



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-14452-TDI/1143

## APLICAÇÕES DO GPS (SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL) NAS RADIOCOMUNICAÇÕES

Miguel Enrique Dulanto Carbajal

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle, orientada pelos Drs. Ivan Jelinek Kantor e Eurico Rodrigues de Paula, aprovada em 21 de junho de 2002.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/08.04.03.25>>

INPE  
São José dos Campos  
2008

**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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO:****Presidente:**

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

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-14452-TDI/1143

## APLICAÇÕES DO GPS (SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL) NAS RADIOCOMUNICAÇÕES

Miguel Enrique Dulanto Carbajal

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle, orientada pelos Drs. Ivan Jelinek Kantor e Eurico Rodrigues de Paula, aprovada em 21 de junho de 2002.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/08.04.03.25>>

INPE  
São José dos Campos  
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

D886a Dulanto Carbajal, Miguel Enrique.

/ Miguel Enrique Dulanto Carbajal. – São José dos Campos: INPE, 2008.

153p. ; (INPE-14452-TDI/1143)

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Radiocomunicação. 3. Mapas ionosféricos globais. 4. Ondas eletromagnéticas. 5. Propagação ionosférica. I. Título.

CDU 629.7.05-192

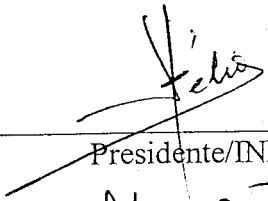
---

Copyright © 2008 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfílmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

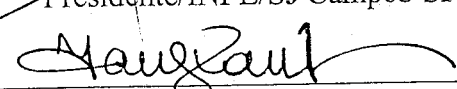
Copyright © 2008 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de **Mestre em**  
**Engenharia e Tecnologia**  
**Espaciais/Mecânica Espacial e**  
**Controle.**

Dr. Hélio Koiti Kuga

  
\_\_\_\_\_  
Presidente/INPE/SJ Campos-SP


Dr. Ivan Jelinek Kantor

  
\_\_\_\_\_  
Orientador/INPE/SJ Campos-SP

Dr. Eurico Rodrigues de Paula

  
\_\_\_\_\_  
Orientador/INPE/SJ Campos-SP

Dr. Paulo de Oliveira Camargo

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca  
Convidado UNESP, PPruidente-SP

Candidato: Miguel Enrique Dulanto Carbajal

São José dos Campos, 21 de junho de 2002.



## **RESUMO**

O Sistema de Posicionamento Global por satélites, tem-se tornado uma tecnologia útil e inovadora para diferentes atividades do conhecimento humano. Entre outras aplicações é uma poderosa ferramenta para fazer estudos da ionosfera, pela facilidade de acesso à informação, opera em forma contínua e em qualquer ponto da Terra ou perto dela. O trabalho usou a informação de Mapas Ionosféricos Globais (GIM) elaborados a partir de observáveis GPS, previamente processados pelos diferentes centros. Para fazer a predição do Conteúdo Total de Elétrons (TEC) em nível global, usamos os coeficientes de expansão harmônica gerados pelo Centro de Determinação de Órbitas Europeu na Universidade de Berna (Suíça), os quais permitem fazer uma representação global do TEC durante um período de tempo específico e para cada duas horas. O método que implementamos foi o Método de Máxima Entropia (MEM), com uma base de dados de 30 dias consecutivos, para poder calcular o TEC para os próximos seis dias. Com esta estimativa se conseguiu determinar alguns fatores primordiais para as radiocomunicações, especialmente para as bandas de HF, VHF, UHF e SHF. Os resultados de nosso programa mostram a nível global e para horários específicos o conteúdo total de elétrons, o excesso de atraso de tempo para uma frequência determinada, a frequência crítica da camada F2 e um exemplo de predição da frequência ótima de trabalho.





## **GPS APPLICATIONS FOR RADIOCOMMUNICATIONS**

### **ABSTRACT**

The Global Position System (GPS) is a powerful tool to study the ionosphere, is easy to access, works all the time and all around the world. We worked with GPS global ionosphere maps, that were previously processed by the Center for Orbit Determination in Europe, in the University of Bern (Switzerland) in IONEX format and coefficients (spherical harmonic expansion) every two hours to do a prediction of the global Total Electron Content. It was used the Maximum Entropy Method (MEM) with 30 days data base to compute the TEC for the next 6 days. With this prediction it was possible to determinate some important parameters for radiocommunications, specially in the range of HF, VHF, UHF e SHF. With our program it is possible to obtain the total electron content for all the world for specific time, the excess delay time for one frequency, and the critical frequency for the F2 layer. It is presented one example of prediction for optimum working frequency.



## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE SIGLAS

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	23
1.1 – Introdução	23
1.2 – Motivação	25
1.3 – Objetivo	27
<b>CAPÍTULO 2 – SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL</b>	29
2.1 - Introdução	29
2.2 - Estrutura do Sistema	31
2.3 - Estrutura do Sinal	33
2.4 – Aplicações do Sistema GPS	35
2.5 – Instituições do Sistema GPS	37
<b>CAPÍTULO 3 – PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS</b>	41
3.1 - Introdução	41
3.2 – Ondas Eletromagnéticas	42
3.2.1 - Velocidade de Propagação	44
3.2.2 – Índice de Refração	45
3.2.3 – Polarização	46
3.2.4 – Diferença de Fase	47
3.2.5 – Modulação de Fase	48
3.3 – Ionosfera	48

3.4 - Propagação Terra–Espaço .....	50
3.4.1 – Excesso de Atraso de Tempo .....	51
3.4.2 – Refração .....	52
3.4.3 - Principais Aplicações de Sistemas de Propagação Terra–Espaço .....	53
3.5 – Propagação Terra-Terra .....	54
3.5.1 – Frequências Usáveis .....	56
3.5.2 – Salto em Distância .....	56
3.5.3 – Modos de Propagação .....	57

## **CAPÍTULO 4 – OBTENÇÃO DE INFORMAÇÃO IONOSFÉRICA DO GPS ... 59**

4.1 – Introdução .....	59
4.2 – Técnicas de Modelagem Ionosférica .....	62
4.2.1 – Integrando a Densidade de Elétrons .....	62
4.2.2 – Modelo da Camada Única e Função de Mapeamento .....	62
4.3 - Métodos de Parametrização Global do TEC .....	64
4.3.1 – Representação Global do TEC .....	64
4.4 – O formato de Intercâmbio de Dados Ionosféricos .....	65
4.4.1 – Produtos Ionosféricos CODE .....	71

## **CAPÍTULO 5 – PREDIÇÕES DE PROPAGAÇÃO IONOSFÉRICAS ..... 73**

5.1 - Introdução .....	73
5.2 - Características Predizíveis.....	74
5.2.1 – Índices de Longo Prazo .....	74
5.2.2 – Predição de Características Ionosféricas .....	75
5.2.2.1 - Frequências Críticas da Camada E e F1 .....	75
5.2.2.2 - Frequência Crítica da Camada F2 .....	76
5.2.3 - Predição de Parâmetros .....	77
5.2.3.1 – MUF e FOT .....	77
5.2.3.2 – Ângulo de Radiação .....	78

5.2.3.3 - Ruído .....	78
5.3 - Cálculo de Propagação .....	79
5.4 – Programas de Predição Ionosférica .....	79
<b>CAPÍTULO 6 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS .....</b>	<b>91</b>
6.1 - Introdução .....	91
6.2 - Processos Auto-Regressivos .....	92
6.3 - Cálculo dos Coeficientes GIM .....	96
<b>CAPÍTULO 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>101</b>
7.1 – Introdução .....	101
7.2 – Mapas Globais Ionosféricos .....	101
7.3 – Frequências .....	109
<b>CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>115</b>
8.1 – Conclusões .....	115
8.2 – Sugestões .....	117
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE A - ESPECTRO DAS ONDAS DE RÁDIO .....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE B – PROGRAMA KANTOR-DULANTO .....</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE C – BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>151</b>



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Constelação Nominal GPS .....	32
2.2 - Estações do segmento de controle do sistema GPS .....	33
2.3 - Estações do IGS distribuídas globalmente .....	38
3.1 - Estrutura da ionosfera em um dia de verão para uma latitude média .....	49
3.2 – Principais efeitos ionosféricos em um dia de verão para uma latitude média.....	51
3.3 - Trajetória do raio Satélite - Terra, mostrando a curvatura reflexiva e o desvio angular .....	53
3.4 - Tipos de propagação HF .....	55
3.5 - Salto em distância com um ângulo de elevação de antena de 4° .....	57
3.6 - Modos de propagação complexa, duto e “ <i>chordal</i> ” .....	58
4.1 - Modelo ionosférico de camada única .....	63
4.2 - Seção cabeçalho do formato IONEX processado pelo JPL .....	67
4.3 - Seção de dados do formato IONEX processado pelo CODE .....	68
4.4 - Mapa TEC de dados CODE (01:00 UT do dia 14-02-2002) .....	69
4.5 - Mapa TEC de dados NRCan (01:00 UT do dia 14-02-2002) .....	69
4.6 - Mapa TEC de dados ESA (01:00 UT do dia 14-02-2002) .....	70
4.7 - Mapa TEC de dados JPL (01:00 UT do dia 14-02-2002) .....	70
5.1 - Mapa de contorno em MHz da representação global do valor médio de $f_oF2$ para março de 1979 às 06:00 UT .....	76
5.2 - Predição ionosférica do Ham Companion (16-03-2002) com fluxo solar 185 .....	81
5.3 - Predição ionosférica do Ham Companion (16-03-2002) com número de manchas solares <sup>124</sup> .....	81

5.4 - Predição ionosférica do Ham Companion (18-03-2002) com fluxo solar 178 .....	82
5.5 - Predição ionosférica do Ham Companion (18-03-2002) com número de manchas solares 136 .....	83
5.6 - Predição ionosférica do VOACAP (16-03-2002) com um número de manchas solares suavizada de 110 .....	84
5.7 - Predição ionosférica do VOACAP (18-03-2002) com um com um número de manchas solares suavizada de 110 .....	85
5.8 - Predição ionosférica do ICEPAC (16-03-2002) com um com um número de manchas solares suavizada de 110 .....	86
5.9 - Predição ionosférica do ICEPAC (18-03-2002) com um com um número de manchas solares suavizada de 110 .....	87
5.10 - Predição ionosférica IPS em tempo real (15-03-2002) com fluxo solar 176.....	88
5.11 - Predição ionosférica IPS em tempo real (16-03-2002) com fluxo solar 185.....	89
6.1 - Partes do arquivo de coeficientes (15-03-2002) do CODE .....	98
6.2 - Predição do coeficiente $C_{00}$ (16-03 em 21-03-2002) para 09:00 UT .....	99
6.3 - Predição do coeficiente $C_{11}$ (16-03 em 21-03-2002) para 15:00 UT .....	99
6.4 - Predição do coeficiente $S_{22}$ (16-03 em 21-03-2002) para 23:00 UT.....	100
6.5 - Predição do coeficiente $C_{1515}$ (16-03 em 21-03-2002) para 09:00 UT .....	100
7.1 - Mapa do TEC gerado a partir dos valores medidos pelo CODE (16-03-2002)...	102
7.2 - Mapa do TEC gerado a partir dos valores medidos pela NRCan(16-03-2002)...	103
7.3 - Mapa do TEC gerado a partir dos valores medidos pela ESA (16-03-2002).....	103
7.4 - Mapa do TEC gerado a partir dos valores medidos pelo JPL (16-03-2002).....	104
7.5 - Mapa do TEC gerado a partir dos valores medidos pela UPC (16-03-2002).....	104
7.6 - Mapa do TEC gerado pelo programa Kantor-Dulanto a partir da predição de coeficientes CODE (16-03-2002) a 01:00 UT .....	105
7.7 - Mapa de diferenças entre nossa predição (PKD) e os coeficientes do CODE (16-03-2002) a 15:00 UT .....	105



7.8 - Diferentes valores do TEC equatorial (17-03-2002) 07:00 UT .....	106
7.9 - Diferentes valores TEC no meridiano Greenwich (18-03-2002) às 13:00 UT....	107
7.10 - Valores TEC para um ponto específico (22.5°S – 45°W) para os seis dias de previsão 19:00 UT.....	108
7.11 - Diferentes valores do TEC horário (18-03-2002).....	109
7.12 - Mapa $f_oF2$ para o dia 16-03-2002 a 05:00 UT.....	111
7.13 - Excesso de atraso de tempo para 100 MHz (21-03-2002) 23:00 UT .....	112
7.14 - Excesso de atraso de tempo para 1 GHz (17-03-2002) 09:00 UT .....	112
7.15 - Predições FOT para o dia 16-02-2002 entre São José dos Campos e o porto do Callao .....	114



## **LISTA DE TABELAS**

2.1 - Componentes do sinal do satélite GPS .....	34
A1 - Espectro das Ondas de Rádio .....	125



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Analysis center
AR	Processo auto-regressivo
CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System, GSFC, NASA, USA
CODE	Center for Orbit Determination in Europe, Berna, Suíça.
DCB	Differential Code Bias
EMR	Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canadá.
ESA	European Space Agency, Darmstadt, Germany
FOT	Frequência Ótima de Trabalho
GIM	Global Ionosphere Map
GIS	Geografic Information System
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency (3-30 MHz)
HL	Hora local
IGS	International GPS Service
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IONEX	IONosphere Map EXchange Format
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LUF	Lowest Useful Frequency
L1	Portadora L1 (1575,42 MHz)
L2	Portadora L2 (1227,60 MHz)
MEM	Maximum Entropy Method
MUF	Maximum Usable Frequency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	NAVigation Satellite Timing And Ranging
NRCan	National Resources Canada, Ottawa, Canada
PKD	Programa Kantor – Dulanto
RINEX	Receiver INdependent EXchange Format
RMS	Root - mean square (erro)

SHF	Super High Frequency (3-30 GHz)
SSN	Smoothed Sunspot Number
TEC	Total Electron Content
TECU	TEC Unit ( $10^{16}$ elétrons / m <sup>2</sup> )
UHF	Ultra High Frequency (300- 3000 MHz)
UPC	Universidade Politécnica de Catalunya, Espanha.
UT	Universal Time ( Tempo de Greenwich)
VHF	Very High Frequency (30-300 MHz)
VTEC	Vertical Total Electron Content

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 Introdução

Os três últimos séculos foram dominados cada um deles pela tecnologia. O século XVIII foi a época dos grandes sistemas mecânicos que acompanharam a Revolução Industrial. O século XIX foi a época das máquinas a vapor. No final do século XX a tecnologia chave foi a obtenção, processamento e distribuição de informação. Entre estes avanços, temos a instalação de redes telefônicas mundiais, a invenção do rádio, da televisão, o nascimento e crescimento sem precedentes da indústria dos computadores, o nascimento da Internet e o lançamento de satélites de comunicação.

Devido ao rápido progresso tecnológico, os processos de coletar, transportar, armazenar e processar informação são instantâneos. Com a globalização, as corporações ou empresas estabeleceram-se em diferentes cidades do mundo, precisando analisar as informações de todas as filiais em tempo quase real. Ao crescer os sistemas para obter, processar e distribuir informação, também cresce a necessidade de técnicas mais avançadas de processamento de informação (Tanenbaum, 1992).

Dentro deste processo as pessoas devem ter meios para acessar a informação, pois necessitam estar em todo lugar e tempo informados, sem estar vinculados à infraestrutura terrestre de comunicações. Para estes usuários a resposta é a comunicação por meio de ondas eletromagnéticas, as quais se deslocam pelo espaço permitindo o acesso à informação em qualquer lugar da Terra. Um exemplo de um sistema de informação é o *Global Positioning System* (GPS) que proporciona posição e tempo, além de outras informações que são obtidas, sobre quase qualquer ponto da Terra e sob quaisquer condições climáticas.

Os sistemas de comunicações baseados na propagação de ondas eletromagnéticas através do espaço, são afetadas pelo meio onde se propagam, tais como a geografia do terreno ou construções e os diversos fenômenos atmosféricos. Se não levamos em conta estes fatores, a comunicação apresenta pequenos erros e no pior dos casos pode interromper-se, como por exemplo durante a presença da camada E<sub>s</sub>.

A região da atmosfera que mais influi na propagação de ondas eletromagnéticas é denominada ionosfera, a qual é definida como a região compreendida entre 50 a 1000 km de altura aproximadamente, e caracterizada pela alta condutividade, devido ao número elevado de íons e elétrons livres que a compõe. Esta região, afeta as ondas eletromagnéticas que a atravessam, gerando variações de amplitude, fase, absorção, penetração de raios, retardo, etc.

As ondas de rádio na ionosfera são alteradas principalmente pelos elétrons livres, é por isso que precisamos determinar o Conteúdo Eletrônico Total (*Total Electron Content - TEC*). Este importante parâmetro representa a quantidade de elétrons livres ao longo do caminho da onda eletromagnética no espaço, entre a superfície da Terra e uma determinada altura, os quais afetam diretamente o estabelecimento de canais de comunicação.

