

ESTUDOS IONOSFÉRICOS ATRAVÉS DE EXPERIMENTOS LANÇADOS A BORDO DE FOGUETES E SATÉLITES

Anderson Rodrigues (Bolsista PIBIC/CNPq)

Aluno da Universidade de Mogi das Cruzes - UMC

Orientador: Dr. Polinaya Muralikrishna, pesquisador DAE

A ionosfera é uma camada da atmosfera que está aproximadamente de 50 à 1.000 km acima da crosta terrestre. É uma camada condutiva, por conter íons e elétrons. É definida como sendo a região da atmosfera superior onde íons e elétrons existem em quantidades suficientes para influenciar a propagação de ondas de rádio. Para monitorar continuamente a ionosfera e para estudar os processos dinâmicos e eletrodinâmicos da ionosfera a Divisão de Aeronomia do INPE vem operando uma rede de equipamentos como Ionossonda, Digissonda, Polarímetro, Radar Coerente, Receptores de GPS etc, instalados nos vários pontos distribuídos no território Brasileiro.

- Ionossonda, mede parâmetros ionosféricos, trata-se de um sistema transmissor-receptor;
- Digissonda, possui o mesmo princípio de funcionamento da ionossonda, mas é um equipamento digital mais moderno e preciso;
- Polarímetro, A medida da fase e o ângulo de amplitude desse sinal permite o estudo da variação integral da densidade eletrônica das camadas e das perturbações;
- Radar Coerente é um equipamento usado globalmente para estudar os processos dinâmicos e eletrodinâmicos que operam no plasma ionosférico;
- Receptores de GPS são equipamentos que podem dar a distribuição espacial e conteúdo eletrônico total do plasma ionosférico.

A Divisão de Aeronomia do INPE também vem trabalhando na área de desenvolvimento dos experimentos lançados a bordo de foguetes e satélites com a finalidade de estudar a os processos dinâmicos e eletrodinâmicos que operam no plasma ionosférico. Nos últimos 15 anos varias cargas úteis, capazes de medir os campos elétricos e a densidade eletrônica in loco foram lançados dos centros de lançamento de foguetes em Natal-RN e Alcântara – MA.

- LP(Sonda de Langmuir) consiste em um sensor metálico esférico, mede a densidade eletrônica e a distribuição espectral de irregularidades de plasma.
- HFC(Sonda de Capacidade de Alta Frequência) é um sensor esférico, associado a um oscilador par medir, com alta precisão, a distribuição da densidade do plasma.
- ETP(Sonda de Temperatura Eletrônica) , mede a temperatura cinética dos elétrons.

Um dos principais parâmetros nestes estudos é o campo magnético terrestre cujo conhecimento é necessário para modelagens teóricas, semi-empíricas ou empíricas. O objetivo principal do trabalho que está sendo iniciado é de desenvolver um software que pode traçar as linhas de campo magnético terrestre a partir de um modelo simples de um dipólo inclinado. Este trabalho é baseado num processo de Transformação de Coordenadas, que está sendo desenvolvido em linguagem de programação Borland C++, cuja a primeira etapa está na fase de conclusão.

As ferramentas necessárias para este desenvolvimento são a Transformação de Coordenadas, Inversão de Matrizes e Conhecimento da estrutura básica do campo magnético terrestre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Relatório do CNPQ dos anos 1995, 1997 e 1999.
- Detalhes dos experimentos PLASMEX a bordo de SACI -1 e SACI -2.
- Kirchoff, V.W.J.H. Introdução à geofísica espacial. São Paulo: Nova Setella, EDUSP, 1991.

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Ciências Espaciais Atmosféricas
Divisão de Aeronomia**

Bolsista

Anderson Rodrigues

Orientador

prof^o Dr. Polinaya Muralikrishna

Título

***“Estudos Ionosféricos Através de Experimentos
Lançados a Bordo de Foguetes e Satélites.”***

**São José dos Campos
2000**

AGRADECIMENTOS

- ao prof ° Dr. Polinaya Muralikrishna pela oportunidade e todo apoio no decorrer deste trabalho;
- a Maurení Cistrina de Faria que iniciou este trabalho;
- a Minha Mãe e meus Irmãos que sempre me apoiaram;
- ao CNPq PIBIC, pela bolsa de Iniciação Científica;
- a todos os colegas de trabalho em especial a Lucia de Almeida Terra Limiro, Goreti dos Santos Aquino, Alcione Moura da Silva, Maria Eugenia e Luciana Maria Crespan.

