



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.26.17.07-RPQ

**RELATÓRIO TÉCNICO DE ATIVIDADES ETAPA 1:
DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
PROGRAMAS PARA VISUALIZAÇÃO DE MODELOS
3D DE DADOS GEOFÍSICOS**

Fernando Luiz Prochnow Ramme

Projeto: CNPq31423720143

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JNRTK8>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.26.17.07-RPQ

**RELATÓRIO TÉCNICO DE ATIVIDADES ETAPA 1:
DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
PROGRAMAS PARA VISUALIZAÇÃO DE MODELOS
3D DE DADOS GEOFÍSICOS**

Fernando Luiz Prochnow Ramme

Projeto: CNPq31423720143

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JNRTK8>>

INPE
São José dos Campos
2015



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.



PCI/MCTI/INPE
RELATÓRIO TÉCNICO DE ATIVIDADES
<v7>

[*Referente ao período: 01/11/2014 a 30/06/2015*]

Número do Processo Institucional: 455097/2013-5

Número do Processo Individual: 314237/2014-3

Bolsista: Fernando Luiz Prochnow Ramme

Supervisor: Antonio Lopes Padilha

Área: CEA-Ciências Espaciais e Atmosféricas

Vigência original da bolsa: [01/11/2014 a 31/10/2017]

Modalidade da bolsa: PCI-DA



RELATÓRIO TÉCNICO

Desenvolvimento e Implementação de Programas para Visualização de Modelos 3D de Dados Geofísicos

1 Histórico

Os resultados dos estudos relacionados ao processamento computacional paralelo em grandes volumes de dados, para problemas em modelagem e inversão eletromagnética de banda larga tridimensional, foram apresentados pelos autores Alumbaugh, Newman e Shadid (1996), Newman e Alumbaugh (1997).

Jones (1994) descreveu um formato de dados J-format para arquivos de dados geofísicos magnetotelúricos, na versão 2.0. Jones (1999) descreveu o formato de dados TS-format utilizado por equipamentos de aquisição de dados geofísicos magnetotelúricos, na versão 1.3. Ambos formatos são utilizados pelo grupo de geomagnetismo no INPE, durante a aquisição e pré-processamento dos dados geofísicos magnetotelúricos.

Parker e Booker (1996) desenvolveram uma técnica, Rhoplus, para ajudar a verificar se as medidas são compatíveis, bem como um método de processamento de inversão MT 1D. O grupo de geomagnetismo no INPE utiliza a técnica de verificação se as medidas são compatíveis no pré-processamento dos dados geofísicos magnetotelúricos.

Gary Egbert (1997) apresentou o desenvolvimento e implementação de um conjunto de códigos (Electromagnetic Transfer Functions File Conversion Utilities - EMTF FCU) para o processamento de dados geofísicos de séries temporais, sendo parte do atual subsistema de pré-processamento de dados utilizado no INPE.

Um método eficiente de inversão 2D de dados geofísicos magnetotelúricos, denominado REBOCC, foi desenvolvido por Siripunvaraporn e Egbert (2000). O grupo de geomagnetismo no INPE utiliza esse método.

Os resultados dos estudos relacionados a inversão de dados magnetotelúricos para estruturas tridimensionais, foram apresentados pelos autores Newman e Alumbaugh (2000). Siripunvaraporn, Uyeshima e Egbert (2004) apresentaram a implementação de um sistema de inversão MT 3D (WSINV3DMT), foi atualizado por Siripunvaraporn, Egbert, Lenbury e Uyeshima (2005), e por Siripunvaraporn e Egbert (2009).

Os pesquisadores do grupo de geomagnetismo no INPE, doutores Pádua, Vitorello e Padilha (2007), apresentaram os resultados de um estudo de caso utilizando a modelagem MT 3D, no 10º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica.

O início do desenvolvimento de um sistema modular de inversão de dados magnetotelúricos para estruturas tridimensionais (ModEM MT 3D) foi apresentado por Kelbert e Egbert (2007). O sistema foi atualizado por Egbert, Kelbert, Meqbel e Weng (2010). O sistema foi atualizado por Egbert e Kelbert (2012). O sistema foi atualizado por Kelbert, Meqbel, Egbert e Tandon (2014).

O desenvolvimento do sistema WALDIM, para verificar a dimensionalidade (2D ou 3D) dos dados, de modo a subsidiar o processamento da inversão de dados magnetotelúricos, foi feito por Marti, Queralt e Ledo (2009).

A Figura 1 apresenta uma síntese dos principais participantes do processo contínuo de desenvolvimento de aplicativos de código-aberto, para possibilitar o processamento de dados geofísicos magnetotelúricos do interior terrestre.

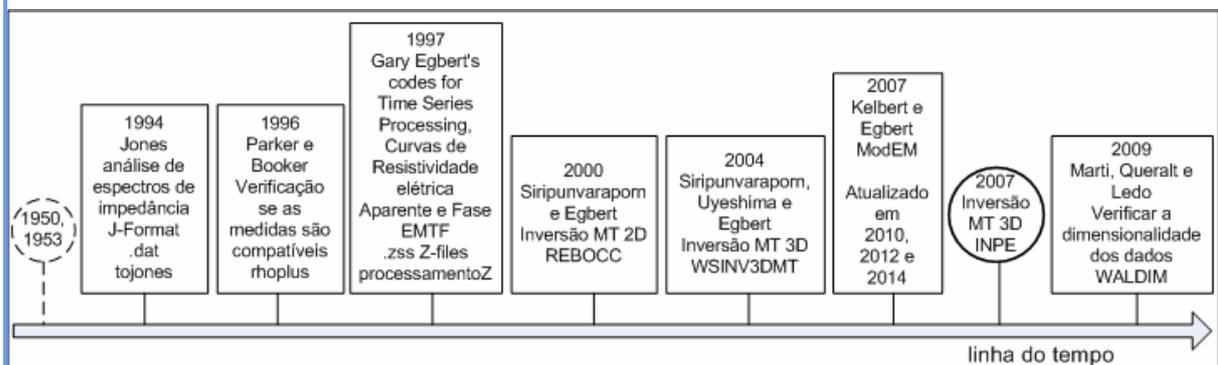


Figura 1: Síntese da evolução histórica dos principais sistemas de código aberto empregados no processamento magnetotelúrico

2 Resumo do Projeto

Uma parte importante dos estudos de Geomagnetismo desenvolvidos no INPE vincula-se com o uso da parte induzida do campo geomagnético medido na superfície, nesse caso específico gerado por correntes elétricas internas à Terra, para aferir a distribuição da condutividade elétrica no interior da Terra. O mapeamento dessa variação tanto lateral como em profundidade da condutividade elétrica, é uma informação fundamental tanto para Geofísica Básica como para Geofísica Aplicada e em estudos Geotectônicos.

A modelagem computacional é um dos aspectos mais críticos para a obtenção deste mapeamento, envolve técnicas sofisticadas de inversão dos dados, em especial, modelagens tridimensionais - 3D - em regiões geologicamente mais complexas. A implantação desse procedimento de inversão 3D para grandes volumes de dados experimentais é extremamente complexa e traz novos desafios na parte computacional.

O projeto consiste em desenvolver novos códigos computacionais para, principalmente, auxiliar na visualização dos modelos obtidos, em sua



consolidação com outras informações geológicas e geofísicas. Os aplicativos serão desenvolvidos em ambiente de sistema operacional GNU/LINUX, utilizando ferramentas computacionais de licença pública.

3 Objetivo

O objetivo principal do projeto "Desenvolvimento e Implementação de Programas para Visualização de Modelos 3D de Dados Geofísicos" é solucionar parte das novas complexidades e desafios que a recente implantação da inversão 3D de grandes volumes de dados de indução eletromagnética traz para sua análise. Um dos aspectos críticos nesse caso é a visualização dos modelos 3D obtidos, tanto em seções como em volume. Também, a combinação por meio de um sistema de visualização gráfica, de dados georreferenciados obtidos das estações de medida, com sistemas de referência adotados durante o processamento, com outras informações geofísicas e geológicas em diferentes sistemas geodésicos de referência, é essencial para apoiar na compreensão das informações e de conhecimentos acerca da região de interesse em estudo.

O cronograma de execução do projeto prevê a realização das seguintes etapas:

ETAPA 1 - Familiarizar-se com os procedimentos e códigos existentes na preparação de dados de indução eletromagnética, utilizados na inversão da sondagem magnetotelúrica (MT), empregado para a obtenção de modelos geofísicos do interior da Terra.

ETAPA 2 - Desenvolver e implementar novos códigos computacionais que permitam a visualização de modelos obtidos através de processos de inversão 3D dos dados experimentais.

ETAPA 3 - Desenvolver e implementar interfaces que permitam consolidar os modelos 3D de variação da condutividade elétrica em subsuperfície com outras informações geológicas e geofísicas em diferentes sistemas de referência.

ETAPA 4 - Desenvolver e implementar procedimentos que permitam minimizar o tempo de processamento dos programas de inversão 3D.



4 Atividades Desenvolvidas durante o período da bolsa

O quadro abaixo apresenta em síntese, as principais atividades desenvolvidas durante o período da bolsa.

ETAPA DO CRONOGRAMA	ATIVIDADES
ETAPA 1	1. Preparação do ambiente de Sistema Operacional para a execução de aplicativos no escopo do projeto
	2. Absorção de Conhecimentos 2.1 Introdução a Geofísica Espacial 2.2 O método geofísico magnetotelúrico (MT) 2.3 Geometria Espacial 2.4 Familiarização com o ambiente de códigos utilizados e procedimentos nos processos MT institucionais do grupo de Geomagnetismo INPE 2.5 Modelagem dos processos MT institucionais do grupo de Geomagnetismo INPE
	3. Discussão técnica sobre a usabilidade da interface gráfica do aplicativo para o usuário pesquisador, a fim de subsidiar o desenvolvimento da Visualização de Modelos de Inversão MT 3D de Dados Geofísicos
	4. Geração da documentação das informações obtidas durante o período



5 Resultados Obtidos em função do Plano de Trabalho proposto

5.1 Atividades desenvolvidas durante a Etapa 1 do Projeto

5.1.1 Preparação do ambiente de Sistema Operacional para a execução de aplicativos no escopo do projeto

Para a execução das aplicações utilizadas pelo grupo de geomagnetismo da DGE/CEA/INPE, relacionadas ao pré-processamento, pré-análise, processamento e análise de dados geofísicos MT, foi requerido preparar o ambiente de Sistema Operacional Linux Ubuntu Server 14.04 LTS x64, integração com o Sistema Gerenciador de Interface Gráfica LXDE. Realizou-se, previamente, uma análise técnica comparativa entre alternativas de sistemas gerenciadores gráficos na plataforma Linux, e constatou-se ser o LXDE um sistema leve e funcional, desenvolvido para utilizar menos recursos computacionais gráficos, de modo a propiciar maior disponibilidade de memória RAM e consumo de recursos computacionais da CPU e da Aceleradora Gráfica GPU, e conseqüentemente, melhorando o desempenho de processamento utilizado por todos os sistemas integrados. Do aspecto de usabilidade dos elementos gráficos do LXDE, verificou-se que é possível deixar a navegação gráfica similar a interface gráfica do Sistema Operacional Microsoft Windows XP, propiciando uma adaptação mais rápida aos usuários originalmente acostumados com o ambiente Windows.