Com a determinação deste importante parâmetro físico pode-se modelar em tempo e espaço canais de comunicação em diferentes frequências que possam ser aplicadas para comunicações Satélite-Terra ou Terra-Terra.

O TEC varia em função da posição, hora, estação do ano, fluxo solar, atividade magnética, etc., e como precisamos conhecê-lo devemos gerar um modelo que inclua variáveis que mudem permanentemente. Na atualidade existem várias formas ou métodos para determinar o TEC. Um deles é usando os dados do GPS (Komjathy, 1997, Fedrizzi, 1999). A partir de 1998 vários centros iniciaram a produzir os mapas TEC, CODE, ESA e UPC Espanha. Estes métodos aproveitam os satélites da constelação



GPS, que transmitem dados em forma contínua sobre toda a Terra, para gerar um TEC atualizado constantemente.

A primeira teoria matemática de propagação de rádio na ionosfera na presença de campo magnético foi desenvolvida a partir de 1920 por Appleton. Na atualidade existem modelos matemáticos como o modelo Bent, desenvolvido em 1972 que fazem previsões da propagação de ondas electromagnéticas entre a Terra-Satélite, Satélite-Satélite ou Terra-Terra, com uma base de dados (50000 sondagens da parte superior da ionosfera, 6000 medidas de satélites da densidade de elétrons e 400000 sondagens da parte inferior da ionosfera) compreendida entre 1962-1969, cobrindo um período de atividade solar mínima a máxima (Jursa, 1985).

A maioria destes modelos fazem previsões ionosféricas baseados em dados médios (base de dados fixa), com os quais é impossível determinar anomalias ou perturbações, em cujo caso a previsão não seria confiável. Para melhorar a confiabilidade das previsões, procuramos gerar um modelo que use variáveis atualizadas, que sejam facilmente modificáveis e que possam ser comparadas com outros modelos ou softwares, e por isso vamos usar o *Global Ionosphere Map* (GIM) do TEC já processado, com base nos dados do GPS, para poder determinar o excesso de atrasos tempo em frequências e estabelecer melhores canais de comunicação.

## 1.2 Motivação

Com o desenvolvimento das comunicações durante a segunda metade do século XX, a Terra se viu reduzida, e passamos a ser parte de um mundo globalizado. Em qualquer instante e a partir de qualquer lugar (em um navio, submarino, avião, veículo espacial, montanha, etc.) pode-se acessar a informação e estar conectado ao mundo. Muito destes processos, imperceptíveis para nosso dia a dia, se realizam através da propagação de ondas eletromagnéticas pelo espaço, e por isso precisa-se conhecer as melhores condições de propagação

Na década dos 70, quando as radiocomunicações se baseavam em fonia, se desenvolveram uma série de técnicas e programas para efetuar as predições de frequência em HF, com os quais se conseguiram ótimos resultados.

No final da década de 80 e durante a década de 90, com o desenvolvimento da transmissão de dados e vídeo, além das comunicações por satélites, Internet, telefonia móvel, etc., o estabelecimento de canais de comunicação tinha que melhorar, pois precisava transmitir maior quantidade de informação (fonia, data e vídeo) e a perda de enlace durante pequenos intervalos de tempo pode ser vital. A grande diferença é que antigamente era possível por ouvido sintonizar os rádiotransmissores em fonia, entretanto na transmissão de dados é impossível.

Paralelamente, desenvolvia-se o GPS conseguindo enlaçar o mundo. Em fevereiro de 1998 a *International GPS Service* (IGS) inicia um projeto piloto para gerar mapas globais do conteúdo total de elétrons na ionosfera, criando um grupo de trabalho da ionosfera. A função principal deste grupo do IGS, envolvia a modelagem ionosférica e mapeamento para proporcionar um contínuo monitoramento da ionosfera para os próximos períodos de alta atividade solar e estudar o impacto da ionosfera em seus produtos.

Neste projeto trabalharam cinco centros de pesquisas produzindo mapas globais de TEC, usando a rede global de trabalho do sistema GPS com receptores de frequência dupla. Estes foram em 1996 o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), em 1994 o *Energy Mines and Resources Canadá* (EMR), em 1998 o *European Space Agency* (ESA), em 1997 a *University of Barcelona* (UPC) e em 1999 o *Center for Orbit Determination of Europe* (CODE). Os mapas são apresentados no formato IONEX (*IONospheric EXchange data format*), o qual é o formato padrão de dados entre a comunidade ionosférica. Estes mapas apresentam o conteúdo total de elétrons entre a Terra e o satélite GPS (altitude 20200 km) e são conhecidos como *Global Ionospheric Map* (GIM).

Na atualidade, são produzidos diariamente uma série de GIMs do TEC por várias instituições a cada duas horas, os quais são de fácil acesso pela Internet, e também é possível determinar o TEC com métodos matemáticos ou algoritmos (Fedrizzi, 1999) através de receptores GPS de dupla frequência.

Esta necessidade de mantermos comunicados 24 horas do dia e em qualquer lugar, nos motivou a procurar aplicar as capacidades do sistema GPS no estabelecimento dos melhores canais de comunicação para evitar interferência, reduzir erros e custos. Para isto pretendemos utilizar os avanços obtidos no processamento das observáveis do GPS através dos formatos IONEX, os quais devem permitir-nos atualizar parâmetros dos modelos de predição de frequências ótimas de trabalho.

### **1.3 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é determinar e prever parâmetros importantes para o estabelecimento de canais de comunicação em *High Frequency* (HF) e o excesso de atraso de tempo a ser considerado nas comunicações por satélites, especialmente nas bandas de *Ultra High Frequency* (UHF) e *Super High Frequency* (SHF).

Para isto, vai-se aproveitar o Sistema de Posicionamento Global por Satélites, por ser na atualidade, um sistema que é possível de ser utilizado em quase qualquer lugar do planeta e está permanentemente enviando informação, e o qual se apresenta como uma alternativa útil para efetuar estudos do comportamento das ondas eletromagnéticas ao atravessar a ionosfera. Com esta informação desenvolveram-se técnicas no INPE e no mundo, para determinar o Conteúdo Total de Elétrons (TEC), com o qual serão determinados os atrasos ionosféricos para diferentes frequências e se efetuarão predições de frequências críticas da camada F2, para tentar reduzir perdas de enlace nas radiocomunicações por variações produzidas no meio de propagação.

A seguir se apresentam os principais pontos a serem desenvolvidos na dissertação:

- Geração, análise e interpretação de mapas do Conteúdo Total de Elétrons usando a informação do GPS.
- A partir do mapeamento do TEC, estabelecer parâmetros de propagação para determinar a frequência crítica da camada F2, e o atraso em diferentes bandas (Especialmente UHF e SHF).
- Usando uma base de dados (30 dias anteriores), fazer previsões de mapas TEC para seis (6) dias futuros em diferentes horários (a cada duas horas a partir da 1 hora da manhã).
- Análise de resultados gerados a partir do mapeamento e previsão do TEC, e comparação com resultados obtidos por outras organizações.
- Análise de parâmetros de frequência crítica e comparação com outros softwares ou modelos matemáticos que permitam prever as melhores frequências para a propagação ionosférica.
- Determinação para dias futuros do atraso ionosférico nas comunicações por satélites, que deve ser considerado no estabelecimento de canais, especialmente nas bandas em UHF e SHF.

## CAPÍTULO 2

### SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)

#### 2.1 Introdução

O Sistema *NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System* (NAVSTAR-GPS), conhecido mundialmente como GPS), é um sistema de radionavegação que utiliza uma constelação de satélites artificiais para determinar a posição e velocidade de um objeto, sobre quase toda a superfície da Terra ou próximo dela, em um instante dado, usando para isto um sistema de referência conhecido como *World Geodesic System* (WGS-84).

Desde o início da civilização o homem usou os astros para orientação e posicionamento. Na Segunda Guerra Mundial, a necessidade de melhorar o posicionamento de objetos (especificamente unidades militares como navios, submarinos e aviões), levou ao desenvolvimento de um sistema capaz de otimizar o posicionamento independentemente das condições meteorológicas.

O predecessor do moderno sistema de posicionamento foi o *Navy Navigation Satellite System* (NNSS) também conhecido como TRANSIT, constituído por 6 satélites em órbitas polares a 1040 km de altitude. Mas como o sistema apresentava limitações (tempo de espera para posicionamento, velocidade limitada para o receptor, baixa precisão), foi iniciado em 1964 um novo projeto de navegação de alta precisão denominado *TIME navigATION* (TIMATION). Em 1973 o programa foi denominado NAVSTAR-GPS.

O sistema GPS foi constituído por blocos, os primeiros onze (11) satélites desenvolvidos são conhecidos como Bloco I e foram lançados entre 1978 e 1985, os quais atualmente não estão operando. Os nove (9) satélites seguintes são do Bloco II

lançados entre 1989 e 1990. Posteriormente aparece o bloco IIA e IIR, chegando a um total de trinta e seis (36) satélites, e na atualidade são vinte e oito (28), dos quais (24) estão operando e (4) são de reserva. Os blocos futuros devem ser IIF (a partir do 2007) e bloco III (a partir 2030).

A constelação nominal (operativa) consiste de 24 satélites operando em 6 órbitas de 4 satélites cada um, com inclinação de  $55^0$ , distribuídos para permitir a cobertura global da Terra com 4 a 8 satélites simultaneamente visíveis por um receptor acima de  $15^0$  de elevação. Os satélites GPS têm uma órbita aproximadamente circular (excentricidade de 0,0131), altitude de 20200 km e período de 11 h 58 m (Hofmann-Wellenhof, 1994).

Os satélites GPS são permanentemente rastreados através de estações de controle distribuídas em diferentes lugares da Terra, as quais transmitem os dados de cada satélite a um centro de controle principal. A partir destes dados, predizem as informações orbitais e parâmetros dos relógios dos satélites e que posteriormente são enviados aos respectivos satélites por meio de antenas de superfície que transmitem os sinais na banda S (2-4 GHz).

Como o sistema GPS requer medidas de tempo extremamente precisas ele utiliza 4 relógios atômicos, dois de césio e dois de rubídio, os quais são baseados na estabilidade em frequência (estão na razão de  $10^{-13}$  e  $10^{-14}$  partes por dia) que proporcionam os osciladores atômicos, cuja escala de tempo é definida como tempo GPS. Para corrigir a diferença com o *Universal Time Coordinate* (UTC) são inseridos em determinadas épocas do ano um número inteiro de segundos, mantendo próximas estas escalas de tempo.

$$\text{UTC} + 1,000\eta = \text{GPS} + 19,000[\text{s}] \quad (2.1)$$

Onde  $\eta$  é um número inteiro reportado pela *International Earth Rotation Service* (IERS). O tempo GPS coincidiu com o UTC na época standard do GPS, que foi 6 de Janeiro 1980.

O princípio para a determinação do posicionamento pelo GPS é baseado no tempo de propagação do sinal enviado pelo satélite, desde o instante da emissão até o momento de chegada no receptor.

Este princípio consiste na medida de distâncias entre o usuário (receptor) e quatro satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites num sistema referencial tridimensional apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Do ponto de vista geométrico, são necessários três distâncias, desde que não pertençam ao mesmo plano e a quarta medida é necessária para eliminar os erros da imprecisão dos relógios do receptor, em razão do não sincronismo com os relógios dos satélites.

Neste cálculo, devem ser considerados também erros devido à propagação (desvio ionosférico, troposférico) e os erros próprios (ruído) do satélite e receptor, portanto esta medida não é a distância geométrica entre receptor e o satélite, e é chamada de pseudodistância (*pseudorange*).

## **2.2 Estrutura do Sistema**

O Sistema Global de Posicionamento está constituído de três segmentos básicos: O espacial, o de controle e o usuário.

O segmento espacial (Figura 2.1) está constituído pelos 28 satélites da constelação, dos quais 4 são mantidos como reserva e 24 estão ativos. Os satélites GPS, essencialmente proporcionam uma plataforma para os radiotransmissores, relógios atômicos, computadores e outros equipamentos eletrônicos.

O segmento de controle (Figura 2.2) está constituído pela estação central de controle (Colorado Springs-Colorado-USA), as cinco estações monitoras (Havaí, Colorado Spring, Ilha Ascensão, Diego Garcia e Kwajalein) e as três estações de controle terrestre

(Ilha Ascensão, Diego Garcia e Kwajalein), as quais pertencem à USAF (*United State Air Force*), e sete estações do NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*).

Estas estações formam o Sistema de Controle Operacional (OCS), cujas funções principais são: monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites, determinar o sistema de tempo GPS, prever efemérides dos satélites, calcular as correções dos relógios dos satélites e atualizar periodicamente as mensagens de navegação de cada satélite (Monico, 2000).

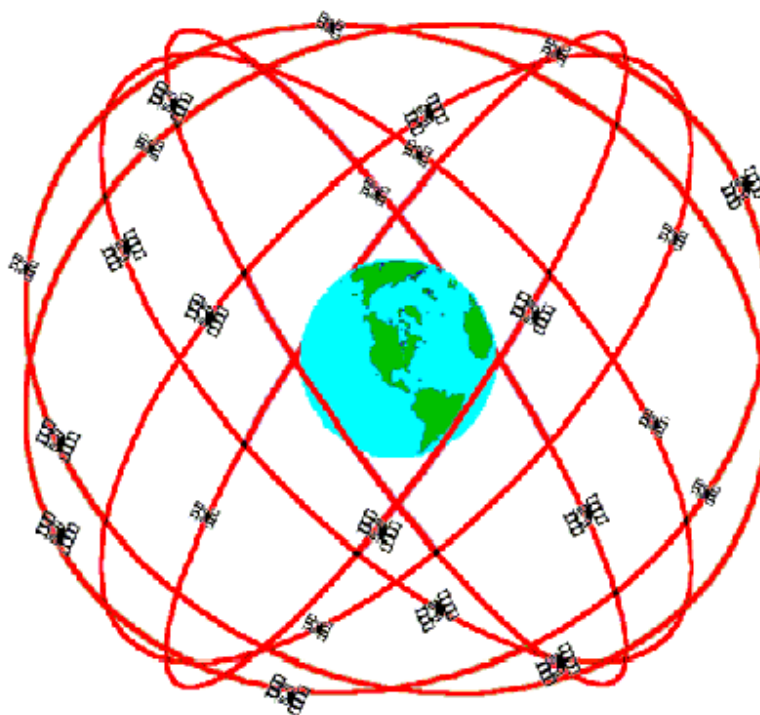


FIGURA 2.1 - Constelação Nominal GPS.

FONTE: Dana (1998).





FIGURA 2.2 - Estações do segmento de controle do sistema GPS da USAF.

FONTE: Dana (1995).

O segmento usuário são os equipamentos ou instalações usadas para a recepção dos sinais do sistema.

### 2.3 Estrutura do Sinal

A descrição oficial do sinal GPS é dada na *GPS Interface Control Document* (ICD-GPS-200). A frequência fundamental gerada a bordo dos satélites GPS é 10,23 MHz. Coerentemente os sinais derivados são múltiplos desta frequência, a frequência  $L_1$  portadora primária de 1557,42 MHz (produto da multiplicação por 154) cujo comprimento de onda é  $\approx 19,05$  cm e a frequência  $L_2$  portadora secundária de 1227,60 MHz (produto da multiplicação por 120) com comprimento de onda de  $\approx 24,45$  cm. Na Tabela 2.1 pode-se observar as componentes do sinal.

TABELA 2.1 - Componentes do Sinal do Satélite.

COMPONENTES	FREQÜÊNCIA (MHZ)
Frequência fundamental	$f_0 = 10,23$
Portadora $L_1$	$154f_0 = 1575,42$
Portadora $L_2$	$120f_0 = 1227,60$
Código P	$f_0 = 10,23$
Código C/A	$f_0/10 = 1,023$
Código W	$f_0/20 = 0,5115$
Mensagem de navegação	$f_0/204600 = 50 \times 10^{-6}$

FONTE: Hoffman-Wellenhof (2001, p.74).

Em adição, a portadora  $L_3$  é gerada para uso militar e para o bloco IIF existirá a opção da portadora  $L_5$  (1176,45 MHz) para uso civil (Hoffman-Wellenhof, 2001). As duas frequências são fundamentais para eliminar a maior fonte de erro (retardo ionosférico). As pseudodistâncias são derivadas da medida do tempo do sinal de cada satélite ao receptor, usando dois códigos *Pseudorandom Noise* (PNR), os quais são modulados nas bases das portadoras. Estes códigos transportam informações aos receptores através de sequência de valores binários (+1 ou -1). O primeiro código *Coarse/Aquisition-Code* (C/A Code) o qual habilita o uso civil, é usado para o *Standard Positioning Service* (SPS). O C/A Code é modulado somente em  $L_1$ . O segundo código é o *Precision Code* (P-Code) o qual é reservado para os militares dos Estados Unidos e outros usuários autorizados. Este é usado para o *Precise Positioning Service* (PPS) e é modulado em ambas portadoras.