ÍNDICE

1- INTRODUÇÃO	1
2- CONCEITOS BÁSICOS	2
2.1- A Ionosféra Terrestre.....	2
2.2- Regiões da ionosfera	3
2.2.1- Região D	4
2.2.2- Região E	4
2.2.3- Região F	5
2.3- Irregularidades da ionosfera	6
2.3.1- Eletrojato Equatorial	6
2.3.2- Bolhas ionosféricas	7
2.4- Equipamentos para coletas de dados	8
2.4.1- Carga Útil	9
3- DEFINIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	10
3.1- Sonda de Langmuir (LP).....	10
3.1.2- Sonda Capacitiva em Alta Frequência (HFC) ---	11
3.1.3- Sonda de Temperatura Eletrônica (ETP)	11
3.2- Microcontrolador	11
4- MODELAGEM DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE	12
5- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1- INTRODUÇÃO

Um dos principais parâmetros nos estudos dos processos dinâmicos e eletrodinâmicos do plasma ionosférico e da modelagem ionosférica é o campo magnético terrestre cujo conhecimento é necessário para modelagens teóricas, semi-empíricas ou empíricas. O objetivo principal do trabalho que está sendo iniciado é de desenvolver um software que pode traçar as linhas de campo magnético terrestre a partir de um modelo simples de um dipólo inclinado. Este trabalho é baseado num processo de Transformação de Coordenadas, que está sendo desenvolvido em linguagem de programação Borland C++, cuja a primeira etapa está na fase de conclusão.

Além de Ter um conhecimento da estrutura básica do campo magnético terrestre o desenvolvimento necessita das seguintes ferramentas matemáticas:

- Transformação de Coordenadas;
- Inversão de Matrizes;

2- CONCEITOS BÁSICOS

2.1- A IONOSFERA TERRESTRE

A *ionosfera* é uma camada da atmosfera que está aproximadamente de 50 à 1.000 km acima da crosta terrestre. É uma camada condutiva, por conter íons e elétrons. É definida como sendo a região da atmosfera superior onde íons e elétrons existem em quantidades suficientes para influenciar a propagação de ondas de rádio. Ela é o resultado da interação de radiação ionizante, eletromagnética e corpuscular, com os constituintes neutros da atmosfera, formando pares elétron-íon que, finalmente, se recombina. Ela é mantida por um balanço de produção elétron-íon, mecanismos de perda físicos e químicos, e processos de transporte.

Por ser boa condutora e refletora de ondas eletromagnéticas, a ionosfera é muito utilizada nas comunicações e telecomunicações, via sinal de rádio.

Os limites inferior não são perfeitamente definidos, porém a concentração de íons se torna muito pequena, abaixo de 70 km e acima de 1.000 km. A essa região, entre 70 e 1.000 km, dá-se o nome de "**Plasma Ionosférico**".

São nas irregularidades do plasma ionosférico que se dá o maior problema de interferência nas transmissões. As interferências existem devido às alterações ocorridas na densidade eletrônica do plasma ionosférico, ou seja, há um aumento ou diminuição da densidade eletrônica. E estas flutuações da densidade são resultados dos processos dinâmicos e eletrodinâmicos da ionosfera. As bolhas são flutuações da densidade de grande escala.

A figura 1 ilustra as camadas da atmosfera da terra normalmente definidas em função do perfil de temperatura, localizando a ionosfera.