Durante a preparação do ambiente local de Pesquisa e Desenvolvimento, e testes das tecnologias e aplicativos, foi feito: [1] a instalação do sistema operacional; [2] a instalação e configuração de aplicativos gráficos acessórios de apoio, rotineiramente requeridos, tais como ferramenta de busca, ferramentas de visualização de conteúdos provenientes de diversos formatos de arquivos, ferramenta de e-mail, gerenciador de arquivos em rede, dispositivos de impressoras em rede; [3] configurações e customizações de usabilidade do sistema operacional; [4] instalação, configurações, verificação e validação (V & V) dos pré-requisitos para os sistemas e subsistemas do grupo de geomagnetismo; [5] instalação, configuração, verificação e validação (V & V) dos Drivers e da Renderização Gráfica, feita na GPU, integrada ao Sistema Operacional e Aplicativos; [6] avaliação técnica comparativa do desempenho gráfico de diferentes computadores (Sun Workstation, HP Desktop, Notebook) contendo GPU NVIDIA Quadro FX 3800 ou Intel HD Graphics 4000; [7] Sistema Servidor Web Apache HTTP Server; [8] instalação, configuração, verificação e validação (V & V) da integração Python Web acoplado ao Apache HTTP Server, a fim de permitir que aplicações *standalone* Python possam ser futuramente integradas a determinadas soluções que podem ser desenvolvidas para realizar a apresentação dos resultados em páginas Web, facilitando o acesso de outros computadores e dispositivos móveis; [9] instalação do Sistema Gerenciador de Banco de Dados Relacional (SGBDR) PostgreSQL e a extensão espacial PostGIS.



5.1.2 Absorção de Conhecimentos: introdução a Geofísica Espacial

As pesquisas científicas em Geomagnetismo desenvolvidas no INPE baseiam-se na realização de medidas das variações temporais do campo magnético terrestre observadas na superfície da Terra. Essas variações resultam de duas contribuições distintas: uma de origem externa e a outra interna. (INPE, 2015)

A variação temporal do campo magnético de origem externa, considerada primária, é gerada por correntes elétricas fluindo na ionosfera e na magnetosfera (Figura 2). A medição e separação entre estas variações fornecem subsídios para o estudo das tempestades magnéticas. Essas tempestades produzem alterações no campo magnético da Terra, com conseqüências nocivas às telecomunicações, aos satélites artificiais e às redes de transmissão de eletricidade. (INPE, 2015)

As partículas energéticas emitidas pelo Sol interagem com o campo magnético terrestre, ocasionando perturbações magnéticas e o aumento da ionização da ionosfera. A energia emitida ocorre sob a forma de erupções de radiações eletromagnéticas, ondas de rádio, infravermelho, luz, ultravioleta, raios-X, de partículas eletrizadas, de matéria coronal e de correntes de plasma. Ao se afastarem do Sol, essas partículas produzem o vento solar, arrastando com elas parte dos fluxos das partículas carregadas do campo magnético solar. O vento solar, principalmente na magnetosfera e na ionosfera, pode influenciar o desempenho e a segurança dos sistemas tecnológicos, no espaço e na superfície terrestre. As radiações e as partículas de origem solar interagem com o campo magnético da Terra de maneira muito complexa, causando o acúmulo de partículas carregadas energeticamente, assim como produzem a circulação de correntes elétricas nas diferentes regiões da exosfera. As partículas de alta energia de origem solar podem provocar sérias repercussões nos sistemas eletrônicos ultra-sensíveis dos satélites, causando anomalias no seu funcionamento. As ondas radioelétricas utilizadas nas telecomunicações por satélites ou na navegação por GPS podem ser afetadas pelo aumento de ionização, que provoca as interrupções das comunicações e dos sistemas de navegação. A maior parte dos sistemas de comunicação utiliza a ionosfera para refletir os sinais de rádio e, desse modo, transmiti-los às distâncias mais afastadas possíveis. As tempestades ionosféricas podem afetar a comunicação que se faz através do rádio, em todas as latitudes. As transmissões de rádio entre o solo e as aeronaves, os navios e os portos, e entre os radio amadores são freqüentemente interrompidas na ocorrência de tempestades ionosféricas. Alguns sistemas de detecção militar e de advertência antecipada são também afetados pela atividade solar. O radar, usado com objetivo de monitorar o lançamento das aeronaves e mísseis a longa distância, é muito afetado: durante as perturbações, esse sistema é severamente dificultado por ruídos confusos de rádio. Alguns sistemas de detecção submarina utilizam as assinaturas magnéticas dos submarinos como meio para localizá-los, e as tempestades geomagnéticas podem mascarar e



distorcer esses sinais. A Administração Federal da Aviação recebe rotineiramente alertas de perturbações solares de modo que possa reconhecer os problemas de comunicação e abandonar uma manutenção desnecessária. Quando uma aeronave e uma estação terrestre estão alinhadas com o Sol, pode ocorrer uma obstrução nas frequências de rádio do sistema de controle aéreo; podendo também ocorrer quando uma estação da Terra, um satélite e o Sol estão alinhados. Os sistemas de navegação, como o Loran e o Omega, são muito afetados quando a atividade solar interrompe a transmissão dos seus comprimentos de onda; os aviões e os navios usam os sinais de baixa frequência desses transmissores para determinar suas posições, e durante um evento solar e uma tempestade geomagnética, o sistema pode dar aos navegantes informações que são imprecisas em diversos quilômetros; um sistema de alerta, aos navegantes, referente a ocorrência de eventos de prótons ou tempestades geomagnéticas, possibilita acionar preventivamente um sistema de reserva (backup). Os sinais do GPS - Global Positioning System (Sistema Global de Posicionamento) são afetados quando a atividade solar produz variações súbitas na densidade da ionosfera. O monitoramento do Sol por satélite constitui uma nova ciência: a meteorologia espacial, que visa estudar uma série de processos físicos oriundos do Sol e que podem afetar as atividades humanas na Terra e no espaço. (ALBERTI, 2005)

A variação temporal do campo magnético de origem interna, considerada secundária, é induzida pelas variações externas em materiais condutores no interior da Terra (Figura 3). A medição e separação entre estas variações permitem inferir a distribuição da condutividade elétrica na crosta e manto superior terrestres. As perturbações magnéticas afetam diretamente as atividades que utilizam o campo magnético, como os níveis magnéticos e as bússolas, assim como podem induzir correntes elétricas nos condutores ao longo das linhas de transmissão de eletricidade e nos oleodutos (pipelines), provocando panes no fornecimento elétrico e a corrosão dos oleodutos.

A característica mais importante do trabalho de mapeamento geofísico da parte induzida do campo geomagnético medido na superfície é a obtenção de funções de transferência que permitam relacionar as medidas do campo eletromagnético na superfície com os parâmetros físicos do interior da Terra. Técnicas sofisticadas de modelagem computacional são empregadas para inferir a variação desse parâmetro, condutividade elétrica, a partir dos dados medidos. Em particular, modelos de inversão tridimensionais (3D) dos dados geofísicos experimentais, são utilizados pelos pesquisadores no INPE durante esta etapa analítica. A visualização gráfica dos modelos de inversão tridimensionais (3D) caracteriza ser uma ferramenta essencial nas atividades dos pesquisadores do grupo de Geomagnetismo do INPE, afim de apoiar na compreensão da dinâmica dos dados geofísicos e na transformação da combinação de outras informações

geológicas e geofísicas, em conhecimento para o suporte à exploração mineral ordenada das regiões do Brasil.