O código C/A é repetido a cada milissegundo, com comprimento de onda por volta de 300m, é transmitido a uma razão de 1,023 MHz. O código P é repetido aproximadamente a cada 266,4 dias, com comprimento de onda por volta 30m, é transmitido a uma sequência de 10,23 MHz. O código W é usado para encriptar o código P como código Y, quando o procedimento *anti-spoofing* (A-S) é implementado. As mensagens de navegação, que fornecem as informações básicas para o cálculo das

posições dos satélites, são também moduladas sobre as portadoras a uma frequência de 50 Hz, é transmitida a cada 30 segundos (1500 bps).

Ambas portadoras  $L_1$  e  $L_2$  são moduladas pelo código P (mais precisamente pelo código Y). O código C/A é colocado na portadora  $L_1$  com uma defasagem de  $90^\circ$  com respeito ao código P, gerando uma demodulação das portadoras  $L_i = a_i \cos(f_i t)$  e uma sequência de estados de código P ( $P(t)$ ), código C/A ( $C/A(t)$ ), código W ( $W(t)$ ) e mensagem de navegação ( $D(t)$ ), representado pelas equações:

$$\begin{aligned} L_1 &= a_1 P(t) W(t) D(t) \cos[f_1 t + \Phi(t)] + a_1 C/A(t) D(t) \sin[f_1 t + \Phi(t)] \\ L_2 &= a_2 P(t) W(t) D(t) \cos[f_2 t + \Phi(t)] \end{aligned} \quad (2.2)$$

Onde  $i=1,2$  representa a portadora  $L_1$  ou  $L_2$ ,  $f$  é a frequência,  $a_i \cos(f_1 t + \Phi(t))$  é a portadora não modulada e  $\Phi(t)$  é o ruído da fase.

Na área das comunicações os sinais de radiodifusão precisam de um espectro mais amplo, para ficar mais resistentes ao *jamming* (interferência). O conceito básico é que a informação na forma de ondas com comprimento de banda estreita seja convertida por modulação a uma de comprimento de banda larga. No GPS o comprimento da banda da mensagem de navegação de 100 Hz é convertido para o código P em uma de banda larga de 20 MHz.

## 2.4 Aplicações do Sistema GPS

As aplicações do GPS são numerosas, atingindo cada vez mais atividades, tanto para as militares como para as civis. Na atualidade, é difícil enumerar todas as aplicações, pois constantemente surgem novas aplicações.

O sistema inicialmente foi planejado para ser usado em navegação. Os militares e civis usam o sistema de modo similar, para conhecer sua posição com a maior precisão possível.

Em geodésia, constitui uma poderosa ferramenta para posicionamento e monitorar mudanças na Terra. Esta aplicação inclui mapeamento, medida de deformações, repercussão pós-glacial, erupção vulcânica, movimento de placas tectônicas e rotação da Terra.

Em comunicações e regulação do tempo, o sistema permite uma determinação global do tempo com precisão, aproximadamente de 340 nanosegundos, com nível de confiança de 95%. A comunicação global, precisa de coordenação para a transferência de dados dentro de determinados períodos de tempo.

Em meteorologia, o sinal do GPS depois de ser processado pode ser usado para obter diversos dados (temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica), que ajudam na determinação e previsão do tempo.

Na área militar, é usado como um elemento de apoio estratégico e tático, englobando diversos sistemas de controle, de alarme, sistemas de armas, guiagem de mísseis táticos de médio e longo alcance, posicionamento de homens ou unidades, etc.

Numerosas corporações ou empresas precisam deste sistema, a maioria delas como *Geographic Information System* (GIS), pois as aplicações são enormes: exploração, administração do transporte, monitoramento estrutural, posicionamento, automatização, etc.

O sistema aumentou a segurança na navegação aérea e marítima, permitindo um melhor controle do tráfego global, fazer aproximações precisas para pouso em qualquer condição meteorológica, levantamento topográfico dos cais e portos, determinação de

perigos de navegação (boias de sinalização, bancos de areia, navios afundados, iceberg, plataformas de perfuração), facilitar os serviços de busca e salvamento, etc.

## 2.5 Instituições do Sistema de Posicionamento Global

Na última década o sistema GPS, chegou a ocupar um papel importante nas ciências da Terra. Devido ao contínuo crescimento e diversificação de uso, a comunidade científica internacional fez um esforço para promover padrões internacionais de aquisição e análise, desenvolvimento e operação comum, ou seja uma rede de trabalho global de rastreamento GPS.

O resultado deste esforço foi o *International GPS Service* (IGS), estabelecida pela *International Association of Geodesy* (IAG) em 1993, iniciando a operação oficial a partir de 1 de janeiro de 1994. A IGS, conjuntamente com membros de organizações internacionais, agências, universidades, fazem avaliações de:

- Alta precisão de efemérides de todos os satélites GPS ativos, distinguindo entre uma final ou SP3 (IGS), rápida (IGR), precisa (IGP) e ultra-rápida (IGU).
- Parâmetros de rotação da Terra (ERPs), componentes x, y do movimento polar e duração do dia (LOD).
- Rastreamento das coordenadas de estações e velocidades em formato SINEX (*Solution Independent Exchange*).
- Informação de relógio de satélite e estações.
- Desde 26 de janeiro de 1997, as estações especificam o atraso troposférico estimado no zênite.

A IGS consiste de estações de trabalho (Figura 2.3), centro de dados globais e regionais, centros de análises (ACs), centro coordenador de análise (ACC), agência central (responsabilidade da NASA e administrado pelo JPL), conselho de governo e usuários. Na atualidade as sete ACs que contribuem com a IGS são (Schaer, 1999):

- 1) CODE, *Center for Orbit Determination in Europe*, AIUB, Berna, Suíça.

- 2) EMR, Energy, Mines and Resources, NRCan, Ottawa, Canada.
- 3) ESA, *European Space Agency*, ESOC, Darmstadt, Alemanha.
- 4) GFZ, *GeoForschungsZentrum Potsdam*, Alemanha.
- 5) JPL, *Jet Propulsion Laboratory*, Pasadena, California, USA.
- 6) NGS, *National Geodetic Survey*, NOAA, Silver Spring, Maryland, USA e
- 7) SIO, *Scripps Institution of Oceanography*, San Diego, California, USA.

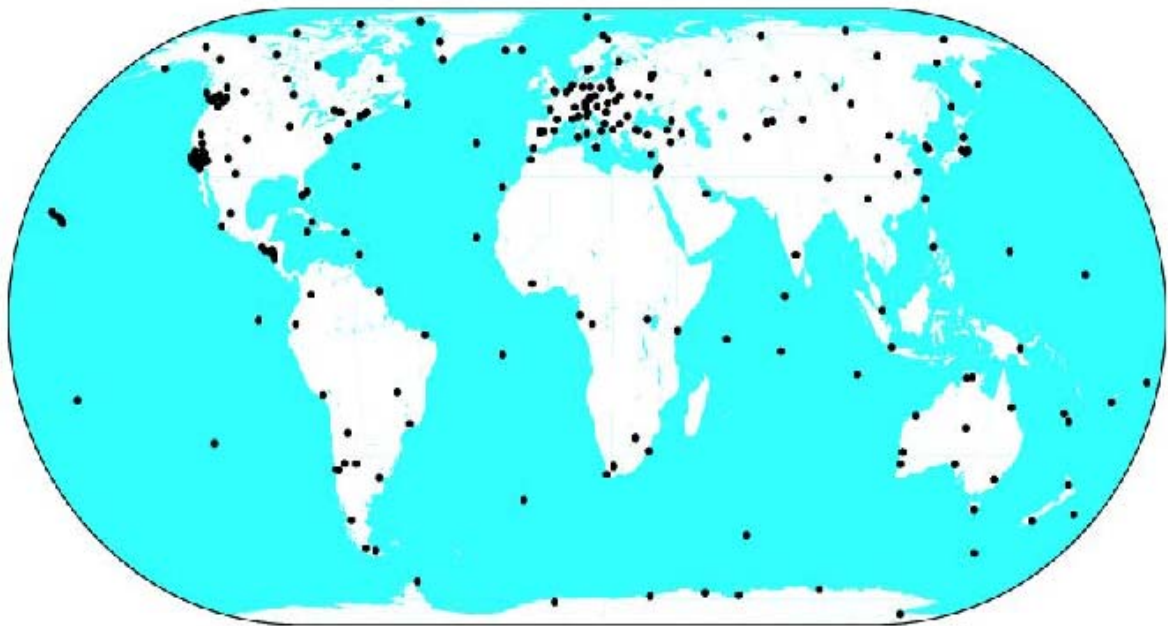


FIGURA 2.3 - Estações do IGS distribuídas globalmente.

FONTE: JPL (2002).

A Comunidade IGS estava atenta durante um longo período de tempo do potencial do sistema GPS para extrair informação sobre a ionosfera. No IGS *workshops* de 1997, mapas do *Total Electron Content* (TEC) enviadas pela CODE, DLR (*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*, Neustrelitz, Germany), ESA e UNB (*University of New Brunswick*, Fredericton, Canadá) foram comparados. Como consequência desta comparação, um formato para intercâmbio de mapas ionosféricos foi desenvolvido por Schaer et al (1998) e aprovado pelo grupo de trabalho de ionosfera da IGS, com o nome de formato *IONospheric EXchange* (IONEX), o qual será descrito e analisado no Capítulo 4.





## **CAPÍTULO 3**

### **PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS**

#### **3.1 Introdução**

A primeira teoria de propagação foi desenvolvida na década de 1920 por Appleton (1927). A característica de deslocamento da onda eletromagnética pelo espaço, é um fenômeno muito complexo, sujeito a muitas variáveis, algumas próprias da onda (frequência, polarização, etc.), dos equipamentos e antenas (ruído, ganho, potência, etc.) e outras do meio (elétrons livres, campo magnético, atividade solar, etc.).

Um parâmetro fundamental para análise do comportamento das ondas eletromagnéticas é a frequência, que representa o número de oscilações completas da onda em um segundo, e é dado em Hertz. O conjunto de todas as frequências (espectro de frequências) pode ser dividido em uma série de bandas (Anexo A). Cada uma das bandas tem características próprias que nos indicam o modo primário de propagação, usos, etc.

As ondas eletromagnéticas viajando de um transmissor a um receptor nas proximidades da superfície terrestre propagam-se por vários caminhos. Uma onda pode viajar sobre a superfície terrestre, e este caso é conhecido como onda de Terra. Outra onda viaja rumo à ionosfera, onde pode ser refletida e retorna para o receptor. Outras ondas podem propagar-se também pela terra, água, etc.

Quando a onda utiliza como condutor a atmosfera para propagar-se, é muito importante conhecer as características deste meio. A parte da atmosfera onde existem íons e elétrons suficientes para afetar a propagação das ondas de rádio é denominada Ionosfera. A propagação da onda nesta região vai apresentar uma série de propriedades e para conseguir compreendê-las melhor, faremos uma descrição da ionosfera neste Capítulo.

Como as características de propagação são diferente para cada banda de frequência, além das diferenças próprias do meio, de equipamentos e antenas; vamos orientar nosso trabalho à análise do meio ionizado (especificamente ao TEC). Serão considerando dois tipos principais de propagação: Terra-Espaço e Terra-Terra, e as bandas de frequência que são mais afetadas pela ionosfera.

### 3.2 Ondas Eletromagnéticas

A propagação de ondas eletromagnéticas através de um meio deve satisfazer dois conjuntos de condições: As equações de Maxwell, as quais relacionam o campo elétrico com o magnético, e a resposta do meio aos campos das ondas (relações constitutivas) (Davies,1990).

As equações de James Clerk Maxwell (1873) podem ser escritas na seguinte forma (Jackson, 1966) :

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t \quad (3.4)$$

Onde  $\mathbf{D}$  é o vetor deslocamento ou densidade de fluxo ( $C/m^2$ ),  $\rho$  é a densidade volumétrica de carga ( $C/m^3$ ),  $\mathbf{B}$  é o vetor indução magnética ( $Wb/m^2 = 10^4$  Gauss no sistema CGS),  $\mathbf{H}$  é o vetor campo magnético (A/m),  $\mathbf{J}$  é o vetor densidade de corrente ( $A/m^2$ ) e o vetor  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico (V/m).

As relações constitutivas podem ser escritas na seguinte forma:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{J} = \underline{\sigma} \mathbf{E} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.7)$$

onde  $\epsilon$  é a permissividade do meio (F/m),  $\epsilon_0$  é a permissividade no vácuo (8,85 picoF/m =  $10^{-9}/36\pi$  Fm<sup>-1</sup>),  $\mathbf{P}$  é o vetor polarização do meio (C/m<sup>2</sup>),  $\mathbf{J}$  é o vetor densidade de corrente (A/m<sup>2</sup>),  $\underline{\sigma}$  é a matriz condutividade (1/Ωm) e  $\mu$  é a permeabilidade (Wb/Am).

Considerando que a onda está em um meio eletricamente neutro, sem cargas livres ( $\rho = 0$ ) e que  $\epsilon$  e  $\mu$  são independentes do espaço e tempo, e tomando o rotacional de (3.4), obtém-se:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\partial(\nabla \times \mathbf{B})/\partial t \quad (3.8)$$

Usando a identidade vetorial  $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$  na equação anterior, onde  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$  e substituindo (3.7), obtém-se:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu \partial(\nabla \times \mathbf{H})/\partial t \quad (3.9)$$

Substituindo (3.3) na equação anterior e usando as valores das relações constitutivas (3.5) e (3.6), obtém-se:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu \partial(\underline{\sigma} \mathbf{E} + \epsilon \partial \mathbf{E}/\partial t)/\partial t \quad (3.10)$$

Rescrevendo esta Equação obtém-se a equação da onda, que é igual para  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$ .

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \epsilon \partial^2 \mathbf{E}/\partial t^2 - \mu \underline{\sigma} \partial \mathbf{E}/\partial t = 0 \quad (3.11)$$

Esta Equação pode ter como solução uma onda plana do tipo  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \exp i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)$ , onde  $\omega$  é a frequência angular da onda e  $\mathbf{k}$  é o vetor de onda. Realizando as operações respectivas neste tipo de solução, os operadores  $\nabla$  e  $\partial/\partial t$  tornam-se:

$$\nabla \equiv i\mathbf{k} \quad (3.12)$$

$$\partial/\partial t \equiv -i\omega \quad (3.13)$$

Substituindo os valores na Equação da onda (3.11) obtém-se:

$$[-\mathbf{k}^2 + \mu\varepsilon\omega^2 + i\omega\mu\underline{\sigma}] \mathbf{E} = 0 \quad (3.14)$$

Como  $\mathbf{E}$  é diferente de zero temos que:

$$\mathbf{k}^2 = \mu\varepsilon\omega^2 + i\omega\mu\underline{\sigma} \quad (3.15)$$

Em um meio não condutor ( $\underline{\sigma} = 0$ ), a equação da onda e o vetor da onda ficam da seguinte forma:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\varepsilon \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 = 0 \quad (3.16)$$

$$\mathbf{k} = \omega(\mu\varepsilon)^{1/2} \quad (3.17)$$

### 3.2.1 Velocidade de Propagação

A velocidade de propagação ou velocidade de fase, para um ponto de fase constante de uma onda progressiva em um meio dielétrico ideal é uma constante. Isto implica que  $t$  e  $\mathbf{r}$  devem variar juntos, de modo que:

$$(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t) = \text{cte} \quad (3.18)$$

Derivando em relação ao tempo, temos

$$\mathbf{k} \cdot d\mathbf{r}/dt - \omega = 0 \quad (3.19)$$

Agrupando e substituindo pelo valor de (3.17), obtém-se a velocidade de fase (considerando o vetor  $\mathbf{k}$  ao longo do eixo  $z$ ):

$$v_{\text{fase}} = v_f = \frac{dr}{dt} = \omega/k_z = 1/(\mu\epsilon)^{1/2} \quad (3.20)$$

Esta velocidade é uma característica do meio sendo dependente das constantes  $\mu$  e  $\epsilon$ . No espaço livre (vácuo) a  $v_f$  é aproximadamente igual a 300000 km/s (Kraus, 1986):

$$v_f = 1/(\mu_0\epsilon_0)^{1/2} = c \quad (3.21)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Cada meio dielétrico ideal está caracterizado por ter um valor específico de sua velocidade de fase. Se este valor é relacionado com a velocidade da luz no vácuo, temos uma velocidade de fase relativa ou fator de velocidade (Puliafito, 1987):

$$v_{\text{rel}} = v_f / c = (\mu_0\epsilon_0)^{1/2} / (\mu\epsilon)^{1/2} = 1/(\mu_r\epsilon_r)^{1/2} \quad (3.22)$$

Nos meios ferromagnéticos  $\mu_r \cong 1$ , então a velocidade de fase relativa é:

$$v_{\text{rel}} = 1/(\epsilon_r)^{1/2} \quad (3.23)$$

### 3.2.2 Índice de Refração

Define-se o índice de refração de um meio como o valor inverso do fator de velocidade ou velocidade de fase relativa:

$$\eta = 1/v_{\text{rel}} = (\mu_r\epsilon_r)^{1/2} \quad (3.24)$$

Nos meios ferromagnéticos  $\mu_r$  está muito próximo da unidade de modo que:

$$\eta = (\epsilon_r)^{1/2} \quad (3.25)$$

### 3.2.3 Polarização

Define-se polarização de uma onda eletromagnética à relação dada pelas componentes  $y$  e  $x$  do campo elétrico da onda ( $\rho = E_x / E_y$ ), num ponto do espaço, no plano da onda. Em função desta relação a polarização da onda pode ser: linear (horizontal e vertical), circular (esquerda e direita) e no caso mais geral elíptica.