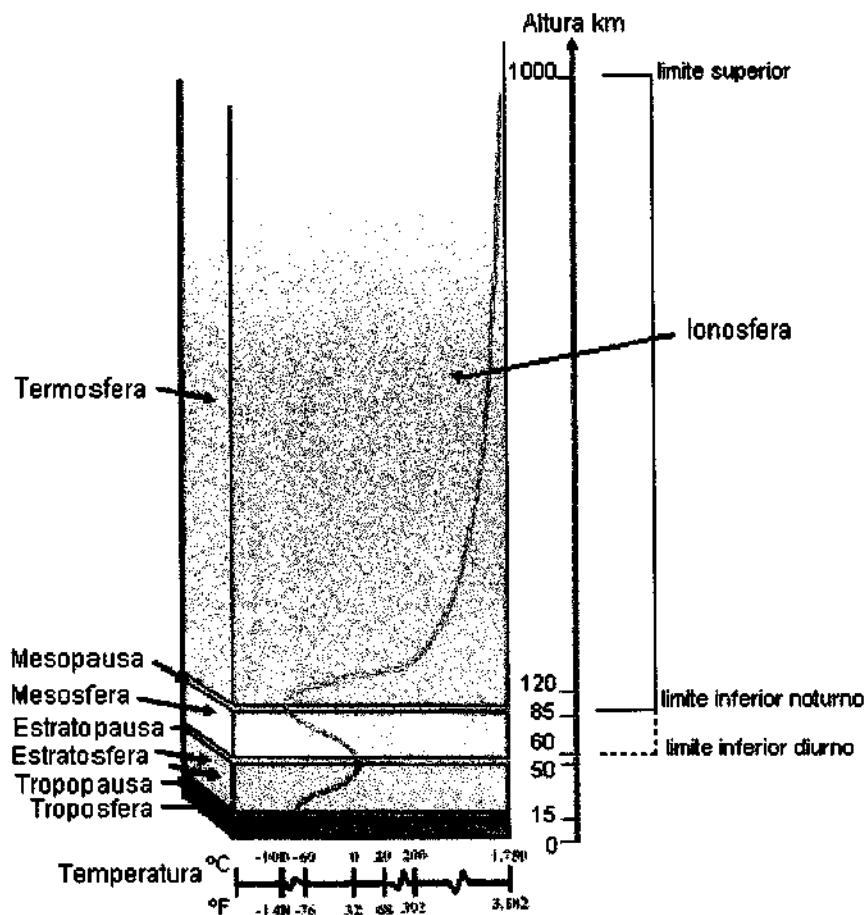


FIGURA 1 - Localização da ionosfera através da ilustração das camadas atmosféricas em relação a temperatura

2.2- REGIÕES DA IONOSFERA

De acordo com a sua variação em altura, a ionosfera está dividida em três regiões, cada uma com suas propriedades características (vide figura). . Essas regiões são denominadas de: região D, região E e região F sendo que a região F se divide em região F1 e região F2 como ilustra a figura 2:

Os estudos das regiões da ionosfera são interessantes por sustentar uma ampla área de fenômenos físicos. Muitos destes estudos tem como objetivo detectar e interpretar a variação de elétrons livres com a altura.

O perfil da densidade eletrônica do dia, atinge um pico superior a noturna, por causa da presença do Sol, como ilustra a figura 2:

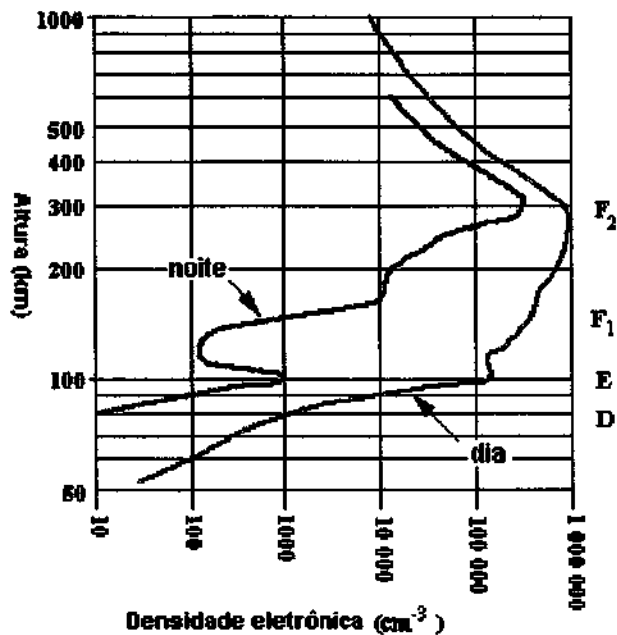


FIGURA 2 – Nomenclatura e localização das camadas ionosféricas em função da densidade eletrônica

2.2.1- Região D

A região D, consiste na parte inferior da ionosfera, até cerca de 80 km. Devido à densidade atmosférica ser maior nesta região do que nas outras, a importância de colisões entre íons, elétrons, e partículas neutras é considerável. Também denominada baixa ionosfera é a menos densa de todas as regiões ionosféricas deixando de existir durante a noite. A densidade atmosférica é bastante significativa sendo que para qualquer estudo dessa região torna-se essencial levar em consideração as colisões entre íons, os elétrons e as partículas neutras.

2.2.2- Região E

A região E situa-se entre a região D e F, aproximadamente entre 80 km e 130 km acima da superfície terrestre. É a região de máxima condutividade elétrica. Sua importância é devido à presença das correntes elétricas ionosféricas e sua interação com o campo geomagnético.

