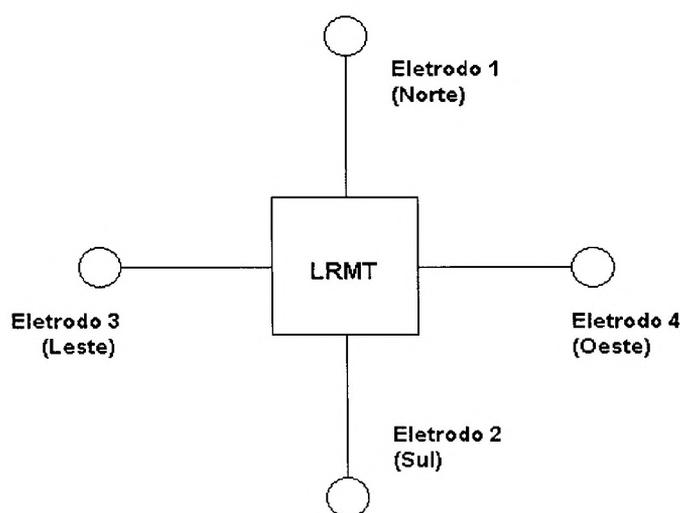


Figura 1

uma distância de 75 metros e orientados em direções aleatórias (Figura 2). A idéia é a seguinte: estando colocados bem próximos e alinhados nas mesmas direções, o LRMT deve receber os mesmos sinais quando os pares estiverem em boas condições de uso. Caso isso não aconteça, ou seja, se os espectros dos sinais medidos forem diferentes, os eletrodos não estarão apropriados para uso.

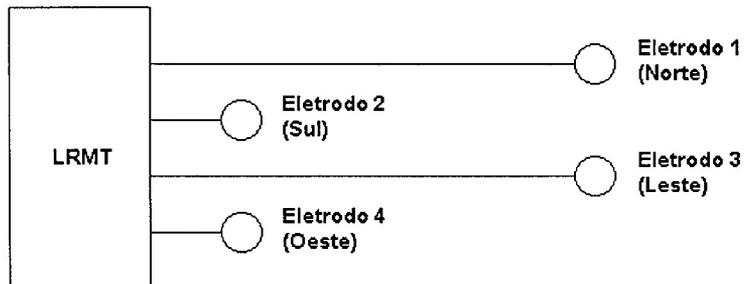


Figura 2

A Figura 3 mostra um gráfico exemplificando o espectro de pares de eletrodos que não estão adequados para o uso. Pode-se notar nitidamente que cada par de eletrodos está

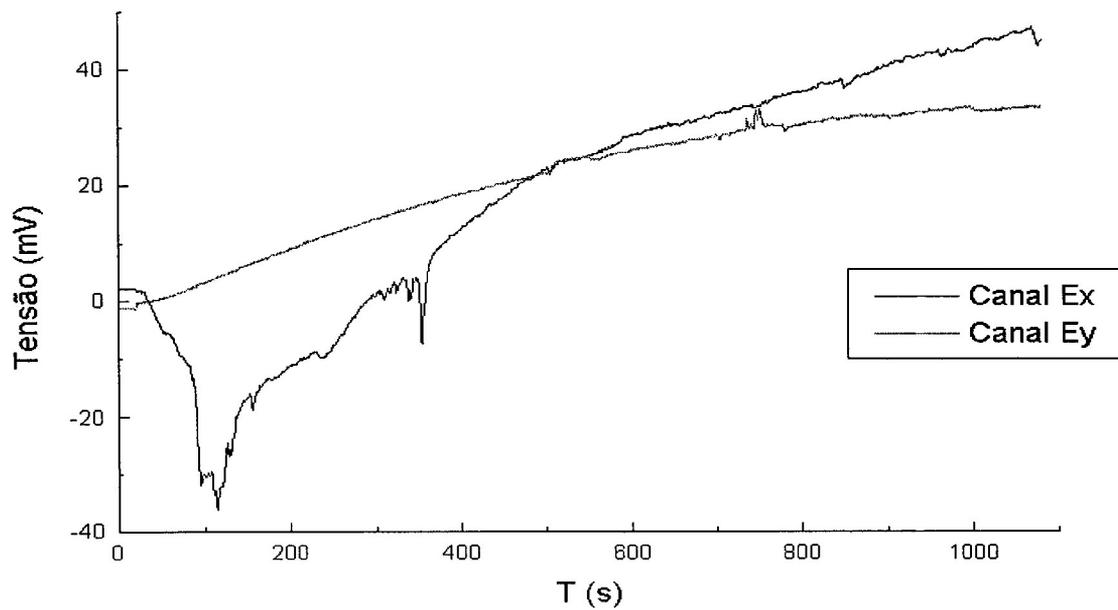


Figura 3

medindo um valor de tensão diferente do outro, sem que pelo menos suas variações sejam parecidas.

A Figura 4 exemplifica dois pares de eletrodos que apresentam um bom funcionamento. Mesmo que os valores de tensão medida terem sido ligeiramente diferentes, percebe-se que a forma de suas variações é praticamente a mesma, o que indica a boa condição destes equipamentos. Nestas 2 figuras, cada uma das curvas é referente a um par de eletrodos específico, sendo que cada aparelho do LRMT comporta dois pares de eletrodos por vez. Estes gráficos mostram os valores da tensão em função do período medido para apenas 2 dos testes realizados. Porém, foram feitas várias outras baterias de testes para que fosse possível fazer um levantamento dos eletrodos que estão funcionando em boas condições. Os valores de tensão estão em microvolts e os valores de período estão em segundos.