Seja uma onda plana propagando-se na direção positiva do eixo  $z$  ( $\mathbf{k} // \hat{z}$ ), em um meio eletricamente neutro e anisotrópico, onde o campo elétrico  $\mathbf{E}$  é perpendicular ao vetor da onda  $\mathbf{k}$  ( $E_z = 0$ ), então só existe  $E_x$  e  $E_y$ . Na Equação (3.4) e considerando a Equação (3.3) sem o vetor densidade de corrente  $\mathbf{J}$  ( $\underline{\sigma} = 0$ ), aplicamos os valores dos operadores obtidos nas equações (3.12) e (3.13) respectivamente:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = \omega \mathbf{D} \quad (3.26)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = -\omega \mathbf{B} \quad (3.27)$$

Realizando o produto vetorial, substituindo os valores de  $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{B}$  ( $\mu = \mu_0$ ) das relações constitutivas (3.5) e (3.7), obtêm-se:

$$kH_y = \omega (\epsilon_0 E_x + P_x) \quad (3.28)$$

$$-kH_x = \omega (\epsilon_0 E_y + P_y) \quad (3.29)$$

$$-kE_y = \mu_0 \omega H_x \quad (3.30)$$

$$kE_x = \mu_0 \omega H_y \quad (3.31)$$

Substituindo (3.30) em (3.29) e após algumas operações algébricas, resulta:

$$\eta^2 = 1 + P_y / \epsilon_0 E_y \quad (3.32)$$

Substituindo (3.31) em (3.28) e após algumas operações algébricas, resulta:

$$\eta^2 = 1 + P_x/\epsilon_0 E_x \quad (3.33)$$

Relacionando as últimas duas equações obtêm-se a polarização da onda:

$$\rho = E_y/E_x = P_y/P_x \quad (3.34)$$

Das equações (3.30) e (3.31) obtêm-se a seguinte relação:

$$E_y/E_x = -H_x/H_y = \rho \quad (3.35)$$

### 3.2.4 Diferença de Fase

A diferença de fase ( *Dispersive Doppler, carrier phase*) mede o tempo de atraso por comparação de fases ( $\phi_1$  e  $\phi_2$ ) de dois sinais de frequências separadas ( $f_1$  e  $f_2$ ) quando estas são transladadas a uma frequência de referência comum  $f_o$ . Em VHF as fases do sinal recebido são obtidas das seguintes equações (Davies, 1990):

$$\begin{aligned} \phi_1 \lambda_1 &= \int \mu_1 ds = \int ds - \frac{40.3}{f_1^2} \int N ds = S_1 - \frac{40.3}{q_1^2 f_o^2} \text{ TEC} \\ \phi_2 \lambda_2 &= \int \mu_2 ds = \int ds - \frac{40.3}{f_2^2} \int N ds = S_2 - \frac{40.3}{q_2^2 f_o^2} \text{ TEC} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Onde  $q_1$  e  $q_2$  são inteiros relacionando  $f_o$  com  $f_1$  e  $f_2$ ,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os comprimentos de onda (distância),  $\mu_1$  e  $\mu_2$  são os índices de refração (real) e TEC é o conteúdo total de elétrons (eletrons/m<sup>2</sup>). Em VHF a refração é pequena, e assumindo que os caminhos reais de  $S_1$  e  $S_2$  são iguais, a diferença de fase medida sob a frequência  $f_o$  é dada por:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_2}{q_2} - \frac{\phi_1}{q_1} = \frac{40,3\text{TEC}}{f_o c} \left( \frac{1}{q_1^2} - \frac{1}{q_2^2} \right) \text{ em ciclos} \quad (3.37)$$

Isto é:

$$\Delta\phi = \frac{80,6\pi TEC}{f_o c} \left( \frac{1}{q_1^2} - \frac{1}{q_2^2} \right) = \frac{8.447 \times 10^{-7} TEC}{f_o} \left( \frac{1}{q_1^2} - \frac{1}{q_2^2} \right) \text{ em radianos} \quad (3.38)$$

### 3.2.5 Modulação de Fase

Neste método, chamado diferencial de atraso de grupo e dispersão de fase, a fase de modulação (da frequência  $\Delta f$ ) na frequência  $f_1$  é comparada com a mesma modulação numa frequência maior  $f_2$  (Davies, 1990). A modulação de fase  $\phi_m$  é dada por:

$$\phi_m = \frac{80.6\pi}{c} \Delta f \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) TEC = 8,447 \times 10^{-7} \Delta f \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) TEC \quad (3.39)$$

Quando  $f_2^2 \gg f_1^2$  temos que:

$$\phi_m \approx 8,447 \times 10^{-7} \Delta f / f_1^2 \quad (3.40)$$

## 3.3 Ionosfera

A Ionosfera é a região superior da atmosfera, compreendida aproximadamente entre 50 a 1000 km de altura e caracterizada pela alta condutividade, devido ao número elevado de íons e elétrons livres que a compõe.

A ionosfera é dividida em três camadas ou regiões as quais são mostradas na Figura 3.1. A camada D, compreendida entre 50 a 90 km de altura, e que contem a camada de raios cósmicos ou camada C. A camada E, está compreendida entre 90 a 140 km de altura, é produzida pelos raios X moles (*Soft X-Rays*) do Sol, e tem esporadicamente uma camada ionizada relativamente mais densa, conhecida como camada E esporádica ( $E_s$ ). A camada F, tem geralmente a maior densidade de elétrons, está acima dos 140 km de altura, e é subdividida em duas camadas: F1 e F2, as quais são produzidas pela radiação EUV (*extreme ultraviolet light*). Acima da ionosfera está a plasmasfera.



As ondas de rádio são refratadas somente na camada E, F1, F2 e quando está presente, na E<sub>s</sub>. A camada D é importante porque absorve ou atenua as ondas.

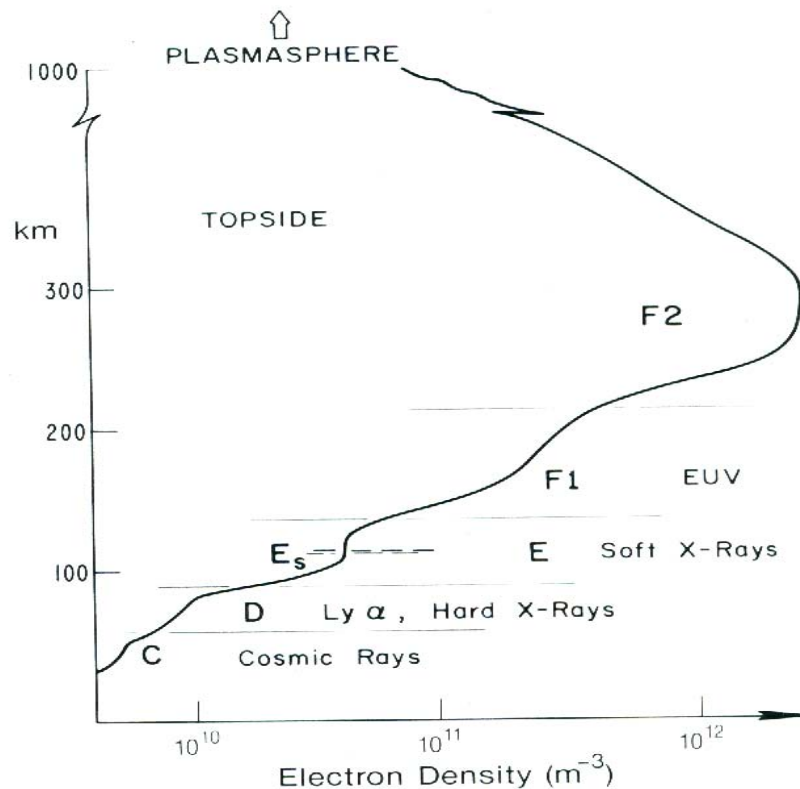


FIGURA 3.1 - Estrutura da ionosfera em um dia de verão para uma latitude média.

FONTE: Davies (1990, p.2).

A região mais importante para a propagação de HF é a F2 pois:

- Está presente durante as 24 horas do dia.
- Permite caminhos longos de comunicação na parte superior.
- Usualmente reflete as altas frequências na banda de HF.
- Possui um maior tempo de vida de elétrons (20 minutos) comparado com as outras camadas E (20 segundos) e F1(1 minuto) (IPS, 2002).

A ionização é causada durante o dia pela radiação solar, cujos fótons colidem com átomos ou moléculas neutras, gerando elétrons livres e deixando íons com carga

positiva. O processo inverso, a perda de elétrons também sucede durante a noite e o dia. Estes elétrons livres se combinam com íons carregados positivamente formando partículas neutras.

A ionosfera é um meio que varia muito, e em comunicação HF não dá para usar a mesma frequência durante todo o ano, nem sequer durante todo o dia. Esta varia em função do ciclo solar, a estação, latitude, longitude, a hora, etc. Isto implica que devemos escolher (fazer previsões) frequências ótimas de trabalho (FOT) para cada período e poder manter a comunicação.

### **3.4 Propagação Terra- Espaço**

Este tipo de propagação é quando uma onda vai de um ponto na superfície terrestre ou próxima dela a outro no espaço atravessando a ionosfera ou vice-versa. Isto se realiza utilizando frequências altas, geralmente UHF e SHF.

Os principais efeitos da ionosfera na propagação Terra–espaço incluem a rotação de Faraday do plano de polarização da onda, dispersão por irregularidade, absorção na região D, atraso de tempo, diferença de fase, frequência de ressonância, flutuações de amplitude ou cintilação, refração, etc. Alguns destes efeitos são mostrados na Figura 3.2.

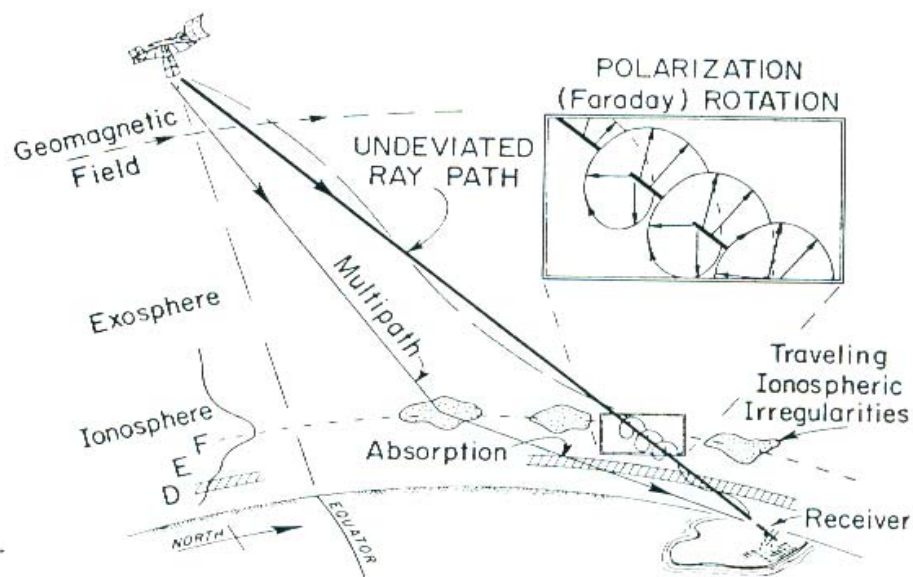


FIGURA 3.2 - Principais efeitos ionosféricos na propagação de uma onda eletromagnética.

FONTE: Davies (1990, p. 274).

Na atualidade a banda de frequência do espectro mais desejável para satisfazer as necessidades de propagação, está entre 1 a 10 GHz. Este é conhecido como “*noise window*”, na qual os ruídos são mínimos e a absorção atmosférica pode ser desprezada. Mas, com o congestionamento nessas frequências deve-se procurar outras acima de 10 GHz, que permitam ter uma performance equivalente às que estão abaixo de 10 GHz.

### 3.4.1. Excesso de Atraso de Tempo

Devido à concentração de elétrons ao longo da trajetória do sinal, o diferencial de fase e modulação de fase sofrem ambos erros relativos ao atraso de tempo  $T$  de propagação do sinal, de acordo com a seguinte fórmula :

$$T = \left( \frac{40,3TEC}{cf^2} \right) = 1,343 \times 10^{-17} \text{ TEC} / f^2 \quad (3.41)$$

Onde  $T$  é em segundos,  $f$  é a frequência em Hz e  $TEC$  é em elétrons  $m^{-2}$ .

### 3.4.2 Refração

A Figura 3.3 ilustra a refração da trajetória da onda através da ionosfera. O erro angular  $\xi$  (Davies 1990, p.279) é relativo ao erro em distância  $\rho$  ( $= cT$ ) dado por:

$$\xi \approx \frac{(R + a \sin \Delta) a \cos \Delta}{h_i (2a + h_i) + a^2 \sin^2 \Delta} \frac{\rho}{R} \approx \frac{(R + a \sin \Delta) \cos \Delta}{2h_i + a \sin^2 \Delta} \frac{\rho}{R} \quad (3.42)$$

onde  $\Delta$  é o ângulo de elevação verdadeiro,  $a$  é o raio da Terra ( $\cong 6371$  km),  $R$  é a distância Terra-satélite e  $h_i$  é a altura do centróide de maior densidade eletrônica, geralmente entre 300 a 450 km.

Na presença de um gradiente horizontal de  $TEC$  e para ângulos de incidência próximo ao zênite, o erro angular é dado por:

$$\xi = 40,3 f^{-2} dTEC / dx \quad (3.43)$$

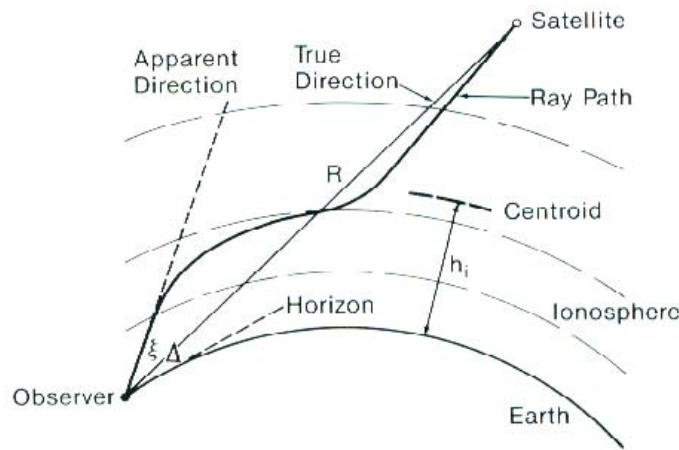


FIGURA 3.3 - Trajetória do raio Satélite-Terra, mostrando a curvatura reflexiva e desvio angular.

FONTE: Davies (1990, p. 280).

### 3.4.3 Principais aplicações de sistemas de propagação Terra-Espaço

Atualmente existe uma série de sistemas que precisam deste tipo de comunicação, entre os quais podemos mencionar:

- 1) Sistemas de propagação transionosférica; que operam em frequências superiores a 200 MHz, e geralmente precisam de um satélite no espaço como terminal.
- 2) O Sistema de Posicionamento Global (GPS); que é um sistema de navegação espacial de alta precisão, que provê ao usuário informação com precisão de posição de 15 a 20m, de velocidade de 0,10 m/s e de tempo de 40ns.
- 3) Satélites de comunicação; que são providos de uma larga banda passante para permitir a transmissão de dados rapidamente entre um número grande de usuários. Existem vários satélites enlaçados tais como: INTELSAT, COMSAT, DSCS, NATO, MARISAT, etc.
- 4) Satélites de vigilância; que operam em frequências entre 2 e 3 GHz, monitorando atividades do oceano (SEASAT) e desastres naturais sobre a Terra (LANDSAT).
- 5) Sistemas Geodésicos; que operam geralmente acima de 2 GHz, usados para medidas geodésicas (por exemplo medir deslocamento de continentes) e para rádio-astronomia.
- 6) Sistema de transferência de tempo de alguns sistemas de satélites (especialmente GPS), que são usados para sincronizar e comparar relógios e frequências padrões com estabilidade na ordem de  $10^{-14}$ .