2.2.3- Região F

A região F engloba as regiões superiores da ionosfera, inclusive o pico de densidade em torno de 300 km, possuindo as regiões refletoras mais importantes da ionosfera denominadas de camada F1, tipicamente diurna, e camada F2, a região F1 em torno de 200 km a região F2 acima. A região F1 é definida pela aparição esporádica de um pequeno pico secundário na concentração eletrônica, ou de apenas uma inflexão na curva em torno de 180 km. A região F2 consiste de toda a região superior da ionosfera e é nessa região que se concentram os íons e elétrons da ionosfera. A região F engloba as regiões superiores da ionosfera, inclusive o pico de densidade em torno de 300 km.

Camada F1

É caracterizada por um pequeno pico secundário ou uma pequena inflexão na curva da concentração de elétrons em torno de 180 km.

Camada F2

A camada F2 consiste de toda região superior da ionosfera e é nessa região que se concentram os íons e elétrons da ionosfera.

Camada F3

A camada F3 consiste em um pico de ionização formada em altas altitudes acima do pico da F2 e só é observada em baixas latitudes em torno do equador magnético.

A literatura geral sobre ionosfera não inclui a camada F3, pois o estudo dessa camada só se intensificou a partir de 1977, após a publicação do trabalho de Balan et al.(1977) em que foram apresentados cálculos teóricos e os primeiros resultados observacionais da camada. Este trabalho de iniciação científica está inserido dentro das pesquisas que o grupo de ionosfera do INPE está realizando nesta área.

2.3- IRREGULARIDADES DA IONOSFERA

Devido a sua complexidade e variabilidade, a ionosfera necessita ser monitorada continuamente através de intensas atividades de medidas de modo a fornecer um quadro claro da dinâmica da região.

Com o advento dos satélites artificiais norte-americanos no início dos anos 60, como meio de comunicação, a ionosfera foi “substituída” pelos satélites de comunicação, os quais funcionam de forma muito mais eficiente pois recebem, amplificam e retransmitem em direção à Terra as ondas de rádio. As comunicações via satélite passaram então a ser feitas em frequências muito elevadas, da ordem de GHz (10⁹), em cujas frequências, as interferências ionosféricas deveriam ser desprezíveis. Entretanto, no início dos anos 70, para a surpresa dos especialistas norte americanos, as comunicações via satélites sofreram altíssimas interferências ionosféricas na região equatorial.

Muitos pesquisadores consideram até hoje tal fenômeno como sendo a maior surpresa daquela década no campo de estudos da rádio propagação ionosférica. Inicialmente, tal interferência era inexplicável e representava um desafio para os cientistas. Descobriu-se depois, que tais interferências decorriam de fortíssimas irregularidades na distribuição de elétrons e íons no plasma ionosférico.

2.3.1- ELETROJATO EQUATORIAL

A ionosfera como já se sabe possui grandes quantidades de cargas elétricas. O eletrojato equatorial é um sistema de correntes naturais das partículas carregadas que correm durante o dia numa faixa de latitude de aproximadamente 15° em torno do equador geomagnético, numa faixa de altura de 95-120 km (região E da ionosfera equatorial, na direção leste-oeste). Na região do eletrojato, o plasma ionosférico é altamente instável e irregularidades de plasma de vários tipos são gerados nesta região. Possui dimensões de

dezenas de km na direção vertical e centenas de km na direção norte-sul.

Este fenômeno ocorre quando há o surgimento de “impulsos” dado aos íons pelos Ventos Neutros (Movimento Global das Partículas não Ionizadas). Diante deste fato pode-se afirmar que o eletrojato equatorial exhibe correntes elétricas.

Este fenômeno tem grande importância tanto para um entendimento da física da ionosfera, quanto para questões práticas de prospecção em **Geologia**, que utilizam o **campo magnético** como um parâmetro para estudos.

2.3.2- BOLHAS IONOSFÉRICAS

Conhecidas na literatura científica como “Spread-F”, as bolhas ionosféricas são imensas regiões do espaço onde a densidade do plasma ionosférico é drasticamente reduzida, estendem-se ao longo das linhas de força do campo magnético terrestre alcançando extensões de 10000 km e cerca de 150 km a 300 km na direção perpendicular .

As bolhas ionosféricas ocorrem de forma muito intensa sobre o território brasileiro, onde as irregularidades do plasma assumem proporções extraordinariamente alta.

O Observatório Ótico da Divisão de Aeronomia do INPE, localizado em Cachoeira Paulista-SP, detectou pela primeira vez, utilizando técnicas óticas, a ocorrência das bolhas ionosféricas sobre o continente sul americano em 1976. Tais observações também foram as primeiras observações internacionais. Naquela época quase nada se conhecia cientificamente sobre o fenômeno.