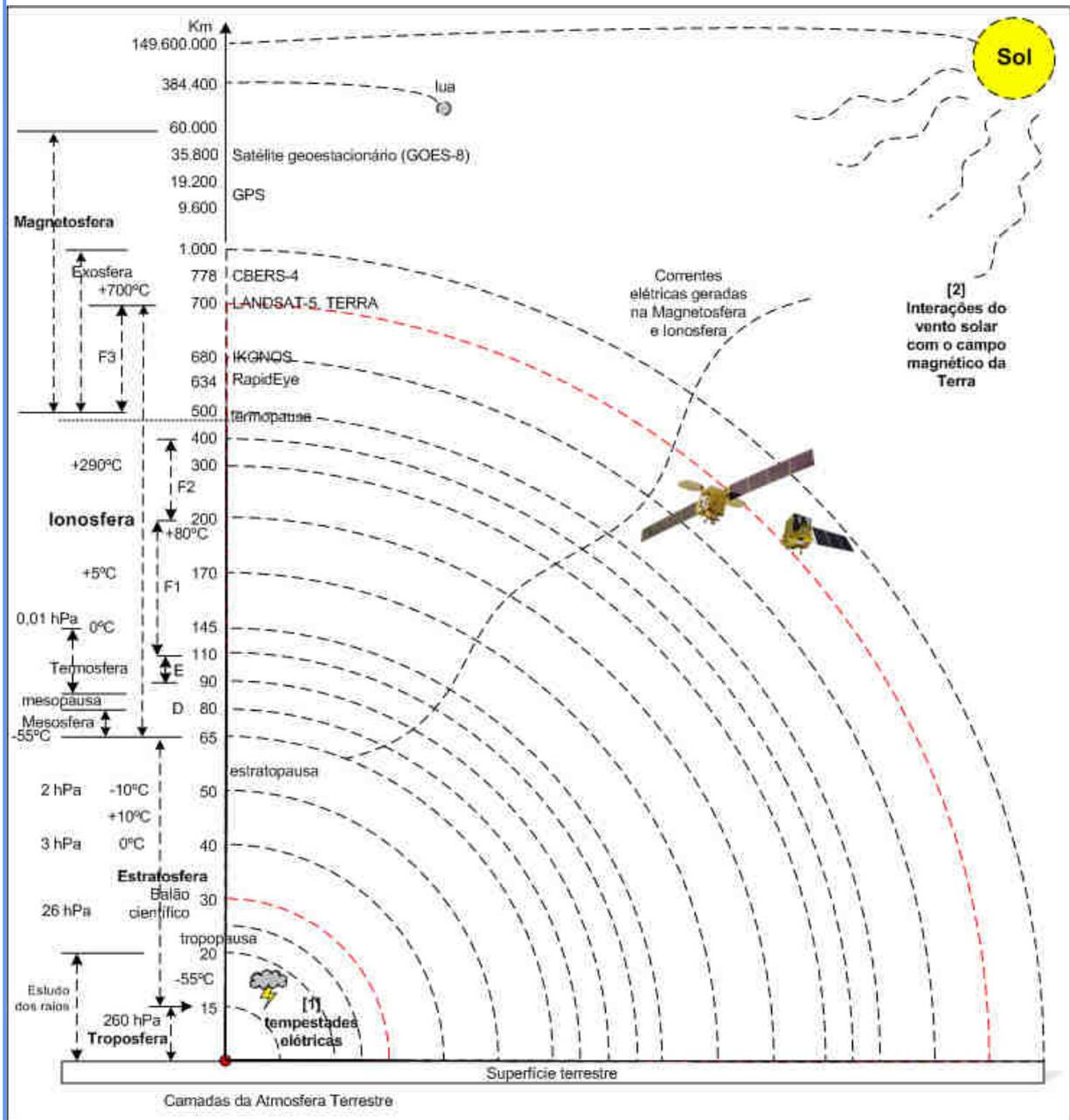


Figura 2: Camadas da atmosfera terrestre

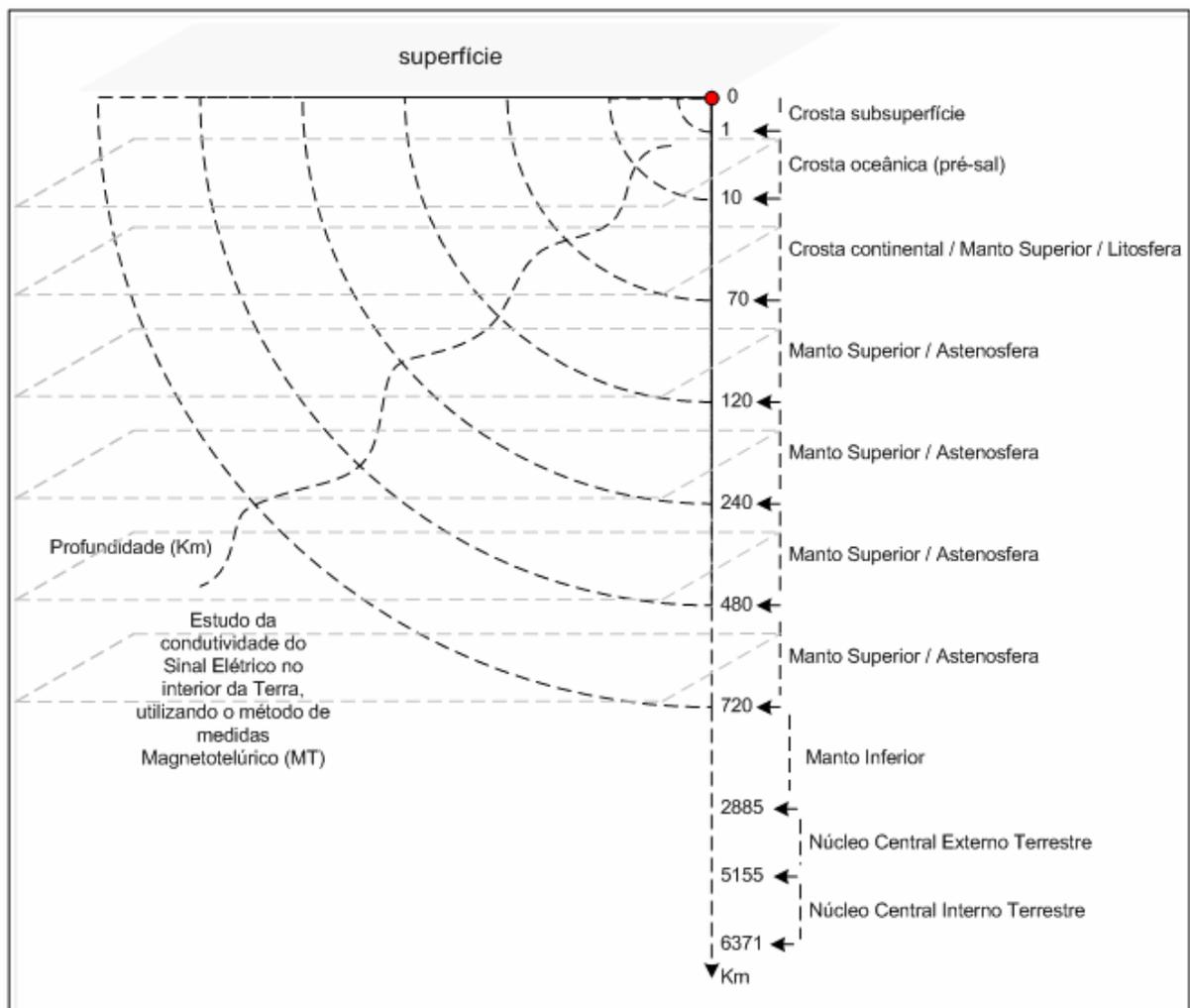


Figura 3: Camadas do interior terrestre

5.1.3 Absorção de Conhecimentos: o método geofísico magnetotelúrico (MT)

O método geofísico magnetotelúrico (MT) foi proposto inicialmente por Tikhonov (1950) e Cagniard (1953). Os estudos relacionados ao método MT foram retomados em Vozoff (1991).

Campos eletromagnéticos naturais são a fonte do sinal do método MT, usados para investigar estruturas geolétricas do interior da Terra. Esses campos variáveis no tempo, gerados tanto de tempestades elétricas que ocorrem na baixa atmosfera bem como por correntes elétricas geradas na magnetosfera e ionosfera em respostas as interações do vento solar com o campo geomagnético da Terra, incidem na superfície terrestre como ondas e propagam-se no interior da Terra.

A partir da medida na superfície de componentes ortogonais (Figura 4) dos campos elétrico e magnético, pode-se obter um diagnóstico da distribuição de resistividade elétrica em subsuperfície. São realizadas medições simultâneas na superfície da Terra do campo elétrico em duas componentes (E_x e E_y) e do magnético em três componentes (H_x , H_y , e H_z). (VITORELLO, et al., 2013)

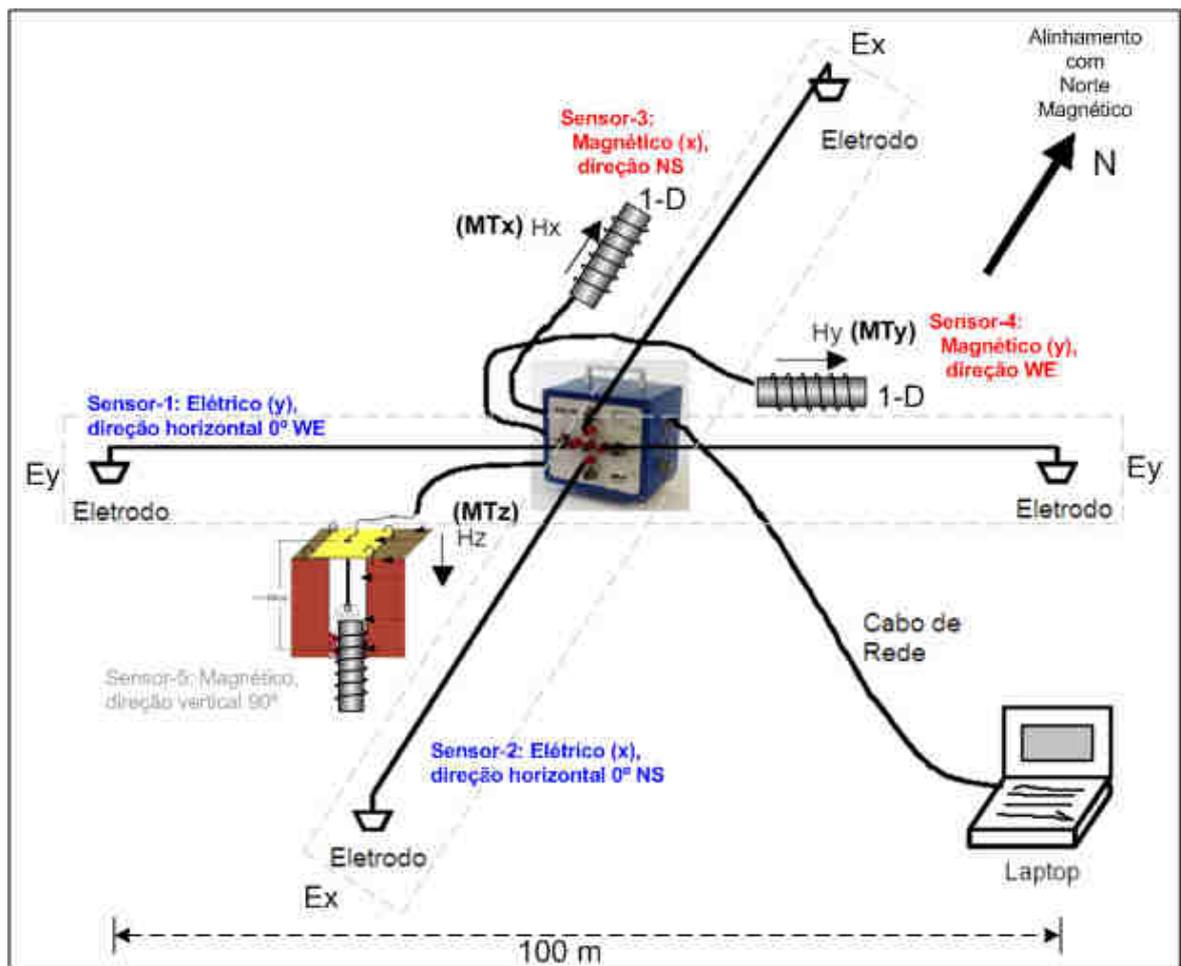


Figura 4: Esquema da instalação do equipamento de medição em uma sondagem MT, sensores Eletrodos e Magnetômetros



Na prospecção com o uso de campos magnetotelúricos, ambos os campos, o elétrico e o magnético, devem ser medidos. Acredita-se que os campos magnetotelúricos resultem do fluxo de partículas carregadas na ionosfera e na atmosfera, pois flutuações nos campos são passíveis de serem correlacionadas com variações diurnas no campo geomagnético causadas por emissões solares. Os campos elétricos naturais de grande escala e baixa frequência são utilizados para estimar as variações de condutividade elétrica do interior da Terra. Os sinais dos campos MT penetram no solo com frequências variáveis de 10^{-4} a 10^4 Hz e lá induzem o fluxo de correntes alternadas naturais dentro da Terra conhecidas como correntes telúricas. As correntes telúricas são utilizadas na prospecção medindo-se as diferenças de potencial (ddp) que elas causam entre pontos da superfície.

Descargas elétricas provenientes de relâmpagos geram ondas eletromagnéticas conhecidas como esféricas, as quais se propagam ao redor da Terra, dentro da cavidade Terra-ionosfera. Sinais com períodos maiores que 1 segundo estão associados à interação entre ventos solares e o campo geomagnético principal, gerando flutuações denominadas pulsações geomagnéticas.

Quanto menor a frequência (ou maior o período), maior a profundidade de investigação, que pode variar de alguns metros à dezenas de quilômetros. As tempestades elétricas são responsáveis por gerar sinais de frequência maior que 1 Hz, e o vento solar com frequências menores.

O método MT é utilizado em investigações da crosta e do manto superior. Na exploração de petróleo, aplica-se o método MT em áreas onde a reflexão sísmica é muito cara ou ineficiente.

5.1.4 Absorção de Conhecimentos: geometria espacial

Geometria espacial é o estudo da geometria de figuras que possuem mais de duas dimensões no espaço. O poliedro é um sólido geométrico em que as superfícies planas são compostas por um número finito de faces. Os vértices do poliedro são formados por três ou mais arestas em três dimensões, em que cada uma das faces é um polígono. Os seus elementos mais importantes são as faces, as arestas e os vértices (Figura 5).