### 3.5 Propagação Terra - Terra

Esta forma de propagação se apresenta entre receptores localizados em diferentes pontos da Terra os quais podem comunicar-se em bandas como HF, que usam as propriedades da ionosfera para estabelecer os melhores canais de comunicação. É possível estabelecer comunicação Terra–Terra em outras bandas como VLF, LF, MF, VHF, UHF, SHF mas o efeito principal da ionosfera é em HF, pois é a banda que permite a comunicação de um ponto a qualquer outro do planeta com maior simplicidade.

Um sinal de rádio em HF (3 – 30 MHz) pode propagar-se a um receptor distante de três formas (Figura 3.4):

- Onda de terra (*ground wave*): perto da Terra, para distâncias pequenas de 100 km em continente e 300 km sobre o mar. O alcance da onda depende da altura da antena, polarização, frequência, tipo de terreno, vegetação ou estado do mar.
- Onda direta ou linha de visada (*direct or line of sight wave*): esta onda interage com a onda refletida na Terra, depende da separação do terminal, frequência e polarização.
- Onda de céu (*sky wave*): refletida na ionosfera, alcança qualquer distância.

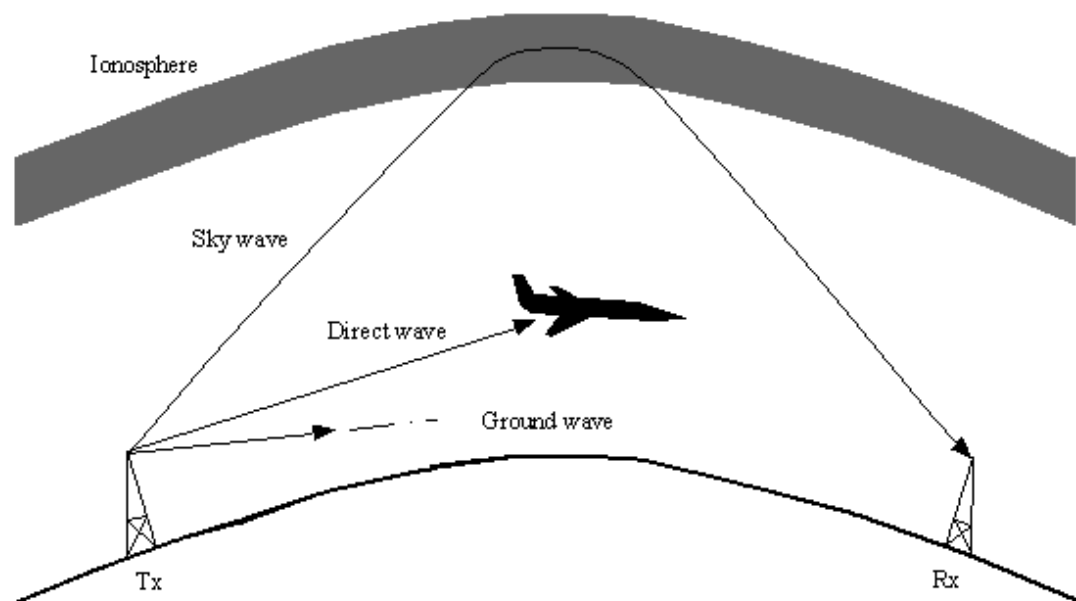


FIGURA 3.4 - Tipos de propagação HF.

FONTE: IPS (2002, p.12).

Atualmente existem modelos ou programas que determinam frequências ótimas de propagação entre dois lugares diferentes em função da latitude, longitude, distância, hora, ângulo de irradiação de antena, estação do ano, etc. Estes programas devem considerar na predição parâmetros ou índices de longa duração, características ionosféricas e parâmetros do sistema. Também é muito importante conhecer as distâncias, pois isto determina o número de saltos de distância (*hop length*), que é a distância coberta por uma onda de rádio que é refletida na ionosfera e volta para a Terra

### 3.5.1 Freqüências Usáveis

Para qualquer circuito (*sky wave*) existe uma frequência máxima usável (*Maximum Usable Frequency* -MUF) a qual é determinada pelo estado da ionosfera nas vizinhanças da área de reflexão e a distância do circuito.

A MUF é refletida na área de máxima densidade eletrônica da região. Durante o dia é possível comunicar-se via a camada E ou F usando diferentes frequências. A maior frequência suportada pela camada E é a EMUF, e a maior suportada pela camada F é a FMUF.

A FMUF varia durante o dia, sazonalmente e com o ciclo solar. Esta pode ser obtida por métodos gráficos (nomogramas) ou por modelos de camadas parabólicas. Como a FMUF varia muito durante o dia, para garantir a comunicação 95% do tempo se trabalha com uma MUF reduzida, a qual é conhecido como *Optimum Working Frequency* (FOT  $\approx 0,85$  MUF).

A mínima frequência que permite manter o enlace (afetada principalmente pela absorção ionosférica na camada D) é chamada de *Lowest Useful Frequency* (LUF) ou frequência mínima usável.

### 3.5.2 Salto em Distância

A distância percorrida por um sinal de rádio depois de ser refratada uma vez na ionosfera e voltar à Terra é conhecida como salto em distância. Isto está limitado pela altura da ionosfera e a curvatura da Terra.

Para cada camada (E e F), o salto varia em distância, o mesmo sucede se variarmos a frequência, o ângulo de elevação da antena, e dependendo da distância pode ser necessário mais de um salto. Na Figura 3.5 observa-se um salto para diferentes alturas das camadas E (100 km) e F (300km).



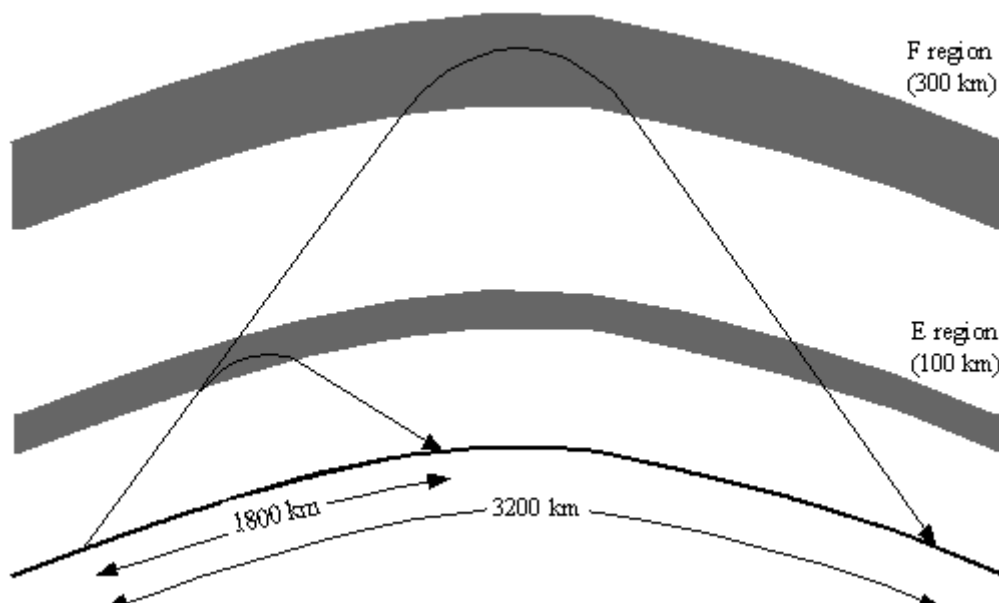


FIGURA 3.5 - Salto em distância com um ângulo de elevação de antena de  $4^\circ$ .

FONTE: IPS (2002, p.15).

### 3.5.3 Modos de Propagação

Existem muitos caminhos ou modos na qual uma *sky wave* pode viajar de um transmissor a um receptor. O modo particular que requer o menor número de saltos entre o transmissor e receptor é chamado modo de primeira ordem. O modo que requer um salto adicional é chamado de modo de segunda ordem. Para a camada E e F existem estes dois modos, mas só é aplicável para circuitos de dia na camada E.

Modos simples são aqueles que se propagam usando uma camada (Figura 3.5). Modos complexos propagam-se usando a combinação das camadas (Figura 3.6). Como a região da ionosfera não é lisa, ao contrário é ondulada e está em movimento, ela afeta a refração das ondas que a atravessam, determinando outros modos de propagação que

envolvem uma série de refrações da ionosfera sem ter reflexões intermediárias da Terra, as quais são conhecidos como duto e “*chordal mode*” (fig 3.6).

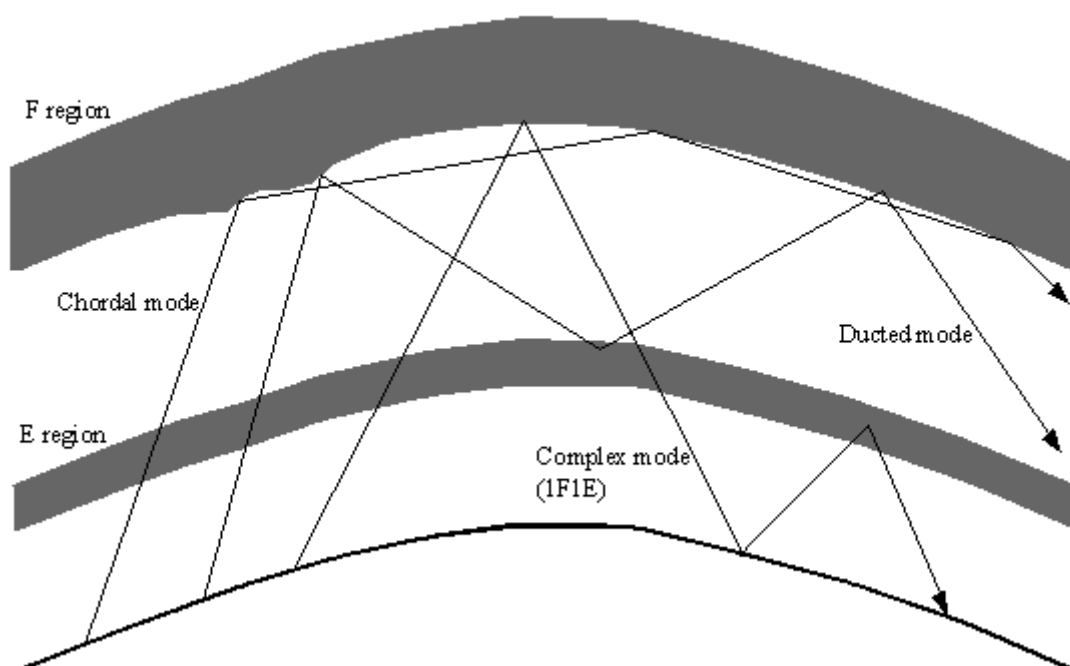


FIGURA 3.6 - Modos de propagação complexa, duto e *Chordal*.

FONTE: IPS (2002, p.17).

## **CAPÍTULO 4**

### **OBTENÇÃO DE INFORMAÇÃO IONOSFÉRICA DO GPS**

#### **4.1 Introdução**

A propagação das ondas eletromagnéticas pode realizar-se através de meios diferentes: pela atmosfera neutra ou troposfera, onde vai depender da pressão, temperatura e vapor de água; e pela ionosfera, onde vai depender do número de elétrons livres ao longo do caminho da onda.

É uma propriedade bem conhecida da ionosfera, que a estrutura e densidade de elétrons varia fortemente com o tempo, localização geográfica, atividade solar e distúrbios geomagnéticos. As variações do conteúdo de elétrons, considerando sua unidade ( $10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup> = 1TECU) podem ser da ordem de várias centenas.

A maior parte das informações adquiridas da ionosfera, foram obtidas por sensoriamento remoto com ondas de rádio. Foram usadas técnicas de frequência simples para medição de tempo de vôo, amplitude, fase, polarização, ângulos de recepção que incluem a reflexão. Desenvolveram-se também técnicas de varredura em frequência para determinar a estrutura vertical da ionosfera; transmissores e receptores móveis em satélites foram usados para pesquisar a estrutura horizontal da ionosfera.

Inicialmente a sondagem da ionosfera foi com propósito científico, mas a grande expansão de estações de trabalho foi durante a Segunda Guerra Mundial com a finalidade de prever condições de propagação das ondas de rádio. Em 1958 o número de estações era de 150, e foram estabelecidos procedimentos uniformes para interpretação, intercâmbio e uso de dados dos ionogramas.

A partir de 1976 radares pulsados faziam varredura de frequência, os quais foram chamados de Ionossondas. Estes operavam entre 0,1 a 30 MHz, a duração da varredura variava entre segundos a minutos, potências entre 1 a 10 KW e com resolução em altura até de 1 km.

Posteriormente aparecem outros equipamentos com maiores capacidades como: ionossondas digitais (*digisonde*, 1986), o sondador australiano *Ionospheric Prediction Service* (IPS-42 *sounder*) e o *chirp sounder* (Davies, 1990)

Embora as ionossondas modernas possam medir vários parâmetros e ser um instrumento ideal, estas apresentam as seguintes limitações:

- 1) Em distúrbios ionosféricos os ecos podem perder-se pela alta absorção da região D,
- 2) O traço da camada  $F_2$  pode perder-se quando  $f_oF_2$  cai a baixo da  $f_oF_1$  e  $f_oE$  (Condição G),
- 3) Quando a máxima frequência de traçado excede a frequência mais alta do sondador,
- 4) Quando a frequência mais alta ou mais baixa do eco cai abaixo da frequência mínima do sondador,
- 5) O sondador não provê informação direta dos vales entre camadas e acima da máxima densidade de elétrons,
- 6) Em geral a operação é só intermitente e
- 7) É caro manter ligado um sondador para simples medições.

Depois de declarado a Capacidade Operacional Total (*Full Operational capability* – FOC) do sistema GPS a partir de 17 de Julho de 1995, este passou a ser uma ferramenta fundamental para o estudo da ionosfera. Com dois sinais  $L_1$  e  $L_2$ , viajando dos satélites a um receptor (localizado em qualquer lugar da Terra ou perto dela) é possível determinar o avanço de fase e o atraso do grupo, que são de igual magnitude mas de sinal contrário. Uma excelente aproximação de primeira ordem é: o erro ionosférico é proporcional à integração da densidade de elétrons ao longo do caminho (TEC) e inversamente

proporcional ao quadrado da frequência da portadora de fase. Posteriormente aparecem trabalhos que mapeam o conteúdo global de elétrons (Schaer et al, 1995; Komjathy, 1997, Fedrizzi, 1999) a partir dos sinais  $L_1$  e  $L_2$  de GPS.

Em maio de 1998, a IGS estabeleceu um grupo de estudo ionosférico para acompanhar e coordenar as atividades ionosféricas. Este grupo está constituído por representantes de cada centro de análise (AC), associação ionosférica de centros de validação, instituições da comunidade ionosférica, representante da comunidade de pesquisa ionosférica, centro coordenador de análise (ACC) e um representante da central de administração da IGS.

O grupo de estudo ionosférico da IGS começou a produzir regularmente mapas globais ionosféricos como um subproduto da determinação do TEC, e do *differential code biases* entre satélite-receptor. Para este propósito foi recomendado centralizar os trabalhos em dois produtos ionosféricos:

- Mapas ionosféricos Globais (*Global Ionosphere Maps*, GIM) a cada duas horas em forma de grade de duas dimensões (latitude e longitude) e
- Parâmetros diários de *Differential Code Biases* (DCBs) para satélites.

Desde 1 de Junho de 1998 a CODE, EMR, ESA e UPC (Universidade Politécnica de Catalunya, Barcelona-Espanha) enviam diariamente arquivos *IONospheric EXchange* (IONEX) format para a *Crustal Dynamics Data Information System*, (CDDIS) da NASA (USA). Três meses depois o JPL iniciou também o envio de arquivos IONEX para o CDDIS, os quais pode-se acessar facilmente pela Internet.

Para o trabalho usamos o formato IONEX do CODE, devido ao fácil acesso de informação e parâmetros da representação global do TEC, por parte do Dr. Schaer. Os formatos de outras instituições vão ser apresentados como parâmetros de comparação.

## 4.2 Técnicas de Modelagem Ionosférico Global

Os modelos ionosféricos podem ser divididos em dois grupos: modelos empíricos, baseados na coleção de dados sobre um longo período de tempo e os modelos teóricos construídos usando princípios físicos, aplicado às condições geofísicas.

### 4.2.1 Integrando a Densidade de Elétrons

O estado da ionosfera é descrito pela densidade de elétrons  $N_e$  em unidades por metro cúbico, mas para a propagação das ondas através da ionosfera é usada a densidade de elétrons integrada ao longo do caminho do raio (TEC), como a mais importante quantidade ionosférica. Usualmente é expressada em TEC *units* (TECU), onde 1 TECU corresponde a  $10^{16}$  elétrons contidos em uma coluna vertical alinhada ao longo da linha de mira com uma seção de interseção de um metro quadrado. A linha de mira ou visada ou *slant* TEC  $E$ , é dado pela integral:

$$E = \int N_e(\rho) d\rho \quad (4.1)$$

onde  $N_e(\rho)$  denota a densidade de elétrons ao longo do caminho.  $E$  pode ser dado em TECU. O termo TEC é usualmente usado para designar o TEC vertical (VTEC), isto é, o TEC projetado na vertical, o qual é menor que o *slant* TEC (TEC inclinado).