Atualmente, já existem técnicas avançadas que permitem corrigir as distorções de fase e de amplitude que as bolhas causam nas ondas de rádio utilizadas nas telecomunicações via satélite.

A faixa de alta frequência assim como as faixas de frequências inferiores, entretanto, continuam sendo as mais afetadas pois tal correção é mais complexa. É possível também ocorrer tais interferências nos sinais recebidos por antenas parabólicas instaladas em residências causando desnecessários desentendimentos entre fornecedores e clientes de antenas parabólicas, dado que o problema geofísico pode ser interpretado como problema técnico.

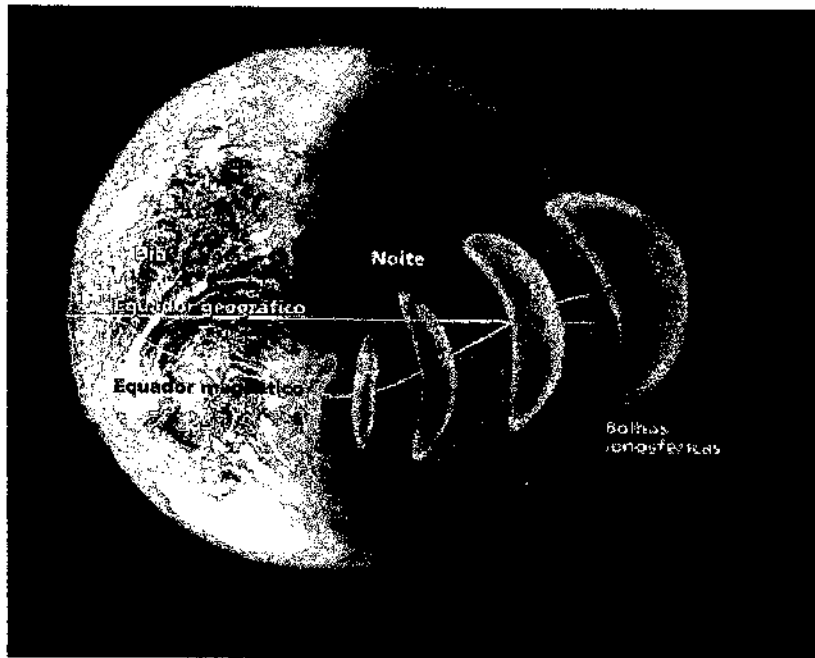


FIGURA 3 - Bolhas Ionosféricas

2.4- EQUIPAMENTOS PARA COLETA DE DADOS

Para monitorar continuamente a ionosfera é necessário descrever alguns equipamentos disponíveis para a obtenção dos dados, como:

- **POLARÍMETRO:** O equipamento recebe um sinal polarizado linearmente que atravessa as camadas ionosféricas e é transmitido por um satélite geoestacionário. A medida da fase e o ângulo de amplitude desse sinal permite o estudo da variação integral da densidade eletrônica das camadas, bem como das perturbações (variações irregulares da densidade) que causam o espalhamento do sinal enviado pelo satélite.

- **SATÉLITE:** Através de cargas úteis a bordo de satélites é possível efetuar sondagem do topo da ionosfera, vindo assim, completar as informações das digissonda já que estas mostram o perfil até a altura do pico.

- **IONOSSONDA:** É um dos instrumentos mais representativos para a medida de parâmetros ionosféricos. Trata-se de um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética em frequência variável, em seqüência, tipicamente de 1 a 5MHz. O sinal emitido, normalmente na vertical, é refletido pela ionosfera e em função do tempo decorrido entre a transmissão e recepção do pulso à frequência f , obtêm-se as chamadas curvas de $h'(f)$ ou ionogramas.
- **DIGISSONDA:** Possui o mesmo princípio de funcionamento da ionossonda, mas é um equipamento digital mais moderno e preciso.

2.4.1- CARGA ÚTIL

Para se conceituar melhor sobre cargas úteis podemos dizer que são mecanismos (sensores) desenvolvidos para coletarem dados específicos sobre determinadas ocorrências físicas, que tentam minimizar e melhorar os estudos da ionosfera e ainda que servem de suporte tecnológico para o desenvolvimento de satélites.

Seu funcionamento se dá com seus mecanismos acoplados aos foguetes que por sua vez possuem uma trajetória estabelecida com tempo determinado para a obtenção dos dados.

3- Definição dos Experimentos

3.1- Sonda de Langmuir (LP)

O LP (Sonda Langmuir Probe) consiste em um sensor metálico esférico, mede a densidade eletrônica e a distribuição espectral de irregularidades de plasma.