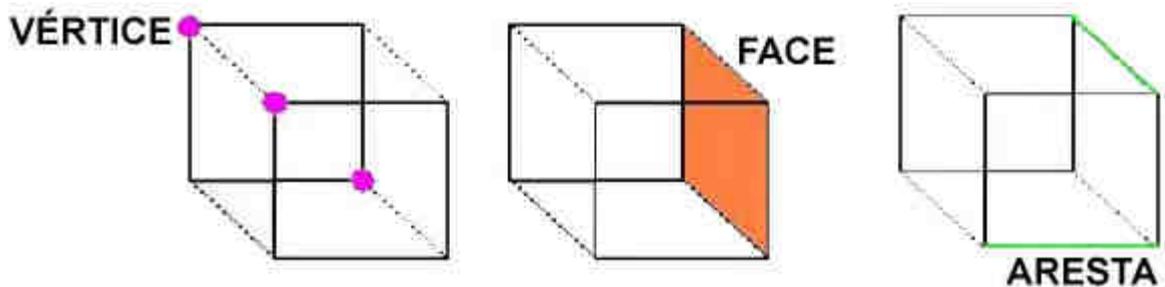


Figura 5: Representação de vértice, face e aresta

No escopo do projeto, um sólido geométrico é uma figura geométrica (Figura 6) que possui volume e coordenadas em três dimensões. Em um Sistema de Coordenadas Cartesiano (SCC), as três dimensões serão mencionadas como: X, Y, Z. Em um Sistema de Coordenadas Geográfico (SCG), as três dimensões serão mencionadas como: longitude, latitude e profundidade.

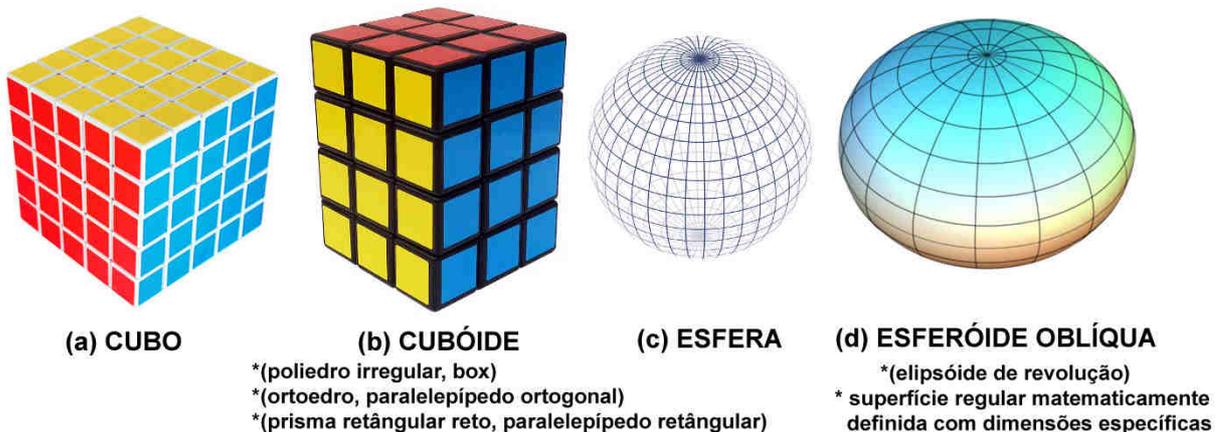


Figura 6: Representação gráfica de figuras geométricas

No escopo do projeto, é importante ressaltar que há diferença conceitual entre: [1] a dimensionalidade da inversão de modelos geofísicos MT (1D, 2D, 3D); [2] a dimensionalidade da representação computacional da estrutura de dados (3D, 4D, 5D, 6D) utilizada para a visualização dos dados; [3] a compreensão da dimensionalidade da plotagem gráfica (2D, 2.5D/Perspectiva, 3D) impressa; [4] a escala de impressão do resultado, medida espacial em *dots per inch* – dpi, propiciando a manipulação do valor a fim de possibilitar ampliação (usualmente 5 dpi para uma análise em escala local/regional, e 8 dpi para uma análise em escala regional) e facilitar a análise do resultado em papel, ou alta densidade (300 dpi) para propiciar definição gráfica suave nas feições, ou ainda por meio da combinação de ambas técnicas através de reamostragem; e [5] a dimensionalidade de Sistemas de Visualização Computacional Gráfica (2D, 2.5D/Perspectiva, 3D), ilustrado na figura 7.

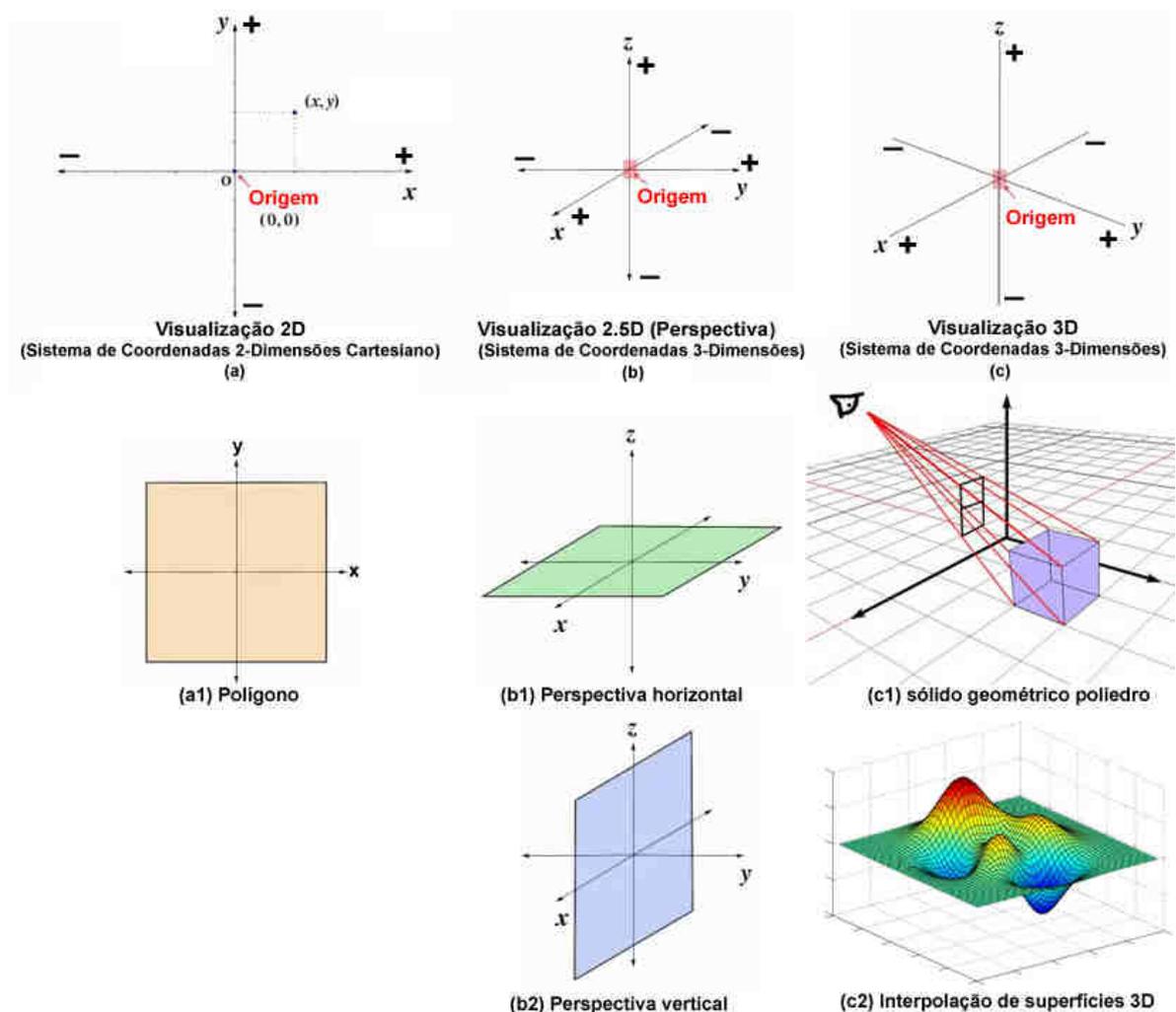


Figura 7: Representação geométrica nas dimensões 2D, 2.5D e 3D



Durante a representação computacional de uma estrutura de dados utilizada em um Sistema de Visualização 2D, é requerido três componentes principais: X (localização no SCC), Y (localização no SCC), V (valor do dado); e opcionalmente uma quarta componente W (peso de contribuição do dado, usada para a geração de mapas de densidade através de interpolação dos dados da superfície). Para a geração de animações e vídeo, a componente T (identificação do dado em uma escala de tempo) é também requerida.

Durante a representação computacional de uma estrutura de dados utilizada em um Sistema de Visualização 2.5D, é requerido quatro componentes principais: X (localização no SCC), Y (localização no SCC), Z (altitude ou profundidade), V (valor do dado); e opcionalmente um quinto componente W (peso de contribuição do dado, usado para a geração de mapas de densidade através de interpolação dos dados da superfície). Para a geração de animações e vídeo, a componente T (identificação do dado em uma escala de tempo) é também requerida. Para produzir um resultado sob impressão de uma figura 3D através da Visualização em Perspectiva, também é requerido informar o ângulo de rotação da representação gráfica.

Durante a representação computacional de uma estrutura de dados utilizada em um Sistema de Visualização 3D, é requerido quatro componentes principais: X (localização no SCC), Y (localização no SCC), Z (altitude ou profundidade), V (valor do dado); e opcionalmente um quinto componente W (peso de contribuição do dado, usado para a geração de mapas de densidade através de interpolação dos dados de superfícies 3D). Para a geração de animações e vídeo, a componente T (identificação do dado em uma escala de tempo) é também requerida.

5.1.5 Absorção de Conhecimentos: familiarização com o ambiente de códigos utilizados e procedimentos nos processos MT institucionais do grupo de Geomagnetismo INPE

Foi feita a familiarização com as ferramentas computacionais utilizadas durante a aquisição, pré-processamento e pré-análise dos dados, bem como os procedimentos adotados para instalação de sensores de coleta de dados em campo. Esta absorção de conhecimentos faz-se necessária para contribuir no aprimoramento dos procedimentos, e também possibilitar o desenvolvimento e a implementação de novas ferramentas para apoiar os subsistemas de pré-análise e análise de inversão MT, conforme ilustrado na Figura 8.

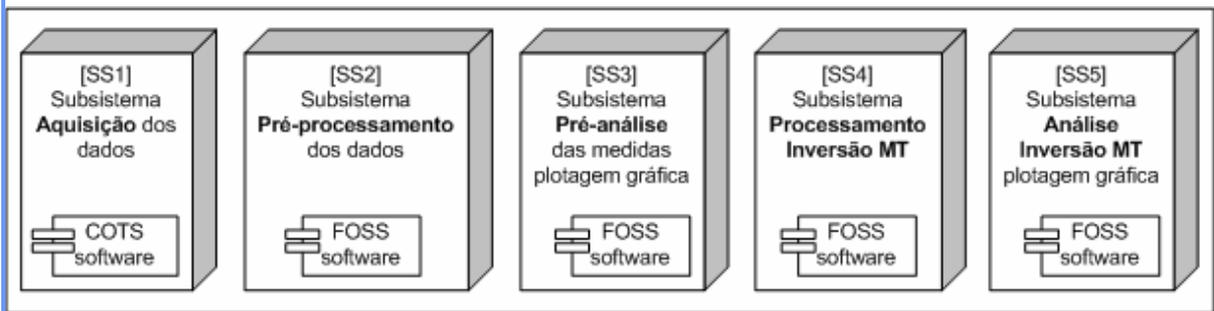


Figura 8: Subsistemas relacionados aos processos MT do INPE

A instalação dos subsistemas encontram-se em 4 pacotes:

- `scripts.tgz` (diversas aplicações implementadas em linguagem script utilizando *awk*, *bash shell script*, *python*, *gmt*, *gdal*)
- `gmt4.5.12.tgz` (dezenas de ferramentas que apoiam a plotagem gráfica de mapas, utilizadas principalmente nos subsistemas Pré-Análise e Análise, procedimentos de instalação customizados pelo grupo DGE/CEA/INPE)
- `progsProcMT.tgz` (diversas aplicações relacionadas ao subsistema Pré-processamento, implementadas em *Fortran* e *C++*)
- `progsInvMT.tgz` (diversas aplicações relacionadas ao subsistema Processamento de inversão MT, implementadas em *Fortran* e *C++*)

Para a execução de um caso de teste de Pré-processamento dos dados geofísicos MT, 3 pacotes são disponibilizados:

- `DADOS_MT.tgz` (diretório contendo os dados de uma campanha MT)
- `Modelo.tgz` (diretório contendo um conjunto de arquivos de configuração requeridos durante as etapas do pré-processamento)
- `PROC_MT.tgz` (diretório onde é feito todas as etapas do Pré-processamento em laboratório)



5.1.6 Absorção de Conhecimentos: modelagem dos processos MT institucionais do grupo de Geomagnetismo INPE

5.1.6.1 Subsistema Aquisição dos dados

5.1.6.1.1 Processo Planejamento da coleta de dados em campo

O plano de trabalho da equipe em campo consiste em previamente estudar os locais que serão visitados em campo, tipos de terrenos, distâncias entre a mobilidade nos locais de medição, locais de estadia e envio dos dados pela Internet a equipe de laboratório, obter autorização com o responsável da propriedade para acesso ao local das medições, e definir uma sequência de atividades ao longo de cada dia em campo.