### 4.2.2 Modelo de Camada Única e Função de Mapeamento

Para um mapeamento do TEC absoluto usando uma base de dados GPS na Terra, o VTEC é o mais interessante, pois é uma medida independente da posição do satélite em relação ao receptor. O VTEC pode ser calculado a partir do TEC inclinado usando uma função de mapeamento dependente da elevação é:

$$F(z) = E(z) / E_v \quad \text{com } E_v = E(0) \quad (4.2)$$

onde  $z$  é o ângulo zenital e  $F(z)$  descreve a relação entre o TEC inclinado  $E(z)$  e o TEC vertical ( $E_v$ ).

Ao referirmos ao resultado vertical do TEC para determinadas coordenadas solares geomagnéticas, nos baseamos no modelo chamado de camada única (*single-layer or thin shell*) e é usualmente adotado para a ionosfera (Figura 4.1). Neste modelo assume-se que todos os elétrons livres estão contidos em uma camada de espessura infinitesimal a uma altura  $H$ . A altura é idealizada entre 350, 400 ou 450 km, que corresponde ao baricentro do perfil da ionosfera, aproximadamente à máxima densidade de elétrons.

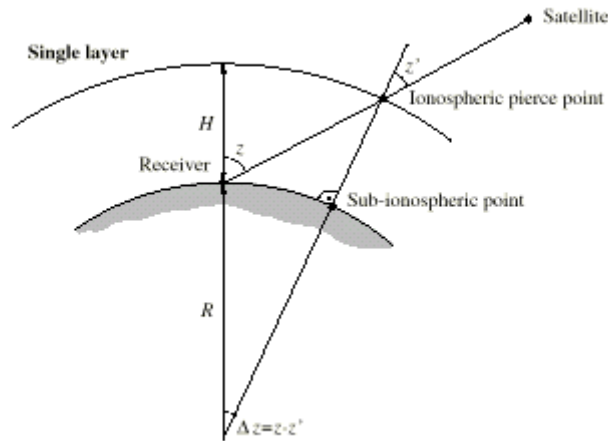


FIGURA 4.1 - Modelo ionosférico de camada única.

FONTE: Schaer (1998, p. 55).

Da Figura 4.1 pode-se concluir que:

$$\sin z' = \frac{R}{R + H} \sin z \quad (4.3)$$

Onde  $R \approx 6371$  km é a média do raio terrestre e  $H$  é a altura da camada única.

### 4.3 Métodos de Parametrização Global do TEC

Existem vários métodos usados pelo grupo ionosférico do IGS, entre estes temos: JPL, ESA, EMR, UPC, UNB e CODE. A seguir vamos descrever brevemente o método desenvolvido pelo CODE usado para nosso trabalho.

#### 4.3.1 Representação Global do TEC

A representação global de parâmetros TEC da Terra proposta por Schaer et al (1995) é uma expansão em harmônicos esféricos (Spherical Harmonic – SH):

$$E_v(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin\beta) [\tilde{C}_{nm} \cos(ms) + \tilde{S}_{nm} \sin(ms)] \quad (4.4)$$

Onde:

$\beta$  é a latitude geomagnética ou geográfica do ponto de interseção da linha de visada com a camada única.

$S = \lambda - \lambda_o$  é a longitude fixa do Sol no ponto ionosférico de penetração (*pierce point*)

$\lambda$  é a longitude do ponto de penetração ionosférico.

$\lambda_o$  é a longitude do Sol.

$n_{\max}$  é o máximo grau da expansão em harmônicas esféricas.

$\tilde{P}_{nm} = N_{nm}P_{nm}$  é a função associada de Legendre normalizada de grau  $n$  e ordem  $m$ .

$N_{nm}$  é a função normalizada.

$P_{nm}$  é a função clássica de Legendre não normalizada.

$\tilde{C}_{nm}, \tilde{S}_{nm}$  são coeficientes SH e parâmetros GIM proporcionados pelo CODE para cada duas horas.

A função normalizada  $N_{nm}$  pode ser escrita da seguinte forma:



$$N_{nm} = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{om})}{(n+m)!}} \quad (4.5)$$

Onde  $\delta$  é o delta de Kronecker ( $\delta = 1$  para  $m=0$  ou  $\delta = 0$  para  $m \neq 0$ ).

Pode-se mostrar que a média do VTEC  $\bar{E}_v$  da distribuição global do TEC é geralmente representada pelo coeficiente SH de grau zero  $\tilde{C}_{00}$ :

$$\bar{E}_v = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} E_v(\beta, s) \cos\beta \, d\beta \, ds = N_{00} \tilde{C}_{00} \text{ com } N_{00}=1 \quad (4.6)$$

Consequentemente é possível deduzir o número global de elétrons a partir do coeficiente  $\tilde{C}_{00}$  usando a seguinte relação:

$$\eta_e = 4\pi R'^2 \bar{E}_v \quad (4.7)$$

Onde  $R' = R + H$  é o raio dado em metros.  $\eta_e$  é obtido em unidades de  $10^{16}$ .

O número de parâmetros GIM  $\tilde{C}_{nm}$  e  $\tilde{S}_{nm}$  na expansão SH é dada pela expressão:

$$u_E = (n_{\max} + 1)^2 \quad (4.8)$$

Inicialmente o CODE trabalhou com grau 8, atualmente trabalha com grau 15, ou seja usa 256 coeficientes.

#### 4.4 O Formato de Intercâmbio de Mapas Ionosféricos

O formato *IONosphere map EXchange Format* (IONEX), foi desenvolvido pelo grupo de trabalho ionosférico da IGS (Schaer et al, 1998), seguindo características similares ao formato RINEX, e permite o intercâmbio de mapas ionosféricos de duas ou três dimensões.

Cada arquivo IONEX consiste de uma seção de cabeçalho (*header section*) e uma seção de dados (*data section*). A seção de cabeçalho é colocada no início do arquivo e contém informação descritiva válida para todo o arquivo (Figura 4.2). Esta seção contém também etiquetas de cabeçalho nas colunas 61-80 de cada linha. A seção de dados contém a informação TEC atualizada como um mapa TEC gradeado, e geralmente os valores são dados em 0,1 TECU. Na Figura 4.3 se mostra só um trecho da seção de dados (um arquivo completo contém mais de 100 páginas).

O formato IONEX diário está formado por 12 medições feitas a cada duas horas, os mapas são dados num sistema de referência terrestre (Latitude e Longitude). Em adição ao TEC o *Root Mean Square* (RMS) do erro do mapa pode ser fornecido. Nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 são apresentados 4 arquivos IONEX já processados como gráficos tridimensionais de superfície pertencentes a CODE, NRCAN, ESA e JPL para o dia 14 de fevereiro de 2002 a 01:00 UT.

```

1.0          IONOSPHERE MAPS      GPS          IONEX VERSION / TYPE
GIM V3.0      JPL - GNISD      18-feb-2002 07:12  PGM / RUN BY / DATE
JPL'S GLOBAL IONOSPHERE MAPS YEAR 2002 DAY 045  COMMENT
Global Ionospheric Maps (GIM) are generated on an hourly  DESCRIPTION
and daily basis at JPL using data from up to 100 GPS sites  DESCRIPTION
of the IGS and others institutions.  DESCRIPTION
The vertical TEC is modeled in a solar-geomagnetic  DESCRIPTION
reference frame using bi-cubic splines on a spherical grid.  DESCRIPTION
A Kalman filter is used to solve simultaneously for  DESCRIPTION
instrumental biases and VTEC on the grid (as stochastic  DESCRIPTION
parameters).  DESCRIPTION
Contact Address:  gpsiono@cobra.jpl.nasa.gov .  DESCRIPTION
2002 2 14 1 0 0  EPOCH OF FIRST MAP
2002 2 14 23 0 0  EPOCH OF LAST MAP
7200  INTERVAL
12  # OF MAPS IN FILE
NONE  MAPPING FUNCTION
10.0  ELEVATION CUTOFF
One-way carrier phase leveled to code  OBSERVABLES USED
91  # OF STATIONS
28  # OF SATELLITES
6371.0  BASE RADIUS
2  MAP DIMENSION
450.0 450.0 .0  HGT1 / HGT2 / DHGT
87.5 -87.5 -2.5  LAT1 / LAT2 / DLAT
-180.0 180.0 5.0  LON1 / LON2 / DLON
-1  EXPONENT
TEC/RMS values in 0.1 TECU; 9999, if no value available  COMMENT
DIFFERENTIAL CODE  BIASES  START OF AUX DATA
01 -1.418 0.011  PRN / BIAS / RMS
02 -2.400 0.011  PRN / BIAS / RMS
03 -0.541 0.011  PRN / BIAS / RMS
04 0.372 0.011  PRN / BIAS / RMS
05 -0.611 0.011  PRN / BIAS / RMS
06 -0.155 0.011  PRN / BIAS / RMS
07 -2.049 0.011  PRN / BIAS / RMS
08 -0.927 0.011  PRN / BIAS / RMS
09 -0.049 0.011  PRN / BIAS / RMS
10 -2.014 0.011  PRN / BIAS / RMS
11 4.196 0.011  PRN / BIAS / RMS
13 3.705 0.011  PRN / BIAS / RMS
14 2.968 0.011  PRN / BIAS / RMS
.
.
.
31 0.512 0.011  PRN / BIAS / RMS
DIFFERENTIAL CODE BIASES  END OF AUX DATA
END OF HEADER

```

FIGURA 4.2 - Seção cabeçalho do formato IONEX processado pelo JPL.

FONTE: NASA(2002).

```

1
2002      2      14      1      0      0
87.5-180.0 180.0    5.0 450.0
245 245 244 243 243 242 241 239 238 236 235 233 231 229 228 226
224 222 220 218 216 215 213 212 210 209 208 208 207 207 207 207
207 207 208 209 209 210 212 213 214 215 217 218 220 221 223 224
226 227 228 230 231 233 234 235 236 238 239 240 241 242 242 243
244 244 245 245 245 245 245 245 245 245 245 245 245 245 245 245
85.0-180.0 180.0    5.0 450.0
266 266 266 265 264 263 261 259 257 254 250 247 243 239 235 230
226 221 217 213 209 205 202 199 196 194 192 191 190 189 189 190
190 192 193 195 197 199 201 204 206 209 212 214 217 219 222 224
.
.
.
-87.5-180.0 180.0    5.0 450.0
276 275 275 274 272 271 269 267 265 262 260 257 254 251 247 244
240 236 233 229 225 221 218 214 211 207 204 202 199 197 195 194
193 192 192 192 193 194 195 197 199 202 205 208 211 215 218 222
226 229 233 237 241 244 248 251 254 257 260 263 265 267 269 271
272 273 274 275 276 276 276 276 276 276 276 276 276 276 276 276
12
1
2002      2      14      1      0      0
87.5-180.0 180.0    5.0 450.0
LAT/LON1/LON2/DLON/H
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 6
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 7
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 8 8
85.0-180.0 180.0    5.0 450.0
8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
7 7 7 7 7 7 7 6 6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 8 8 8
:
:
:
:
:
:

```

FIGURA 4.3 - Seção de dados do formato IONEX processado pelo CODE.

FONTE: NASA (2002).

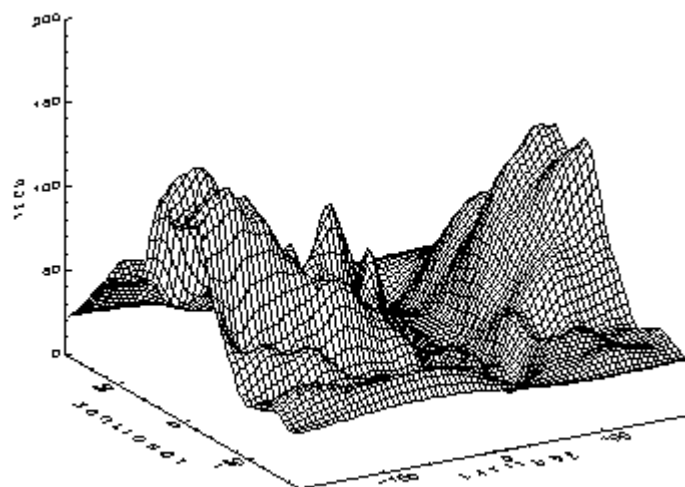


FIGURA 4.4 - Mapa TEC de dados CODE (01:00 UT do dia 14-02-2002).

FONTE: NASA (2002).

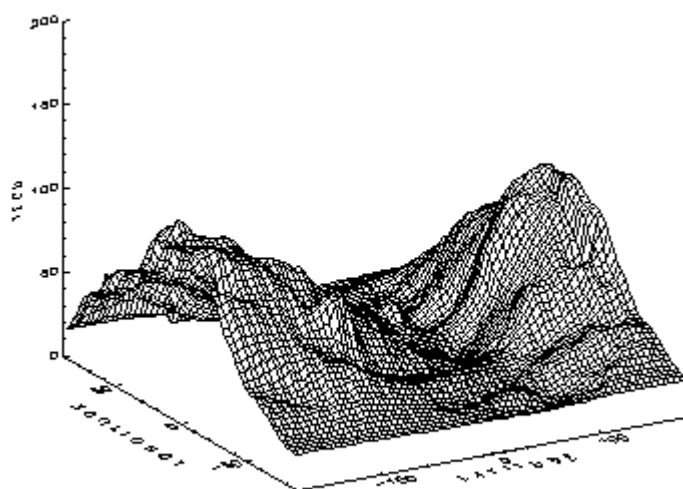


FIGURA 4.5 - Mapa TEC de dados NRCan (01:00 UT do dia 14-02-2002).

FONTE: NASA (2002).

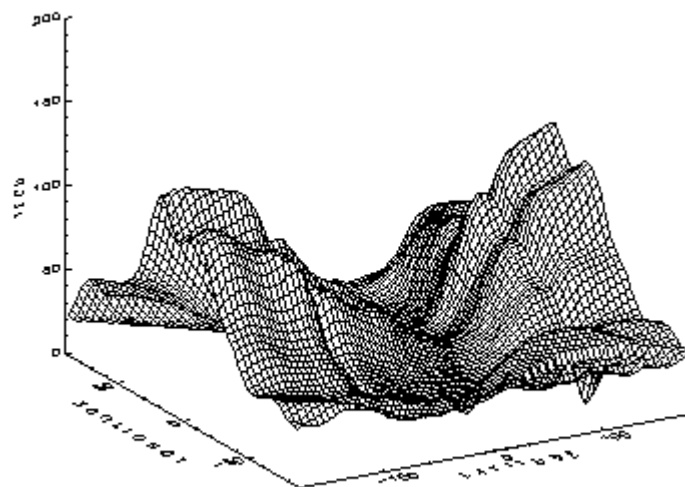


FIGURA 4.6 - Mapa TEC de dados ESA (01:00 UT do dia 14-02-2002).  
 FONTE: NASA (2002).

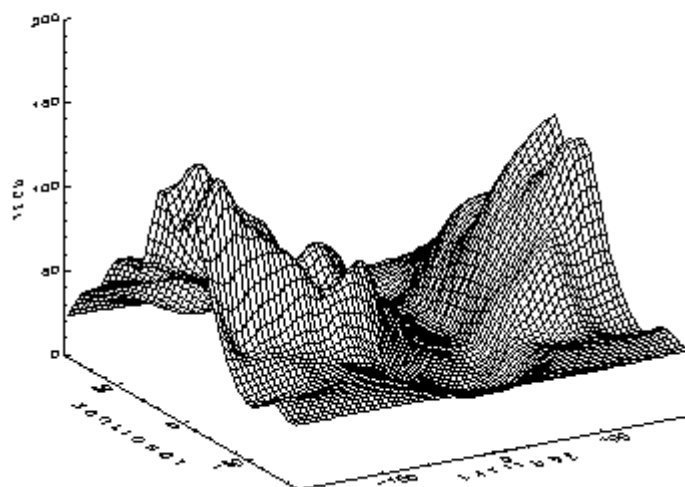


FIGURA 4.7 - Mapa TEC de dados JPL (01:00 UT do dia 14-02-2002).  
 FONTE: NASA (2002).

#### 4.4.1 Produtos Ionosféricos CODE

O CODE trabalha com três níveis diários de processamento. Em ordem cronológico temos:

- (1) rápido , o processo diário é iniciado via comando FTP, o qual é executado pouco depois de 00:00 UT, o computador vai baixar o arquivo RINEX de observação de três centros globais de dados do IGS.
- (2) final, este produto do CODE consiste de órbitas, ERPs, coordenadas de estações em formato SINEX, relógio de satélites, informação troposférica, mapas ionosféricos e DCBs de satélites em formato IONEX, são enviados semanalmente para o CDDIS e são processadas as informações de mais de 130 estações.
- (3) dados IGS Europeus processadas, em adição ao mapa ionosférico onde é derivada uma *ambiguity-fixed*.