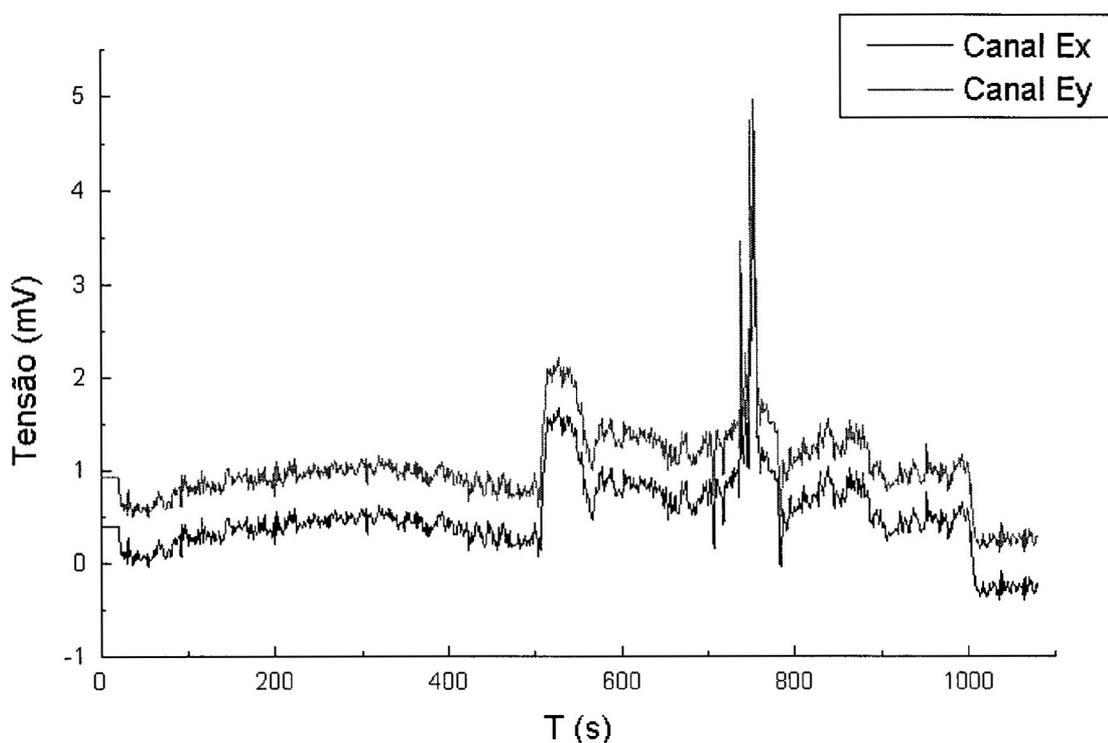


Figura 4

Para que fossem realizados estes testes com os eletrodos, foi necessário obter uma grande familiarização com o equipamento do LRMT, bem como com o programa que utilizamos para colocar o aparelho em funcionamento, o "Lims versão 8.1" desenvolvida pelo fabricante do equipamento. Este programa é utilizado para fornecer os comandos necessários para que o LRMT comece a fazer a coleta de dados, além de apresentar gráficos dos resultados obtidos depois das medições realizadas.

#### **4. Atividades a serem desenvolvidas no próximo período**

Nesta continuação do trabalho, serão realizadas atividades de manutenção e aferição da qualidade dos equipamentos do laboratório, além de viagens para coleta de dados em campo. Em relação aos eletrodos será concentrada maior atenção aos estudos das

influências sofridas com as variações de temperatura quando estes estão em funcionamento. Também serão feitas constantes atualizações dos testes para identificar quais eletrodos estão em boas condições de uso.

Outros testes a se realizar são sobre o equipamento do LRMT, pois como já foi citado, foram detectados alguns problemas no funcionamento deste aparelho.

## **5. Referências**

Cagniard, L., “Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting”, *Geophysics* , 18, pág. 605-635 (1952);

Filloux, J.H., “Electrode principles and behavior”, *Geomagnetism* , vol. 1, (1987) pág. 193-196 , Edited by J.A. Jacobs;

Junge, A., “A New Telluric KCl Probe Using Filloux’s AgAgCl Electrode”, *Pure and Applied Geophysics* Vol. 134, Número 4, Dezembro de 1990;

Kraus, J.D., Carver, K.R. , *Eletromagnetismo* , Ed. Guanabara, (1986);

Padilha, A.L., Trivedi, N.B., Vitorello, Í. e da Costa, J.M., “Geophysical constraints on tectonic models of the Taubaté Basin, southeastern Brazil”, *Tectonophysics* , 196 (1991) pág. 157-172;

Petiau, G. and Dupis, A., “Noise, temperature coefficient, and long time stability of electrodes for telluric observations”, *Geophysical Prospecting* , 28 , (1980) pág. 792-804;

Press, F. and Siever, R. , *Earth* , W.H. Freeman and Company, pág. 447-488;

Vozoff, K., “The Magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins”, *Geophysics* , vol. 37, fevereiro de 1972, pág. 98-141;