Exemplo de um plano de trabalho realizado na coleta de dados em campo

Sequência	Horário previsto do início da coleta	Tempo estimado para a realização da tarefa, incluindo pré-análise posterior a coleta dos dados	Equipamentos		Sufixo do nome do arquivo gerado (Run)
			ADU-06	ADU-07	
			Janela	Janela	
01	08:00	30 min	A	65000H	Run 1
			B	4096H	
			F	2048H	
02	08:30	1 h 30 min	C	128H	Run 2
03	10:00	30 min	A	65000H	Run 3
			B	4096H	
04	10:30	1 h 30 min	C	128H	Run 4
05	14:00	30 min	A	65000H	Run 5
			B	4096H	
06	14:30	1 h 30 min	C	128H	Run 6
07	16:00	30 min	A	65000H	Run 7
			B	4096H	
08	16:30	1 h 30 min	C	128H	Run 8
09	18:00	14 h	D	4H	Run 9

5.1.6.1.2 Processo Aquisição de dados geofísicos MT, realizado pelas equipes de campo do INPE

Durante a aquisição de dados, em uma campanha em campo, mede-se campos magnético e elétrico na superfície terrestre, as correntes telúricas. Esta medição é feita para se conhecer a estrutura geolétrica do interior do planeta. As fontes de sinais medidos pelo grupo de Geomagnetismo do INPE, referentes a variação da condutividade elétrica em subsuperfície, são provenientes: (a) de relâmpagos, com períodos menores de 1 segundo; (b) e da magnetosferasfera terrestre, com períodos maiores que 1 segundo.

A aquisição dos dados geofísicos das séries temporais dos campos elétrico e magnético, é feito com software proprietário do equipamento MT em uso. Os equipamentos são instalados no local da medição, de acordo com os procedimentos para a realização dos buracos, distâncias, alinhamento correto dos magnetômetros e eletrodos. Os dados são armazenados em arquivo binário no formato ATS. Uma série temporal é dividida em janelas e frequências.

Os principais equipamentos atualmente utilizados em uma campanha MT são: Metronix Geophysics ADU-06 (Analog Digital Unit); Metronix Geophysics ADU-07; LEMI; e LIMS.

O bolsista participou de um teste experimental, em dezembro de 2014, no campo em uma fazenda localizada nas coordenadas geográficas 23°6'45"S e 45°50'12"W, situada em São José dos Campos, com o equipamento ADU-06, acompanhando a instalação e utilização do aplicativo comercial MAPROS ADU06, que possibilita realizar em campo: [etapa 1] a aquisição dos dados das séries temporais dos campos elétrico e magnético em formato de dado ATS (TS-format) e [etapa 2] uma verificação bem simplificada das séries temporais dos campos elétrico e magnético, através de visualização gráfica dos dados medidos (Figura 9).

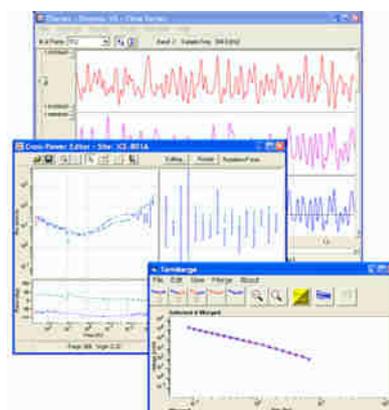


Figura 9: Exemplo de representação gráfica das séries temporais no aplicativo Metronix Geophysics MAPROS ADU-06



Fequências utilizadas nas medidas em campo
Equipamento Metronix ADU-06 (Analog Digital Unit)
(multi-channel Geophysical EM Measurement System)

Janela	Código da Frequência	Frequência (Hz)	Duração da coleta dos pontos	Quantidade de pontos após pré-processamento	Tamanho aproximado do arquivo coletado no campo
A	HF	65536	0h / 1m / 4s	8	11 MB
		32768	0h / 1m / 4s	12	11 MB
B	LF1	65536	0h / 3m / 12s	12	3 MB
		8192	0h / 3m / 12s	16	3 MB
C	LF2 (inicia no 13º ponto do LF1 de 8192)	256	1h / 8m / 16s	24	2,8 a 6,6 MB
		128	1h / 8m / 16s	24	2,8 a 6,6 MB
D	LF3	128	13h / 39m / 12s	24	1,5 MB
		64	13h / 39m / 12s	16	1,5 MB
F	Free LF1xLF2	8192	0h / 6m / 24s	16	3,0 MB
		16384	0h / 6m / 24s	12	3,0 MB



Fequências utilizadas nas medidas em campo
Equipamento Metronix ADU-07 (Analog Digital Unit)
(multi-channel Geophysical EM Measurement System)

Janela	Código da Frequência	Frequência (Hz)	Duração da coleta dos pontos	Quantidade de pontos após pré-processamento	Tamanho aproximado do arquivo coletado (≈693 MB .tgz)
65000H	HF	65536	0h / 1m / 4s	12	2,6 MB
		32768	0h / 1m / 4s	12	2,6 MB
4096H	LF1	65536	0h / 3m / 12s	12	3,1 MB
		8192	0h / 3m / 12s	16	3,1 MB
128H	LF2	256	1h / 8m / 16s	24	14,0 a 124 MB
		128	1h / 8m / 16s	24	14,0 a 124 MB
4H	LF3	128	13h / 39m / 12s	24	3,2 a 4,0 MB
		64	13h / 39m / 12s	16	3,2 a 4,0 MB
2048H	LF1	8192	0h / 6m / 24s	16	3,1 MB
		65536	0h / 6m / 24s	12	3,1 MB



5.1.6.1.3 Processo Pré-Processamento de dados geofísicos MT, realizado pelas equipes de campo do INPE

O primeiro passo é transformar os dados do formato do equipamento (ATS) para o para o formato ASCII (.asc). Através do arquivo .asc é possível visualizar a série temporal (Figura 9). Através da análise do gráfico da série temporal, têm-se uma análise preliminar bem simplificada das medições feitas através de magnetômetros e eletrodos, afim de identificar se os equipamentos estão conectados e em operação. O segundo passo é transformar os dados do formato ASCII (.asc) para o formato Z-files (.zss), a fim de obter os coeficientes de Fourier. O terceiro passo é efetuar o processamento Z preliminar individualmente dos dados em cada frequência, utilizando o módulo EMTF de *Gary Egbert's codes for Time Series Processing*, de modo a obter os dados para a representação gráfica da resistividade elétrica aparente e fase. O módulo EMTF inclui o componente DNFF 5.1.1 de 3/10/1998 (Egbert e Eisel, 2010), utilizado na análise espectral para obter os coeficientes de Fourier das séries temporais registradas. Cabe ressaltar que o processamento Z é uma operação que consome grande demanda de recurso computacional da CPU, bem como demanda de memória RAM disponível sob requisito mínimo de 4 GB em uma simulação experimental sob uma máquina virtual Oracle VM VirtualBox com 48 GB de disco físico. O espaço de 48 GB considera a completa instalação do sistema operacional Linux Ubuntu Server 14.04 LTS x64, todos os subsistemas instalados e uma amostra de dado a ser pré-processada. Constatou-se que uma configuração inicial de máquina virtual com 3,2 GB de RAM e 32 GB de disco não são suficientes para executar um pré-processamento dos dados geofísicos MT. Também cabe ressaltar a importância de selecionar uma distribuição de sistema operacional com o mínimo de recursos aplicativos pré-instalados, e sob uma arquitetura obrigatoriamente de 64 bits. O Sistema Gerenciador Gráfico no Linux é um componente que pode ser acoplado ao Sistema Operacional, e dependendo da distribuição do Linux, pode influenciar no desempenho do pré-processamento, bem como podem ocorrer diversas dificuldades em prosseguir a instalação e execução de todos os aplicativos do pré-processamento, conforme observado em alguns experimentos iniciais.

5.1.6.1.4 Processo Pré-Análise de dados geofísicos MT, realizado pelas equipes de campo do INPE

Esse passo trata-se de uma técnica de avaliação prévia dos dados medidos em campo, através de uma inspeção preliminar gráfica da resistividade elétrica aparente e fase. Este passo é feito a fim de minimizar eventuais problemas na qualidade dos dados MT adquiridos em campo, antes de serem encaminhados para o laboratório, por exemplo a influência da resistividade na conexão de cabos e medidas inconsistentes.

A plotagem gráfica (Figura 10) dos coeficientes de Fourier é feita por meio do aplicativo `plot_cmp_tf (*.zss;*.zrr)`, com o objetivo de selecionar os melhores resultados das coletas. O processo de seleção é feito manualmente e analiticamente pelo Analista de Dados Geofísicos. O aplicativo de plotagem gráfica utiliza-se de um conjunto de ferramentas complementares do sistema denominado GMT (“The Generic Mapping Tools”).