O presente trabalho está baseado em dados CODE de tipo final, para o período compreendido entre o 14 de fevereiro ao 15 de março de 2002, mas para predições que precisem da informação dos últimos dias pode-se usar arquivos do tipo rápido. O programa desenvolvido é capaz de ler os três tipos do arquivos do CODE no formato IONEX e arquivos dos coeficientes, além de formatos IONEX de outras instituições.





## CAPÍTULO 5

### PREDIÇÕES DE PROPAGAÇÃO IONOSFÉRICA

#### 5.1 Introdução

Neste Capítulo apresentamos, de forma geral, como os dados ionosféricos podem ser aplicados na solução de problemas de comunicação em HF (3-30 MHz). As previsões ionosféricas são usadas no planejamento de sistemas, seleção de frequências e determinação de interferência entre sistemas. Estas são válidas sobre toda a faixa de frequências da banda HF.

Devido à variação temporal e espacial (horárias, diárias, posição, etc.) da ionosfera é necessário ter conhecimento desta variabilidade para selecionar a frequência ótima, potência de transmissão requerida e configuração de antenas. Existem dois tipos de previsões requeridas:

- (1) previsões de curto prazo (*short-term predictions*), as quais são requeridas pelo operador de circuito para antecipar uma interrupção do circuito por falha da MUF, alta absorção ou excessivo *fading* (desvanecimento).
- (2) previsões de longo prazo (*long-term predictions*), são requeridas no planejamento e instalação do equipamento, considerando compatibilidade e custos.

Na atualidade existem uma série de softwares (Ham Companion, ICEPAC, VOACAP, IPS, IONCAP, etc.), que determinam a frequência ótima de trabalho para garantir o enlace entre uma estação transmissora e uma estação receptora.

Este tipo de software será usado como parâmetro adicional de comparação, para observar as diferenças entre: os resultados produzidos diretamente pela base de dados

próprios do software com os resultados obtidos pela informação do TEC calculada a partir do sistema GPS.

## 5.2 Características Predizíveis

### 5.2.1 Long-Term Indices (Índices de Longo Prazo)

Existem vários índices solares (v. g.  $R_{12}$ ,  $F_{10.7}$ ) que são calculados para fazer previsões ionosféricas. O CCIR recomenda o uso de número de manchas solares suavizado (*Smoothed Sunspot Number* - SSN), mensais ( $R_{12}$ ), ou o índice ionosférico de valor suavizado (*smoothed value of the ionospheric index*) mensal ( $IG_{12}$ ) ou o índice  $F_{10.7}$  para serem usados na previsão de valores médios de  $f_oF_2$  e o fator MUF para distâncias de 3000 km ( $M[3000]F_2$ ) até 12 meses depois da última observação. O índice  $F_{10.7}$  pode ser usado para prever valores mensais médios de  $f_oE$  e  $f_oF_1$ .

O índice IG é baseado em dados do CCIR (Report 340-5, 1986). O valor médio mensal de meio dia de  $f_oF_2$  observado em 13 estações de latitudes médias através do mundo determinam que número de manchas solares é necessário para produzir o valor observado. O valor do número de manchas solares determinado é designado valor de IG para o mês em análise. O valor suavizado dos 12 meses é denotado como  $IG_{12}$ .

Existe uma relação entre os diferentes índices usados, que podem ser dadas pelas seguintes fórmulas (Davies, 1990):

$$F_{10.7} = 63,7 + 0,728R_{12} + 8,9 \times 10^{-4}R_{12}^2 \quad (5.1)$$

$$R_{12} = 11,44 + 0,478 IF_2 + 0,00278 IF_2^2 \quad (5.2)$$

$$IF_2 = (2,05 + 0,001 R_{12}) R_{12}^{(0,946 - 0,00047 R_{12})} - 20 \quad (5.3)$$

O índice  $IF_2$  é um índice ionosférico, que está baseado em uma relação solar de observação de  $f_oF_2$ .

## 5.2.2 Predição de Características Ionosféricas

### 5.2.2.1 Frequências Críticas das Camadas E e $F_1$

Uma primeira aproximação de frequências críticas de dia (em MHz) da camada E é dado por:

$$f_oE = 0,9[(180 + 1,44 R_{12}) \cos\chi]^{0,25} \quad (5.4)$$

onde  $R_{12}$  é a média mensal de manchas solares e  $\chi$  é o ângulo zenital solar. Como alternativa para a noite em que  $f_oE$  é mínimo, tiveram que ser desenvolvidas fórmulas que calculam  $f_oE$  para meia noite e para o ocaso ou amanhecer:

$$f_oE \text{ (meia noite)} = 0,36 [1 + 0,0098 R_{12}]^{1/2} \quad (5.5)$$

$$f_oE \text{ (ocaso, amanhecer)} = 1,05 [1 + 0,008 R_{12}]^{1/2} \quad (5.6)$$

A camada  $F_1$  é observada só durante o dia e é mais pronunciada durante o verão. Uma primeira aproximação (em MHz) é dada por:

$$f_oF_1 = (4,3 + 0,01R_{12}) \cos^{0,2}\chi \quad (5.7)$$

Uma expressão para  $f_oF_1$  em termos de latitude geomagnética  $\Phi$  (graus) e índice ionosférico  $IF_2$  é dada por:

$$f_oF_1 = f_s \cos^n \chi \quad (5.8)$$

onde:

$$f_s = f_o (f_{100} - f_o) \frac{IF_2}{100} \quad (5.9)$$

$$f_o = 4,408 + 0,0076\Phi - 0,000152\Phi^2 \quad (5.10)$$

$$f_{100} = 5,365 + 0,0129\Phi - 0,000248\Phi^2 \quad (5.11)$$

$$n = 0,11 + 0,0129\Phi - 0,000248\Phi^2 \quad (5.12)$$

Esta fórmula é aplicável para valores de  $\chi$  menores que  $40^\circ$  ( com  $IF_2=100$ ). O índice  $IF_2$  foi desenvolvido por Minnis (1964), usa valores mensal médios do meio-dia  $f_o F_2$  observados em 13 ionossondas através do mundo.

### 5.2.2.2 Frequência Crítica da Camada $F_2$

Do ponto de vista das radiocomunicações em HF, a camada  $F_2$  é a mais importante e a mais variável. Uma distribuição mundial do  $f_o F_2$  é apresentada na Figura 5.1, que indica um marcante controle geomagnético da camada  $F_2$ . O mais característico do mapa são as duas regiões de máximo  $f_o F_2$  próximo dos  $\pm 20^\circ$  de latitude, a qual é conhecida como anomalia equatorial..

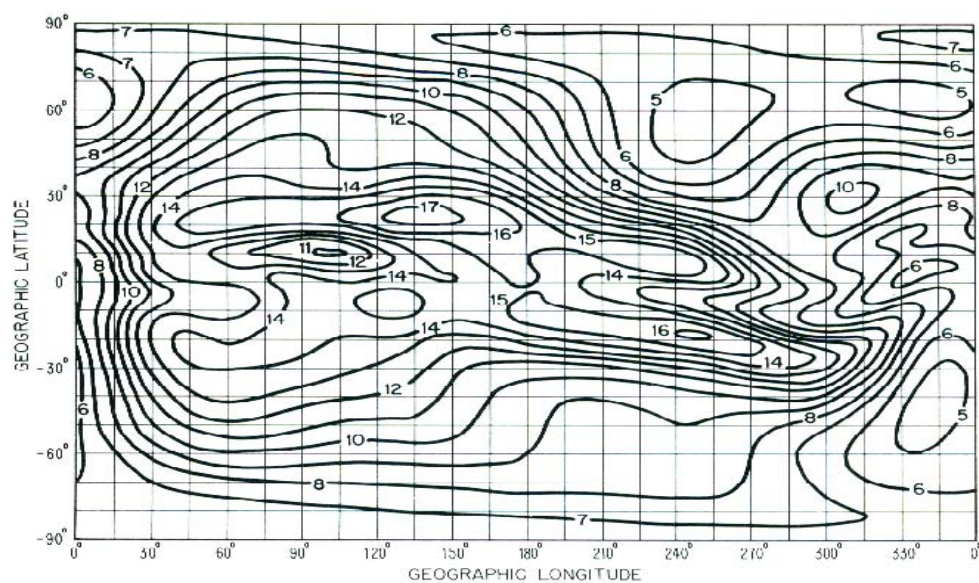


FIGURA 5.1 - Mapa de contorno (em MHz) da representação global do valor medio de  $f_oF_2$  para março 1979 às 0600 UT.  
 FONTE: Davies (1990, p. 135).

A relação entre a frequência crítica  $F_2$  e o número de manchas solares é uma linearização aproximada para o número de manchas solares entre 0 e 150. Modelos de valores médios mensais da  $f_oF_2$  são avaliados na forma de coeficientes numéricos (CCIR 1986, Report 340-5). O grau de detalhe do mapa depende de dois fatores: (1) A separação entre as estações de trabalho e (2) a mais alta ordem dos coeficientes harmônicos usados na representação. Um mapa da média mensal de  $f_oF_2$  do CCIR é definida por 988 coeficientes.

### 5.2.3 Predição de Parâmetros

#### 5.2.3.1 MUF e FOT

A *maximum usable frequency* (MUF) ou frequência máxima usável, é a mais alta frequência que permite uma adequada operação dos serviços de rádio entre terminais, em um tempo dado e sob condições específicas de trabalho como: tipo de antena, transmissor, potência, tipo de emissão, taxa de transferência e relação sinal-ruído requerida.

Quando a média mensal de frequências críticas e altura do ponto de reflexão forem determinadas, a MUF pode ser obtida por métodos gráficos (nomogramas) ou por teoria de camadas parabólicas. O comportamento das camadas E e  $F_1$  pode não ser considerado, pois são fatores pequenos na hora de compensar frequências críticas da  $F_1$ , e o produto (MUF) é aproximadamente o mesmo. A camada E geralmente controla circuitos para distâncias próximas de 2000 Km e a camada F para distâncias maiores que 2000 km. A camada  $F_2$  determina a propagação para distâncias maiores que 3000 km. Com um pequeno ângulo de propagação, considerando uma reflexão simples a distância é limitada a 4000 km.

A *optimum working frequency* ou frequência ótima de trabalho, mais conhecida pela sigla em francês FOT, é um valor abaixo do MUF, que permite assegurar o enlace entre estações considerando a variabilidade da ionosfera. Geralmente é considerado como:

$$FOT = 0,85 \text{ MUF} \quad (5.13)$$

### 5.2.3.2 Ângulo de Radiação

O ângulo depende da altura efetiva de reflexão, a qual pode ser conhecida através de gráficos ou assumida ser constante (geralmente entre 350 a 450 km). Na atualidade vários programas computacionais de predição substituem os métodos gráficos por algoritmos. Para uma altura efetiva de reflexão  $h$ , o ângulo de elevação  $\Delta$  para um salto em distância  $d$  é:

$$\Delta = \tan^{-1} [\cot(d/2a) - a \operatorname{cosec} (d/2a)/(a + h)] \quad (5.14)$$

onde  $a$  é o raio da Terra ( $\cong 6371$  km).

### 5.2.3.3 Ruído

Na ausência de interferência, um fator limitante para determinar se um sinal pode ser usado para transmissão é o ruído. Se todo o ruído for eliminado do sistema, é requerido uma potência infinitesimal de transmissão, pois permite que a amplificação no receptor seja ilimitada. Quando existe ruído a amplificação tem que ser limitada, pois o ruído e o sinal são afetados, na mesma proporção.

Existem várias fontes de ruído: (1) o ruído interno gerado pelo receptor do sistema, (2) ruído natural ( atmosférico e galáctico), (3) ruído não intencional irradiado pelo homem e (4) ruído irradiado intencionalmente (*jamming*). Dependendo da frequência, tempo e localização uma das fontes de ruído pode ser dominante e necessita ser considerada.

A relação sinal-ruído ( $s/n$ ) pode ser expressada em decibéis, como a relação entre  $s$  que representa a potência do sinal em watts e  $n$  a média da potência de ruído em watts.

$$10 \log (s/n) = 10 \log s - 10 \log n = S - N \quad (5.15)$$

### 5.3 Cálculo de Propagação

Para os cálculos devem-se considerar uma série de fatores, entre eles a distância entre transmissor e receptor. Em função disto, pode-se considerar três tipos de cálculos: (1) para distâncias menores de 4000 km, (2) para distâncias entre 4000 e 9000km e (3) para distâncias maiores de 9000 km.

A altura média da camada  $F_2$  é de 350 a 450 km, a qual, corresponde a um salto de distância de aproximadamente 4000km. Esta distância proporciona uma linha divisória conveniente entre a distância longa e a distância intermediária de transmissão. Por meio de diferentes procedimentos e fórmulas matemáticas é possível calcular a FOT para cada hora do dia. No caso de 4000 a 9000 km devem considerar-se adicionalmente: perdas por reflexão da superfície terrestre, a complexidade de caminhos deve ser considerada em detalhe, e o MUF é determinado em pontos de controle ou áreas em relação ao ponto médio do caminho. Para distâncias maiores de 9000 km a estrutura do eco chega a ser muito complexa e cada caminho possível (*chordal*, *complex*, *ducted*) é relativamente importante.

### 5.4 Programas de Predição Ionosférica

Existe uma série de programas que fazem predição ionosférica, considerando as localizações do transmissor e receptor, o dia, a hora e alguns parâmetros como: fluxo solar, número de manchas solares, ângulo de radiação da antena, altura virtual de reflexão, etc. Estes programas geralmente apresentam como saída valores do MUF, FOT e LUF em escala de tempo universal (UT).

Para fazer comparações dos resultados em nosso trabalho serão considerados o Ham Companion, VOACAP, ICEPAC e IPS. Para efeitos de cálculos vamos escolher dois



dias de nossa predição do TEC (16 de março e 18 de março de 2002), com um fluxo solar em 10.7cm de 185 (dia 16) e 178 (dia 18), número de manchas solares (*Sunspot number*) de 124 (dia 16) e 136 (dia 18). Estes valores usados foram obtidos na internet no site [http://www.sec.noaa.gov/ftpdir/indices/old\\_indices/2002Q1\\_DSD.txt](http://www.sec.noaa.gov/ftpdir/indices/old_indices/2002Q1_DSD.txt). O transmissor estará em São José dos Campos ( $\phi = 23^{\circ}13' S$ ,  $\lambda = 45^{\circ}51' W$ ), Brasil e o receptor no porto do Callao ( $\phi = 12^{\circ}03' S$ ,  $\lambda = 77^{\circ}10' W$ ), Perú.

Estes dados serão introduzidos nos diferentes softwares e em capítulos posteriores se analisará as diferenças quando são usadas informações atualizadas do TEC obtidos do sistema GPS.

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam os resultado do programa Ham Companion (HC) para o mesmo dia 16 de março de 2002, considerando dois parâmetros de entrada (valores reais medidos) diferentes: fluxo solar e o número de manchas solares. No software existe uma relação entre ambos, que nem sempre concorda com os valores medidos, o qual obriga ao usuário a escolher um dos parâmetro de ingresso para fazer a predição. Para nosso trabalho vamos considerar as duas predições HC1 (baseado em fluxo solar) e HC2 (baseado no número de manchas solares) para ser comparadas posteriormente no Capítulo 7.

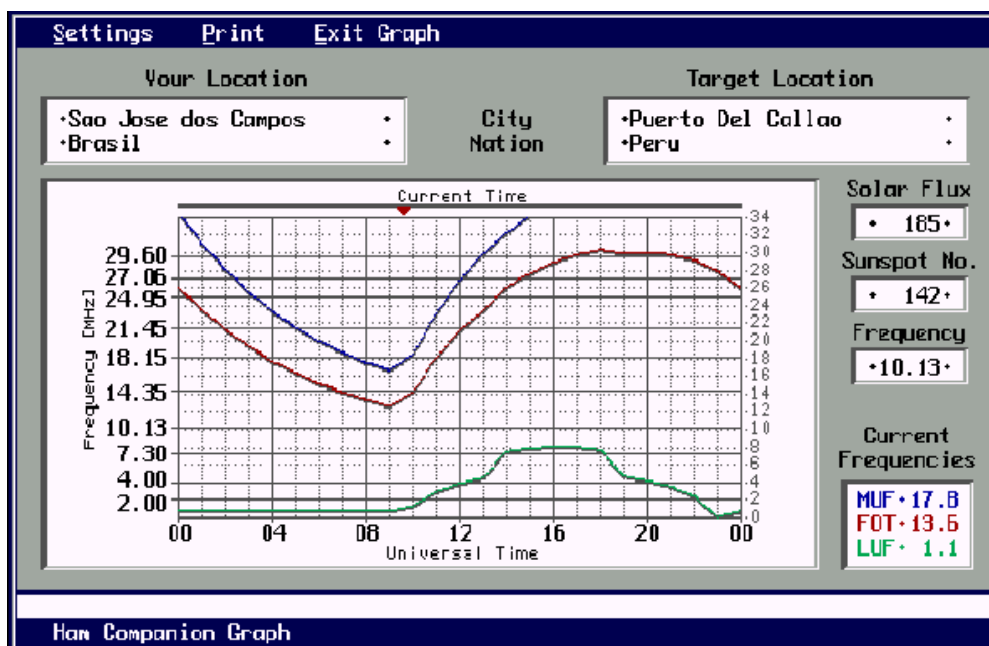


FIGURA5.2 - Predição de frequências HF do Ham Companion (16-03-2002) com fluxo solar 185.