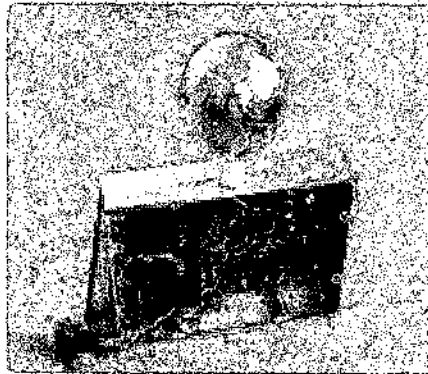


Figura 6 - LP (Sonda Langmuir Probe)

Este experimento precisa de um sensor esférico, este deve ser montado atrás de um dos painéis solares, dividido em dois módulos, de maneira a reduzir a interferência de outros experimentos, e do potencial flutuante do satélite.

Um sistema de amplificador é usado para medir a corrente do sensor LP, esta é medida na taxa de 12.5 exemplos/segundos e a AC na taxa de 1600 exemplos/segundos, que são transmitidos por palavras digitais de 8 bit, LPSDC, LPSAC, LPINT, LPMGB.

Os dados adquiridos junto com os de outros experimentos PLASMEX iriam para a memória local do microcontrolador PLASMEX para transmitir ao OBC.

O LP estando no modo processamento de bordo, o LPSAC estaria sujeito a ser transmitido para o OBC com um FFT a bordo e os dados espectrais seriam guardados na memória para a transmissão.

3.1.2- Sonda Capacitiva em Alta Frequência (HFC)

O HFC (Sonda de Capacitância de Alta Frequência) é um sensor esférico, associado a um oscilador para medir, com alta precisão, a distribuição da densidade do plasma. É montado atrás de um painel solar de maneira a reduzir a interferência de outros experimentos e do potencial flutuante do satélite.

A frequência do oscilador é medida através de um sistema de contador de pulso, na taxa de 12.5 medidas por segundo, e é transmitida por 3 palavras digitais de 8 bit (HFC0, HFC1, HFC2).

O HFC0 contém o LSB (menos significativo); HFC1 e HFC2 contém o MSB (mais significativo) e o HFC3 (variando de 0 à 5 V) é um sinal analógico que monitora a performance do experimento.

Estes dados digitais seriam adquiridos e armazenados na memória do microcontrolador PLASMEX, que transmitiria para o OBC (On Bord Computer) por uma porta serial (RS-422 serial output).

3.1.3- Sonda de Temperatura Eletrônica (ETP)

O ETP (Electron Temperature Probe), mede a temperatura cinética dos elétrons. Este equipamento contém dois sensores semicirculares e a unidade eletrônica . Estes sensores são montados em uma das extremidades de um dos painéis solares de maneira a reduzir a interferência de outros experimentos, é do potencial flutuante do satélite.

Um sinal RF de 30 KHz é aplicado a um dos sensores e um sistema de amplificadores é usado para medir na curva IV do sensor (corrente X voltagem).A temperatura eletrônica poderá ser estimada a partir destas variações. A partir do sinal recebido do segundo sensor o potencial flutuante do espaço poderá ser estimado. A taxa de aquisição é 12.5 exemplos/segundos, estes serão transmitidos em palavras de 8 bit ETP0 e ETP1.

3.2- MICROCONTROLADOR

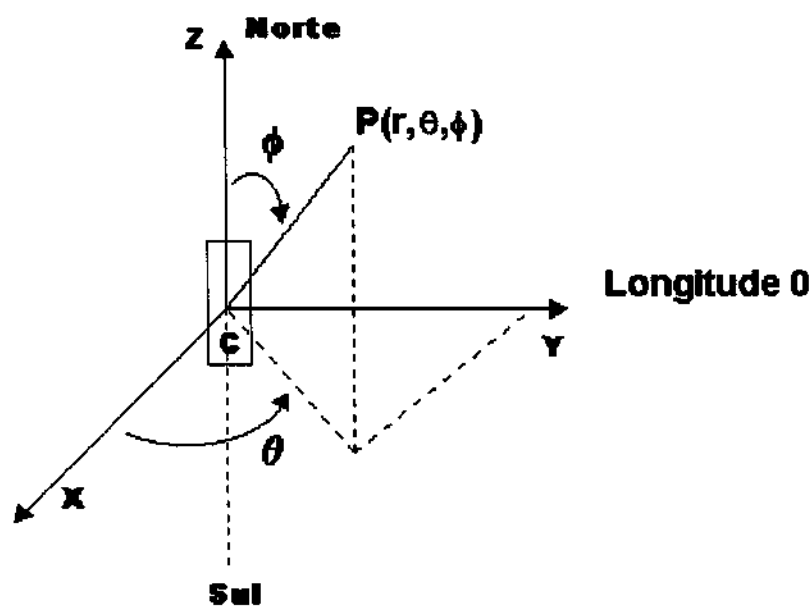
Os experimentos PLASMEX/PDP, isto é, a *Sonda HFC*, *Sonda de Langmuir* e a *Sonda de Temperatura de Elétron* serão operadas por comandos