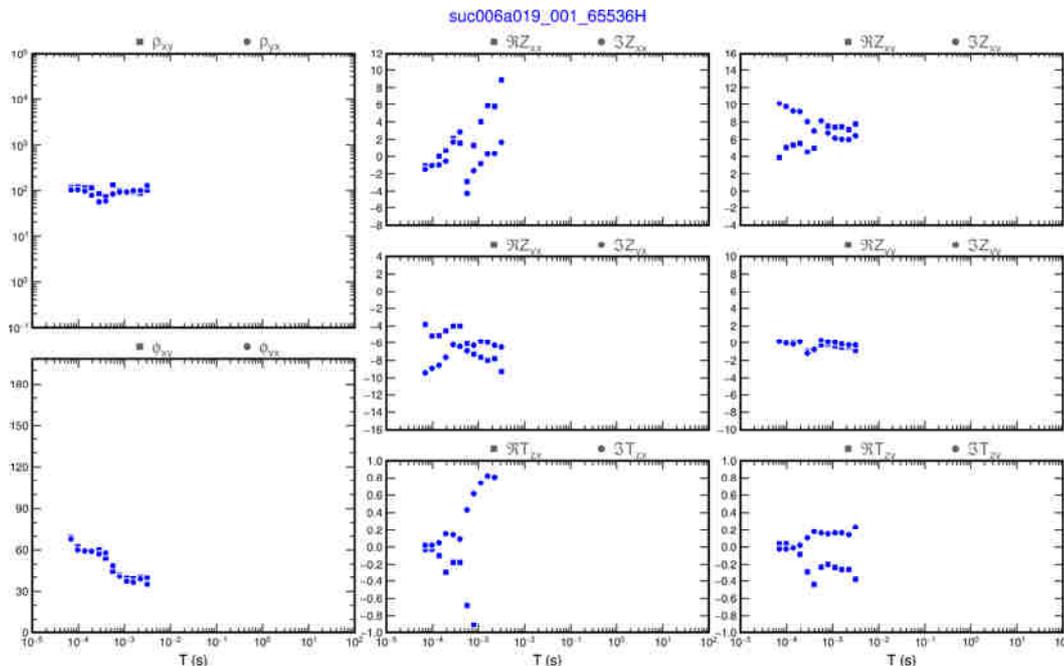


Figura 10: Exemplo de representação gráfica dos arquivos ZSS

5.1.6.1.5 Processo Organização do repositório de dados geofísicos da campanha

A campanha possui vários pontos, sendo que para cada ponto é criado uma pasta e nomeado de acordo com sua numeração, como por exemplo, `site001`. Dentro das sub-pastas estão os arquivos de dados brutos com extensão `.ats`, e os metadados com extensão `.txt` contendo dados complementares, como por exemplo o horário de início e fim de cada coleta de dados. É possível que alguns dados estejam repetidos e, portanto, é requerido remover as duplicações. Também é realizado a extração das coordenadas dos dados dos sites a fim de verificar se a identificação (numeração) coincide com a sequência determinada no perfil traçado. Além disso, alguns sites com números diferentes podem ter a mesma coordenada, o que significa que possuem o mesmo ponto duplicado. As coordenadas de todos os sites são extraídas e armazenadas num arquivo tipo texto, nomeado como `nome_campanha.coord`. É também requerida tratar adequadamente arquivos `.ats` orfãos, não pertencentes a um conjunto de dados e que apresentam inconsistências nas medições feitas.



5.1.6.2 Subsistema Pré-processamento dos dados

O objetivo do pré-processamento de dados é extrair sinais. Os sinais ruidosos devem ser removidos a fim de representar corretamente os dados geofísicos. Para o método geofísico MT, a resposta da Terra é a impedância, subdividida em resistividade elétrica aparente e fase.

5.1.6.2.1 Processo Pré-Processamento de dados geofísicos MT, realizado em laboratório do INPE

O pré-processamento MT é realizado no domínio da frequência. A conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência é realizada através da transformada de Fourier discreta (Brigham, 1974) ou, alternativamente, pela técnica “cascade decimation” (Wight e Bostick, 1980). Posteriormente, o espectro final é suavizado através de médias em torno de frequências alvos. Para cada seguimento, obtém-se uma matriz espectral cujos elementos são uma combinação dos espectros cruzados e auto-espectros.

Inicialmente cada componente medida é subdividida em segmentos, cujo tamanho depende do período máximo pretendido e do número de graus de liberdade a ser trabalhado. Em seguida, remove-se a média e a tendência linear de cada segmento, e aplica-se uma janela para suavizar seus extremos. Isso é necessário para atenuar as distorções causadas pelo fato de se trabalhar com séries temporais finitas.

Para estimar os elementos da impedância, resistividade e fase, normalmente é utilizado o método de mínimos quadrados (MMQ). Este método consiste em minimizar uma função erro, definido pela diferença entre o que é esperado e o que é observado.

5.1.6.2.2 Processo Refinamento do Pré-Processamento de dados geofísicos MT, realizado em laboratório do INPE

O refinamento inicial da dinâmica das curvas de dados geofísicos MT consiste na correção de ruídos de modo a atenuar de acordo com a variância e correlação dos sinais. Esse processo é feito manualmente e analiticamente. São utilizados pelo grupo de pré-processamento três métodos:

- Método da Janela Média Móvel: através da técnica de análise de séries temporais, realiza-se a suavização da curva.
- Método da Média dos Vizinhos: através da técnica Coerência, realiza-se a suavização da curva, nos pontos que não seguem a tendência da curva, através de substituição dos pontos dispersos (*ponto bad*) pela média dos pontos vizinhos.
- Método da Combinação de Pontos de Controle da Curva: através da técnica Referência Remota, realiza-se a seleção dos melhores pontos de cada estação, afim de obter composição de continuidade da curva.

5.1.6.3 Subsistema Pré-análise das medidas representadas graficamente

5.1.6.3.1 Processo Pré-Análise qualitativa do pré-processamento Z

É realizado pelo Analista de Dados Geofísicos MT, e consiste em uma inspeção detalhada, a fim de investigar a qualidade dos dados coletados em campo, conforme ilustrado na Figura 11.

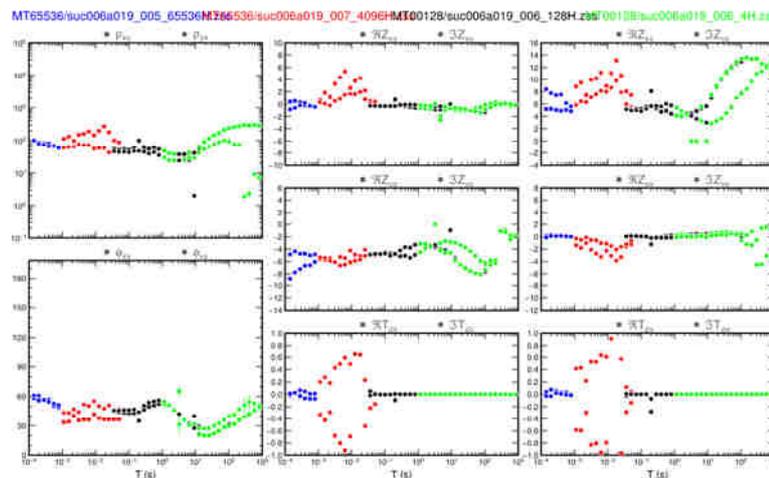


Figura 11: Representação gráfica da resistividade elétrica aparente e fase

Uma averiguação mais criteriosa sob o pré-processamento é analiticamente feita. Após o processamento Z preliminar individualmente dos dados em cada frequência, em iterativas etapas de refinamento, obtêm-se o resultado ilustrado na Figura 12, através do aplicativo plot_cmp_tf.

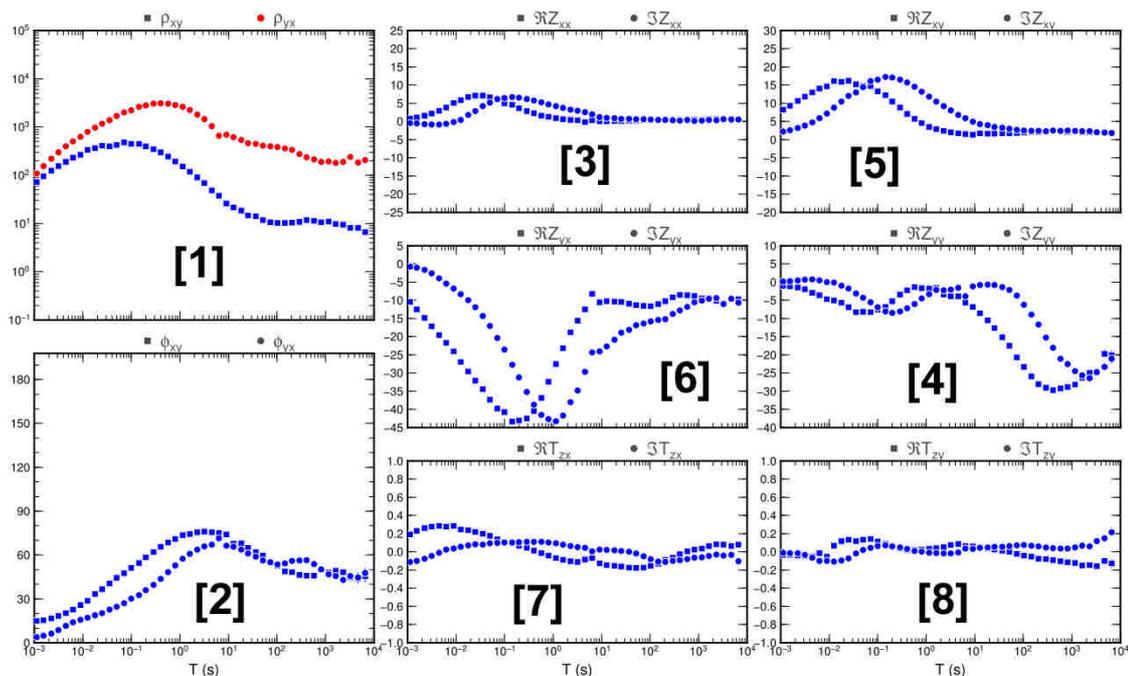


Figura 12: Exemplo de curvas da resposta de sondagem MT, representação gráfica da resistividade elétrica aparente e fase, após o refinamento

5.1.6.3.2 Processo Pré-Análise qualitativa do pré-processamento Jones

É realizado pelo Analista de Dados Geofísicos MT, e consiste em uma inspeção detalhada, a fim de investigar a qualidade dos dados coletados em campo, conforme resultados ilustrados nas Figuras 13 e 14.

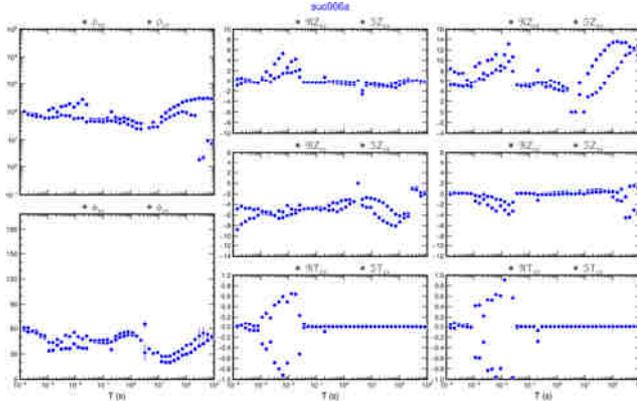


Figura 13: Representação gráfica das curvas integradas em Jones-format

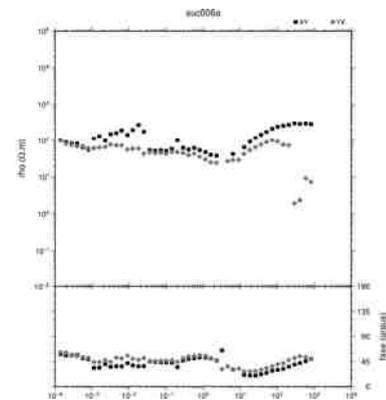


Figura 14: Representação gráfica dos dados em Jones-format

5.1.6.3.3 Processo Pré-Análise qualitativa do pré-processamento Rhoplus

É realizado pelo Analista de Dados Geofísicos MT, e consiste em uma inspeção detalhada, a fim de investigar a qualidade dos dados coletados em campo, verificando se as medidas são compatíveis, conforme ilustrado na Figura 15.

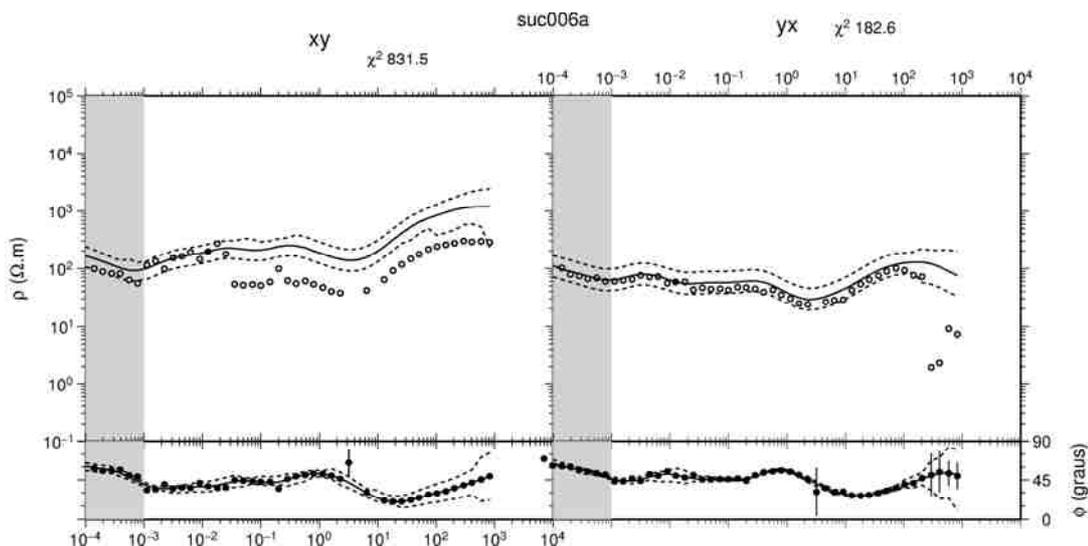


Figura 15: Representação gráfica do resultado Rhoplus

5.1.6.4 Subsistema Processamento Inversão MT

5.1.6.4.1 Processo Preparação dos dados geofísicos para a Inversão MT

É realizado pelo Pesquisador, consiste na preparação dos dados geofísicos para a Inversão MT.

5.1.6.4.2 Processo Processamento Inversão de dados geofísicos MT

Na inversão MT 2D, pode ser realizado localmente pelo Pesquisador, em seu equipamento de trabalho. O principal resultado do processamento é o modelo de inversão MT 2D.

Na inversão MT 3D, devido ao alto uso de recursos computacionais, a execução é feita em Servidor Sun Blade 80 Core com 128 GB RAM. A inicialização da execução é feita pelo Administrador do Servidor. O principal resultado do processamento é o modelo de inversão MT 3D.

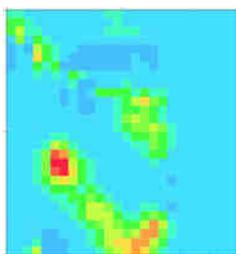
5.1.6.4.3 Processo Refinamento dos Modelos de Inversão MT

É realizado pelo Pesquisador, consiste no refinamento dos resultados dos modelos de inversão MT.

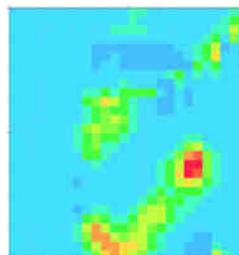
5.1.6.5 Subsistema Análise Inversão MT plotagem gráfica

5.1.6.5.1 Processo Análise dos Modelos de Inversão MT

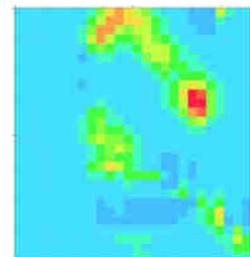
Os resultados dos modelos de inversão MT 2D e MT 3D, são plotados graficamente em grades bidimensionais (2D). Como pode ser observado na Figura 16, há uma dificuldade na percepção visual, de maneira fácil, intuitiva e interativa analiticamente, em interpretar diferentes camadas de uma determinada região de interesse, em perspectiva de três dimensões (3D), grade X (longitude), Y (latitude), Z (profundidade), nas direções de seções horizontal e vertical, e também capturar volumes cubóides.



(a) Exemplo de Inversão MT 3D, direção X



(b) Exemplo de Inversão MT 3D, direção Y



(c) Exemplo de Inversão MT 3D, direção Z

Figura 16: Versão atual do aplicativo de plotagem gráfica em 2D

5.1.7 Discussão técnica sobre a usabilidade da interface gráfica do aplicativo para o usuário pesquisador, a fim de subsidiar o desenvolvimento da Visualização de Modelos de Inversão MT 3D de Dados Geofísicos

A Visualização 2.5D (Perspectiva) é usualmente utilizada para propiciar uma representação estática do resultado. No escopo deste projeto, a Perspectiva pode ser aplicada para possibilitar a geração de mapas, para uso em publicações científicas, relatórios e boletins informativos, contendo o imageamento magnetotelúrico de diversas seções em camadas (Figuras 17 e 18), das estruturas do interior da Terra, descritas em modelos de inversão MT 3D, no estudo de determinada região de interesse geográfica, subsidiando os resultados das ETAPAS 2 e 3 do projeto.

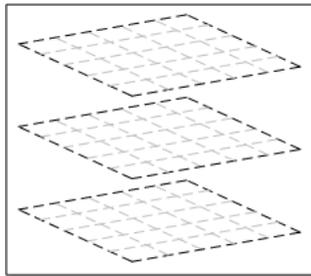


Figura 17: Discussão de futuro desenvolvimento de aplicativo para possibilitar a Visualização Gráfica Perspectiva, seções na direção horizontal em profundidade

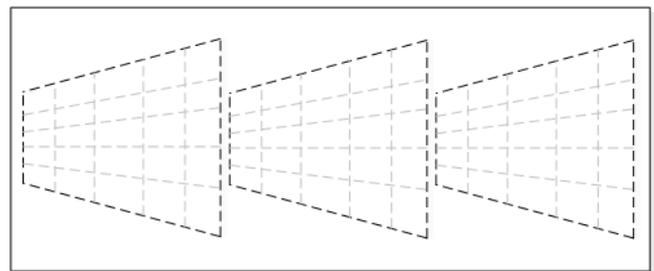


Figura 18: Discussão de futuro desenvolvimento de aplicativo para possibilitar a Visualização Gráfica Perspectiva, seções na direção vertical

Um Sistema de Visualização 3D pode ser desenvolvido computacionalmente para ser estático ou interativo. Uma das características de um Sistema Computacional Analítico é propiciar uma interface de usuário gráfica com uma usabilidade interativa. Um Sistema de Visualização 3D pode ser desenvolvido computacionalmente para representar: (1) sólidos geométricos poliedros; (2) interpolação de superfícies 3D. No escopo deste projeto, um Sistema de Visualização 3D para representar sólidos geométricos poliedros na forma de cubóides (Figuras 19, 20 e 21), pode auxiliar o usuário pesquisador na compreensão de volumes representativos a partir dos modelos de inversão MT 3D.

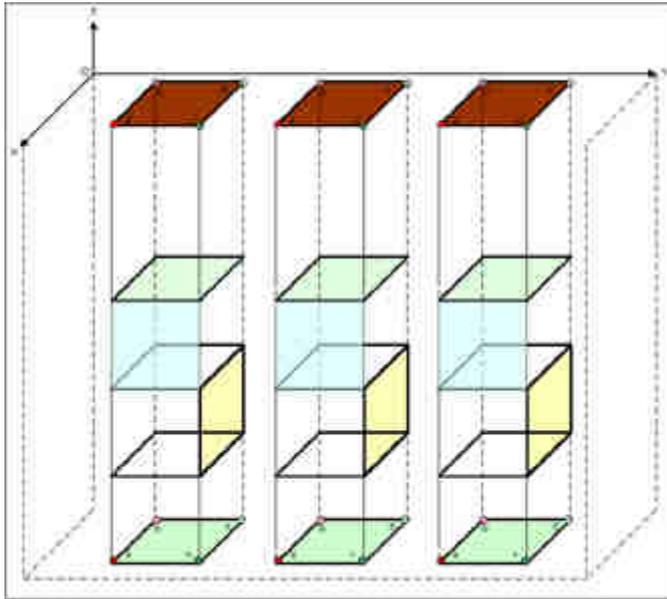


Figura 19: Seções em uma visualização Perspectiva



Figura 20: Maquete de um sólido geométrico poliedro

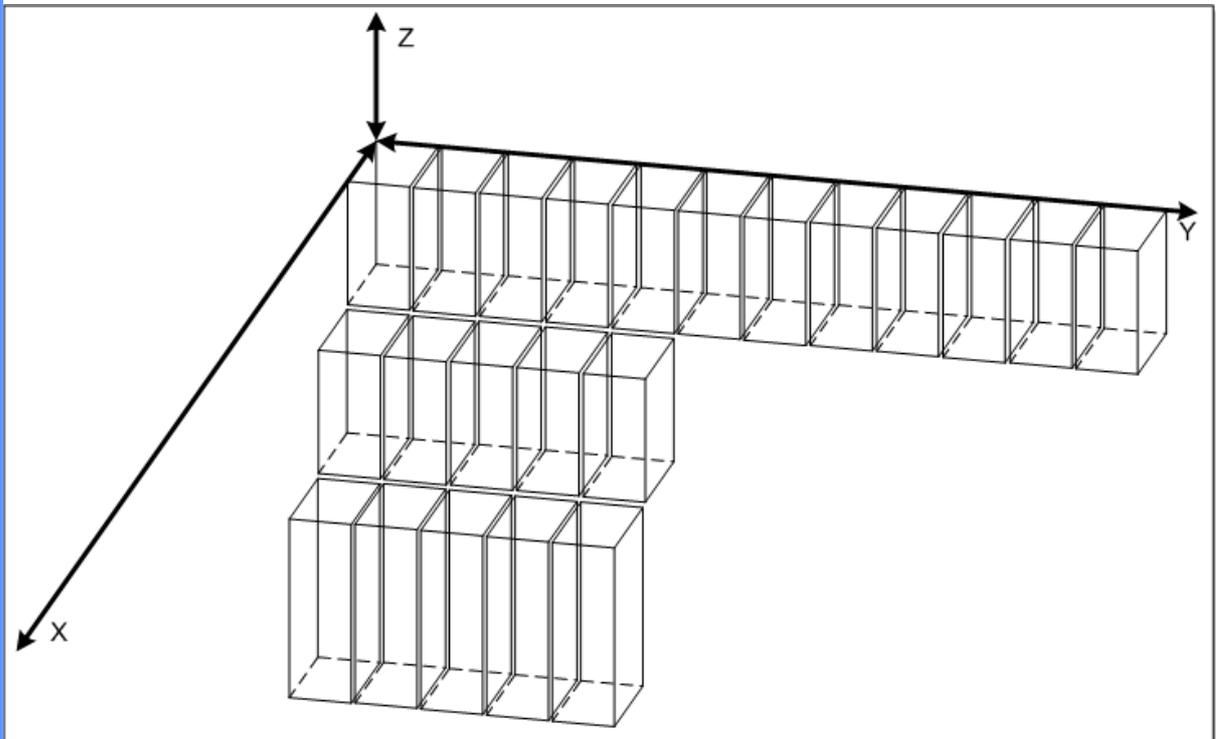


Figura 21: Discussão de futuro desenvolvimento de aplicativo para possibilitar a Visualização Gráfica 3D de volumes de paralelepípedos retangulares (cubóides)



5.1.8 Geração da documentação das informações obtidas durante o período

As informações coletadas com o grupo de Geomagnetismo INPE durante o transcorrer das atividades, bem como as pesquisas em publicações científicas, consultas em boletins informativos e comunidades online de geomagnetismo, e a contribuição de conhecimentos do bolsista, sob o escopo do Projeto "Desenvolvimento e Implementação de Programas para Visualização de Modelos 3D de Dados Geofísicos", estão descritas em síntese neste relatório.