de um *Microcontrolador* a bordo. Os comandos específicos usados para mudar os modos operacionais dos experimentos também serão providos pelo *Microcontrolador*. O *Microcontrolador* também cuidará da transferência de dados dos experimentos para o *OBC (On Board Computer)*.

4- MODELAGEM DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Problema: Traçar as linhas do campo magnético terrestre com um modelo analítico simples.

Passo 1: Supondo que o eixo principal do Imã Terrestre é alinhado com Norte- Sul Geográfico.



$P(r, \theta, \phi)$ é um ponto no sistema de coordenadas polares. Este ponto P tem as seguintes coordenadas cartesianas.

$$X = r \sin \phi \cos \theta \quad 1$$

$$Y = r \sin \phi \sin \theta \quad 2$$

$$Z = r \cos \phi \quad 3$$

Passo 2: O centro do Imã é deslocado para o ponto (X_0, Y_0, Z_0) ; é um sistema de coordenadas cartesianas, também é deslocado de tal maneira que a origem nova é o ponto (X_0, Y_0, Z_0) .

Neste sistema novo de coordenadas, o ponto P tem as seguintes coordenadas:

$$X' = X - X_0$$

$$Y' = Y - Y_0$$

$$Z' = Z - Z_0$$

Se r', θ' e ϕ' são as novas coordenadas polares, então:

$$X' = r' \sin \phi' \cos \theta' \quad 4$$

$$Y' = r' \sin \phi' \sin \theta' \quad 5$$

$$Z' = r' \cos \phi' \quad 6$$

Seja, a nova origem (X_0, Y_0, Z_0) com as coordenadas polares (r_0, θ_0, ϕ_0) , então:

$$X_0 = r_0 \sin \phi_0 \cos \theta_0 \quad 7$$

$$Y_0 = r_0 \sin \phi_0 \sin \theta_0 \quad 8$$

$$Z_0 = r_0 \cos \phi_0 \quad 9$$

Usando as relações de 1 até 9.

$$X' = X - X_0 \text{ dá}$$

$$r' \sin \phi' \cos \theta' = r' \sin \phi \cos \theta - r_0 \sin \phi_0 \cos \theta_0 \quad 10$$

$$Y' = Y - Y_0 \text{ dá}$$

$$r' \sin \phi' \sin \theta' = r \sin \phi \sin \theta - r_0 \sin \phi_0 \sin \theta_0 \quad 11$$

$$Z' = Z - Z_0 \text{ dá}$$

$$r' \cos \phi' = r \cos \phi - r_0 \cos \phi_0 \quad 12$$

Dividindo 11 por 10

$$\tan \theta' = \frac{r \sin \phi \sin \theta - r_0 \sin \phi_0 \sin \theta_0}{r' \sin \phi \cos \theta - r_0 \sin \phi_0 \cos \theta_0}$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left[\frac{r \sin \phi \sin \theta - r_0 \sin \phi_0 \sin \theta_0}{r' \sin \phi \cos \theta - r_0 \sin \phi_0 \cos \theta_0} \right] \quad 13$$

Da equação 10

$$r' \sin \phi = \frac{r' \sin \phi \cos \theta - r_0 \sin \phi_0 \cos \theta_0}{\cos \theta'} \quad 14$$

Dividindo 14 por 12

$$\tan \phi' = \frac{r' \sin \phi \cos \theta - r_0 \sin \phi_0 \cos \theta_0}{\cos \theta' (r \cos \phi - r_0 \cos \phi_0)}$$

Ou

$$\phi' = \tan^{-1} \left[\frac{r' \sin \phi \cos \theta - r_0 \sin \phi_0 \cos \theta_0}{\cos \theta' (r \cos \phi - r_0 \cos \phi_0)} \right] \quad 15$$

Onde θ é dado pela relação 13

Da equação 12

$$r' = \frac{r \cos \phi - r_0 \cos \phi_0}{\cos \phi'} \quad 16$$

Equações 13, 15 e 16 dão valores (r', θ', ϕ') que são as coordenadas polares do ponto P num sistema novo de Coordenadas cuja origem é deslocado para o ponto (r_0, θ_0, ϕ_0) .