6 Publicações Científicas (se houver) realizadas durante o período da bolsa

Nada a mencionar por parte do bolsista.

7 Conclusões Gerais

A etapa inicial do cronograma do projeto foi finalizada. Foi feita a absorção de conhecimentos com os procedimentos e códigos existentes na preparação de dados de indução eletromagnética, para seu posterior uso na inversão da sondagem magnetotelúrica (MT), empregado para a obtenção de modelos geofísicos do interior da Terra.

A segunda etapa do cronograma do projeto prevê o desenvolvimento e implementação de novos códigos computacionais que permitam a visualização de modelos obtidos através de processos de inversão 3D dos dados experimentais.

7.1 Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais por dispor de área física incluindo materiais e equipamentos para a realização do trabalho, aos colaboradores da Divisão de Geofísica Espacial da Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas do INPE, e em especial ao pesquisador Dr. Ícaro Vitorello pelos conhecimentos agregados durante as discussões técnicas do projeto.



7.2 Bibliografia Suplementar

ALBERTI, A.. **Ondas solares podem influenciar equipamentos tecnológicos.** Curitiba: Parana-online, 2005. Disponível em: <<http://www.parana-online.com.br/canal/tecnologia/news/115442/>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

ALUMBAUGH, D. L.; NEWMAN, G. A.; PREVOST, L.; SHADID, J. N.. Three-dimensional wide band electromagnetic modeling on massively parallel computers. **Radio Science Journal**, v. 33, p. 1-23, 1996.

AVDEEV, D. B.. Three-dimensional electromagnetic modelling and inversion from theory to application. **Surveys in Geophysics**, v. 26, p. 767-799, 2005.

AVDEEVA, A. **Three-dimensional magnetotelluric inversion.** Doctor of Philosophy. National University of Ireland, Faculty of Science, Department of Earth and Ocean Sciences, 2008.

BOLOGNA, M. S.; EGBERT, G. D.; KELBERT, A.; PÁDUA, M. B.; VITORELLO, Í.; PADILHA, A. L.; SAMPAIO, E. E. S.. Geoelectrical structure of the Archean Serrinha Block and surroundings, Northeastern Brazil, obtained from 3D modeling of magnetotelluric measurements. In: **13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and EXPOGEF**, 2013, Rio de Janeiro.

BOLOGNA, M. S.; EGBERT, G. D.; PÁDUA, M. B.; VITORELLO, Í.; PADILHA, A. L.; SAMPAIO, E. E. S.. Preliminary results of a 3D magnetotelluric inversion of data from the northeastern São Francisco craton, Brazil. In: **21st International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth**, 2012, Darwin.

BRIGHAM, E. O.. **The Fast Fourier Transform.** New Jersey: Prentice-Hall, 1974.

CAGNIARD, L.. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. **Geophysics**, v. 18, p. 605-635, 1953.

CHAVE, A. D.; JONES, A. G. **The magnetotelluric method: theory and practice.** New York: Cambridge University Press, 2012.

DIAS-MTNet. **J-to-Rho+**: converts J-format and Egbert format responses to input file for Parker and Booker's Rho+ (1996). Disponível em: <<http://mtnet.dias.ie/main/source.html>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

EGBERT, G. D.; KELBERT, A.. Computational recipes for electromagnetic inverse problems. **Geophysical Journal International**, v. 189, n. 1, p. 251-267, 2012. (atualização do sistema ModEM)



EGBERT, G. D.; KELBERT, A.; MEQBEL, N.. **ModEM**: modular EM inversion software, for 3D inversion of magnetotelluric (MT) data. Oregon: Oregon State University, 2012. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/modularem/>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

EGBERT, G. D.; KELBERT, A.; MEQBEL, N.; WENG, A. ModEM: a modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. **AGU Fall Meeting**, v. 1, p. 2072, 2010.

EGBERT, G. D.; EISEL, M.. **EMTF**: programs for robust single station and remote reference analysis of magnetotelluric data. Oregon: Oregon State University, 2010. Disponível em: <<http://www.complete-mt-solutions.com/mtnet/programs/egbert.html>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

EGBERT, G. D.. Robust multiple station magnetotelluric data processing. **Geophysical Journal International**, v. 130, n. 2, p. 475-496, 1997. (Gary Egbert's codes for Time Series Processing Codes, EMTF.tar.gz)

JONES, A. G.. **Data format TS-format, documentation version 1.3 (1999), time series format for input to LIMS processing codes**. Disponível em: <<http://mtnet.dias.ie/main/source.html>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

JONES, A. G.. **Data format J-format (magnetotelluric data file Jones format), documentation version 2.0 (1994), for spectra and impedance estimates**. Disponível em: <<http://mtnet.dias.ie/main/source.html>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

KELBERT, A.; MEQBEL, N.; EGBERT, G. D.; TANDON, K.. ModEM: a modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. **Computers & Geosciences**, v. 66, p. 40-53, 2014.

KELBERT, A.. **EMTF FCU**: user's guide. Washington: IRIS SeisCode, 2013. Disponível em: <<https://seiscode.iris.washington.edu/>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

KELBERT, A.; EGBERT, G. D.. Inversion of large-scale 3D MT data sets such as EMSCOPE with ModEM, a modular EM inversion system. **AGU Fall Meeting**, v. 89, n. 41, p. 771, 2008.

KELBERT, A.; EGBERT, G. D.. A modular system for EM inversion: implementation of NLCG for 3-D magnetotelluric data. **AGU Fall Meeting**, v. 33, p. 1254, 2007.

KELBERT, A.; SCHULTZ, A.; EGBERT, G. D.. A non-linear conjugate gradient numerical inverse solution for the problem of 3-D global electromagnetic induction. **AGU Fall Meeting**, v. 87, n. 52, p. 1605, 2006.



MARTI, A.; QUERALT, P.; LEDO, J.. WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 12, p. 2295-2303, 2009.

MOORKAMP, M.; HEINCKE, B.; JEGEN, M.; ROBERTS, A. W.; HOBBS, R. W.. A framework for 3-D joint inversion of MT, gravity and seismic refraction data. **Geophysical Journal International**, v. 184, p. 477-493, 2011.

NABIGHIAN, M. N.. The analytic signal of two di-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. **Geophysics**, v. 37, p. 507-517, 1972.

NEWMAN, G. A.; ALUMBAUGH, D. L.. Three-dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients. **Geophysical Journal International**, v. 140, p. 410-424, 2000.

NEWMAN, G. A.; ALUMBAUGH, D. L.. Three-dimensional massively parallel electromagnetic inversion – I. Theory. **Geophysical Journal International**, v. 128, p. 345-354, 1997.

PÁDUA, M. B., VITORELLO, I., PADILHA, A. L.. 3-D modeling of coast effects in MT soundings at the Borborema Province (NE Brazil). In: **10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, Rio de Janeiro, 2007.

PARKER, R. L.; BOOKER, J. R.. Optimal one-dimensional inversion and bounding of magnetotelluric apparent resistivity and phase measurements. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 98, n. 3-4, p. 269-282, 1996. (Rho+ code, rhoplus.zip)

SIMPSON, F.; BAHR, K.. **Practical Magnetotellurics**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2005.

SIRIPUNVARAPORN, W.; SARAKORN, W.. An efficient data space conjugate gradient Occam's method for three-dimensional magnetotelluric inversion. **Geophysical Journal International**, v. 186, n. 2, p. 567-579, 2011.

SIRIPUNVARAPORN, W.. Three-dimensional magnetotelluric inversion: an introductory guide for developers and users. **Surveys in Geophysics**, v. 33, n. 1, p. 5-27, 2011.

SIRIPUNVARAPORN, W.; EGBERT, G. D.. WSINV3DMT: vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 173, n. 3-4, p. 317-329, 2009.



SIRIPUNVARAPORN, W.; EGBERT, G. D.; UYESHIMA, M.. Interpretation of two-dimensional magnetotelluric profile data with three-dimensional inversion: synthetic examples. **Geophysical Journal International**, v. 160, p. 804-814, 2005.

SIRIPUNVARAPORN, W.; EGBERT, G. D.; LENBURY, Y.; UYESHIMA, M.. Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 150, n. 1-3, p. 3-14, 2005.

SIRIPUNVARAPORN, W.; EGBERT, G. D.; LENBURY, Y.; UYESHIMA, M.. **WSINV3DMT 3-D inversion code for Magnetotelluric data**. Disponível em: <<http://mucc.mahidol.ac.th/~scwsp/wsinv3dmt/>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

SIRIPUNVARAPORN, W.; UYESHIMA, M.; EGBERT, G. D. Three-dimensional inversion for network-magnetotelluric data. **Earth Planets Space**, v. 56, p. 893-902, 2004. (WSINV3DMT 3-D inversion code for magnetotelluric data)

SIRIPUNVARAPORN, W.; EGBERT, G. D.. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. **Geophysics**, v. 65, n. 3, p. 791-803, 2000. (REBOCC: Weerachai Siripunvaraporn and Gary Egbert's 2D inversion code; Occam's inversion of Siripunvaraporn and Egbert).

TIKHONOV, A. N.. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust. **Doklady Akademii Nauk SSSR**, v. 73, p. 295-297, 1950.

UIEDA, L.; OLIVEIRA JR, V. C.; SANTOS, H. B.; FERREIRA, A.; CAPARICA JR, J. F.; BARBOSA, V.. Fatiando a Terra: biblioteca open source de métodos geofísicos. In: **Boletim SBGf**: segurança em equipes sísmicas terrestres. n. 89, p. 13, 2014.

UIEDA, L.; OLIVEIRA JR, V. C.; SANTOS, H. B.; FERREIRA, A.; CAPARICA JR, J. F.; BARBOSA, V.. **Fatiando a Terra**: versão 0.2. Disponível em: <<http://fatiando.org>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

VITORELLO, Í.; PADILHA, A. L.; PÁDUA, M. B.; FONTES, S. L.; BOLOGNA, M. S.; SANTOS, A. C. L.; FUCK, R. A.. Electromagnetic Induction Studies in the Borborema Province and Adjacent Terrains, Northeastern Brazil: 2013-INCTET Progress Report. In: **Thirteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 2013, Rio de Janeiro.

VOZOFF, K.. The magnetotelluric method. In: NABIGHIAN, M. N., **Geophysics**, v.37, p.507-517, 1972. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, v. 2, p. 641-711, 1991.

WIGHT, D. E.; BOSTICK, F. X.. Cascade decimation: a technique for real time estimation of power spectra. **Proceedings...** International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, v. 5, p. 626-629, 1980.



São José dos Campos-SP, 30 de junho de 2015

Fernando Luiz Prochnow Ramme

Bolsista: Fernando Luiz Prochnow Ramme

Antonio Lopes Padilha

Supervisor(a): Antonio Lopes Padilha

Alisson Dal Lago

Coordenador(a) PCI da área: Alisson Dal Lago