Passo 3: Neste passo o dipólo é inclinado para uma posição realística.

A partir dos dados observacionais, tem-se:

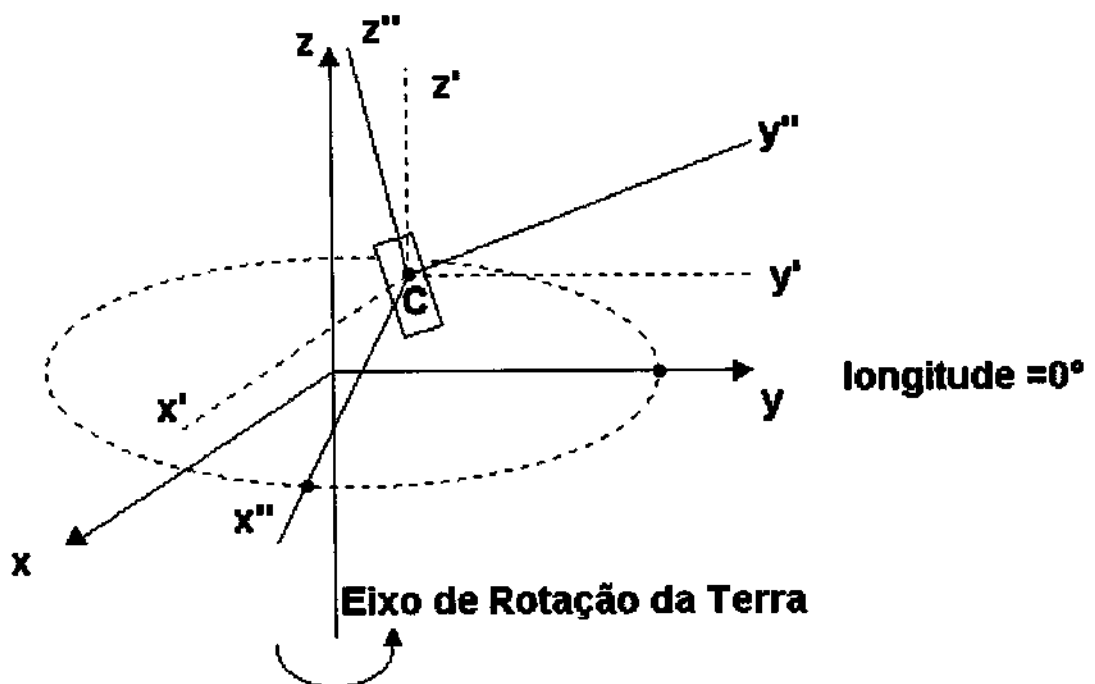
$$\begin{array}{l} \text{Polo Norte} \Rightarrow r_n, \theta_n, \phi_n \\ \text{Polo Sul} \Rightarrow r_s, \theta_s, \phi_s \end{array} \quad \left[\begin{array}{c} \text{Coordenadas Geográficas} \end{array} \right]$$

Supondo que o imã terrestre é simétrica na direção norte – sul, o centro do imã que será a origem do novo sistema de coordenadas, tem as seguintes coordenadas polares (no sistema de coordenadas geográficas)

$$r_c \Rightarrow r_0$$

$$\theta_n \Rightarrow \theta_0$$

$$\phi_n \Rightarrow \phi_0$$



O trabalho do passo 3 está em andamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Relatório do CNPq dos anos 1995, 1997 e 1999.
- Detalhes dos experimentos PLASMEX abordo de SACI -1 e SACI -2.
- Kirchhoff, V.W.J.H. Introdução à geofísica espacial. São Paulo: Nova Setella, EDUSP, 1991.
- Kelley, M.C. The Earth's ionosphere. San Diego: Academic Press, 1989.
- Lindzen, R. S.; Chapman, S. Atmospheric tides. Space Science Review, v. 10, n. 3, 1969.
- Abdu, M. A.; P. Muralikrishna and I. S. Batista, On the rocket induced wave disturbances in the daytime equatorial ionosphere, J. Geophys. Res. 93, 2758-2760, 1988.
- Abdu, M. A.; P. Muralikrishna and I. S. Batista, and J. H. A. Sobral, Rocket observation of equatorial plasma bubbles over Natal, Brasil using a High Frequency Capacitance probe, J. Geophys. Res. 96, 7689-7695, 1991.