FONTE: Ham Companion (1982 a 1989).

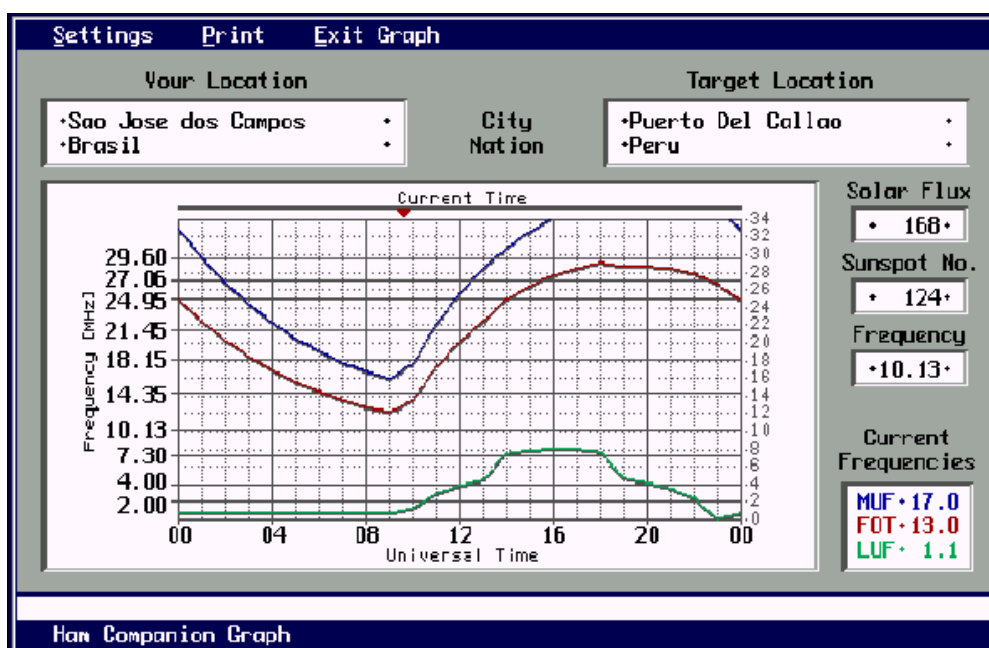


FIGURA 5.3 - Predição de frequências HF do Ham Companion (16-03-2002) com sunspot number 124.

FONTE: Ham Companion (1982 a 1989).

Nas Figuras 5.4 e 5.5 são mostrados também previsões do HC para o dia 18 (terceiro dia da previsão), com parâmetros de entradas diferentes, fluxo solar e número de manchas solares respectivamente. Nestes gráficos pode-se observar, que quase não existem diferenças ao ingressar com qualquer um dos parâmetros, pois o valor de fluxo solar e manchas solares (medidos) correspondiam ao assumido pelo software.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 são mostradas as previsões do software VOACAP, para o dia 16 e 18 de março de 2002, o qual usa como parâmetro de entrada o número de manchas solares suavizado (*Smoothed Sunspot Number, SSN*), cujo valor para o mês de março é 110, os valores da FOT para cada dia foram praticamente os mesmos.

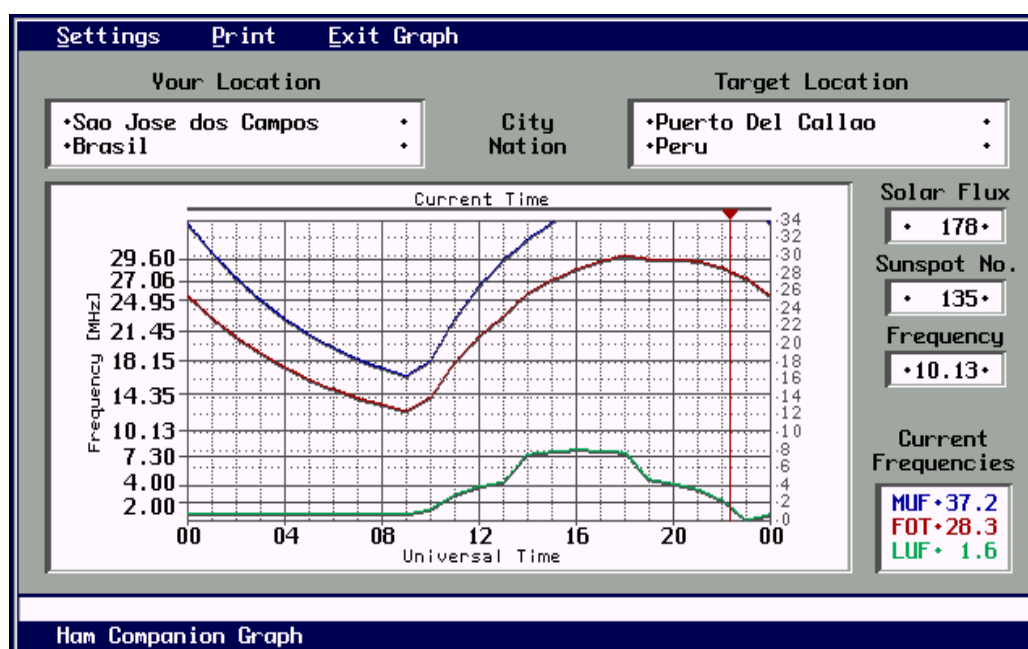


FIGURA 5.4 - Predição de frequências HF do Ham Companion (18-03-2002) com fluxo solar 178.

FONTE: Ham Companion (1982 a 1989).

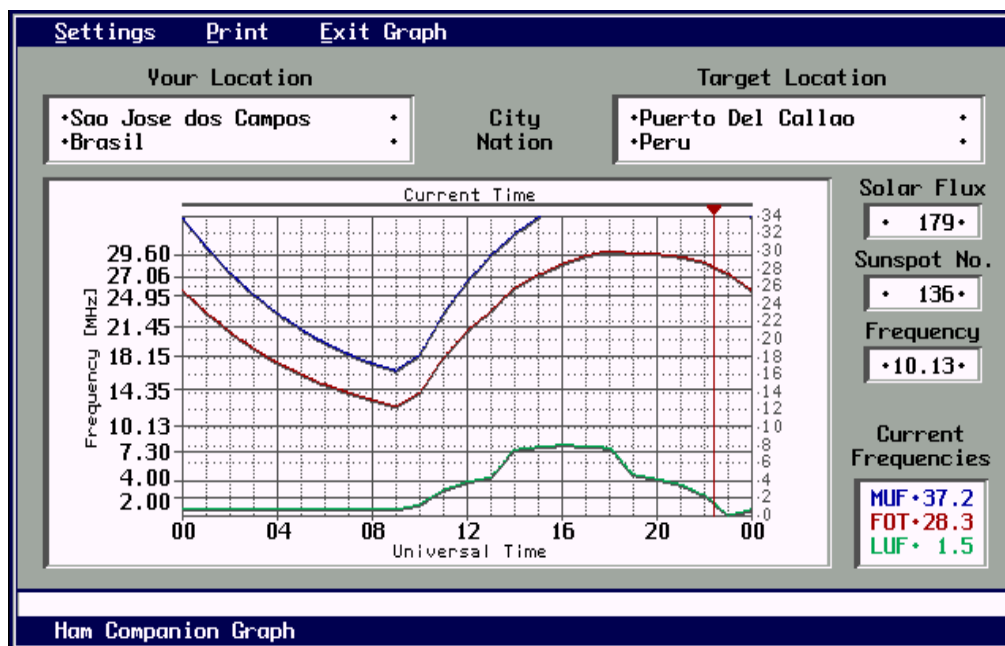


FIGURA 5.5 - Predição de frequências HF do Ham Companion (18-03-2002) SSN de 136.

FONTE: Ham Companion (1982 a 1989).

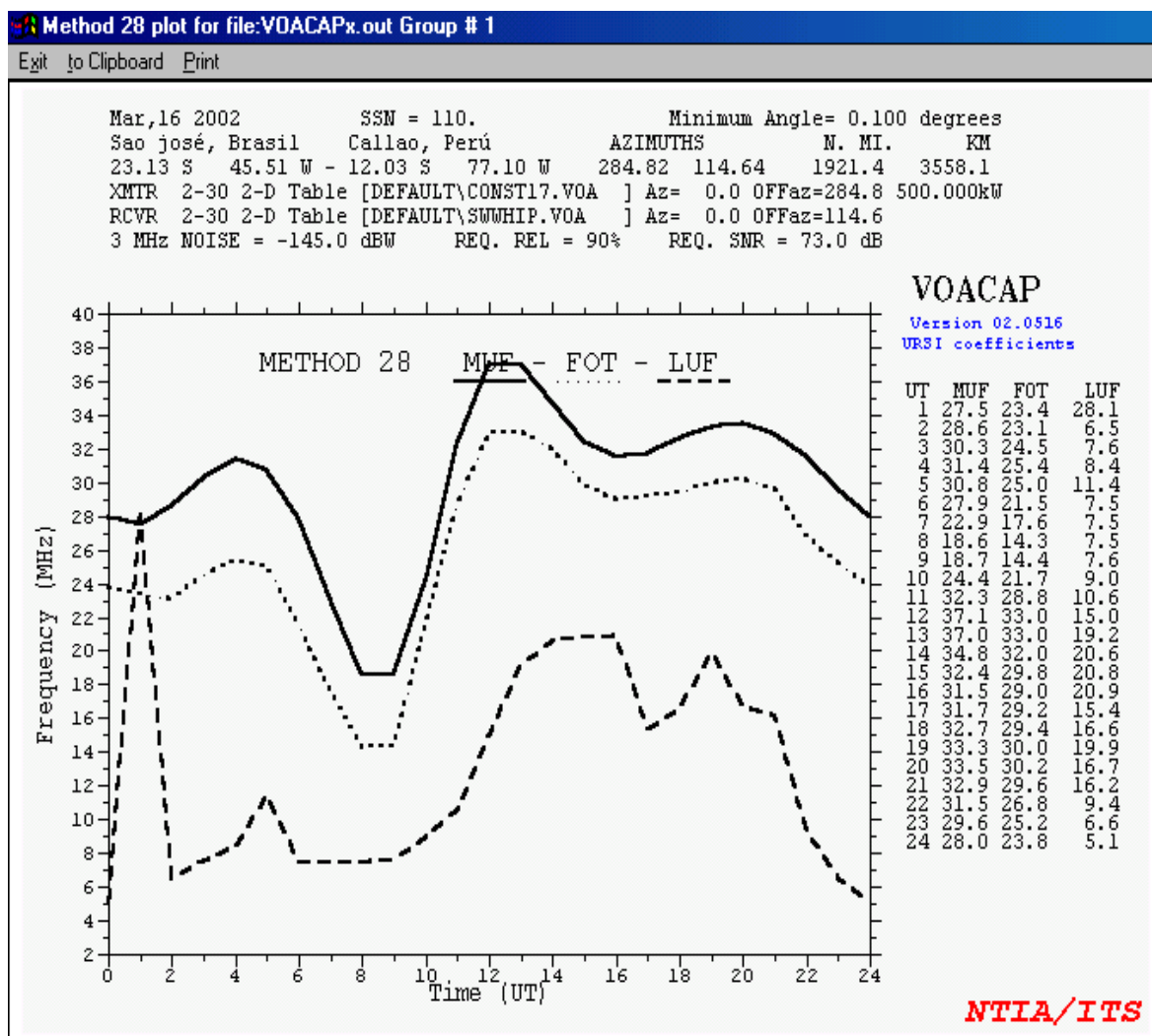


FIGURA 5.6 - Predição de frequências HF do software VOACAP (16-03-2002) com SSN 110.

FONTE: VOACAP (2002).

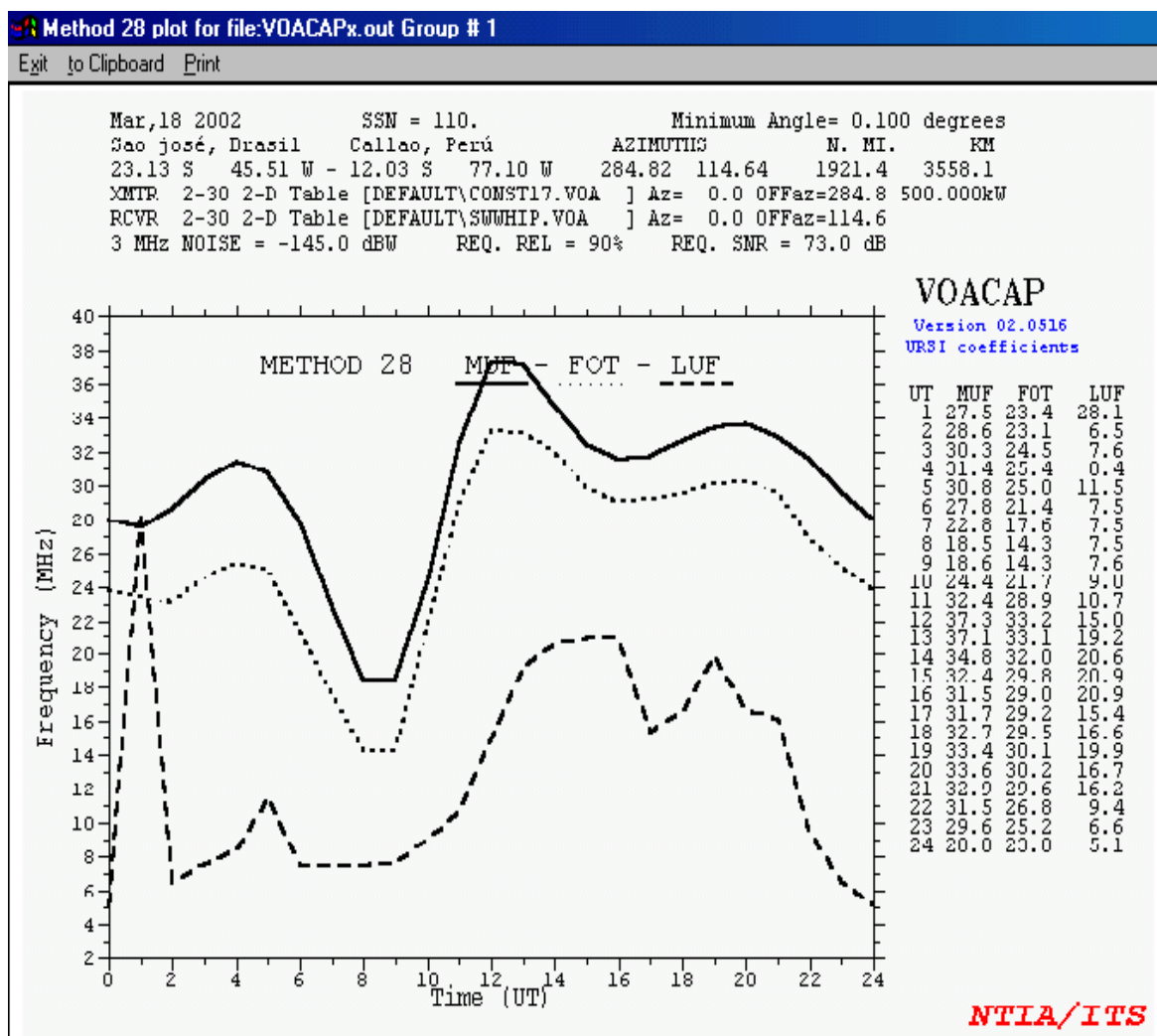


FIGURA 5.7 - Predição de frequências HF do VOACAP (18-03-2002) com SSN 110.  
 FONTE: VOACAP (2002).

Nas Figuras 5.8 e 5.9 são apresentadas as predições do software ICEPAC para os dias 16 e 18 de março de 2002, com SSN de 110. Nos gráficos pode-se observar que quase não existe diferença.

Nas Figuras 5.10 e 5.11 são mostradas as predições do IPS *on line*, para os dias 15 e 16 de março com 176 e 185 de fluxo solar respectivamente. Neste programa pode-se observar diferenças entre as predições para dias consecutivos.

No Capítulo 7 será dado um gráfico com todas as predições dos diferentes software e nossa predição obtida através do GIM GPS.

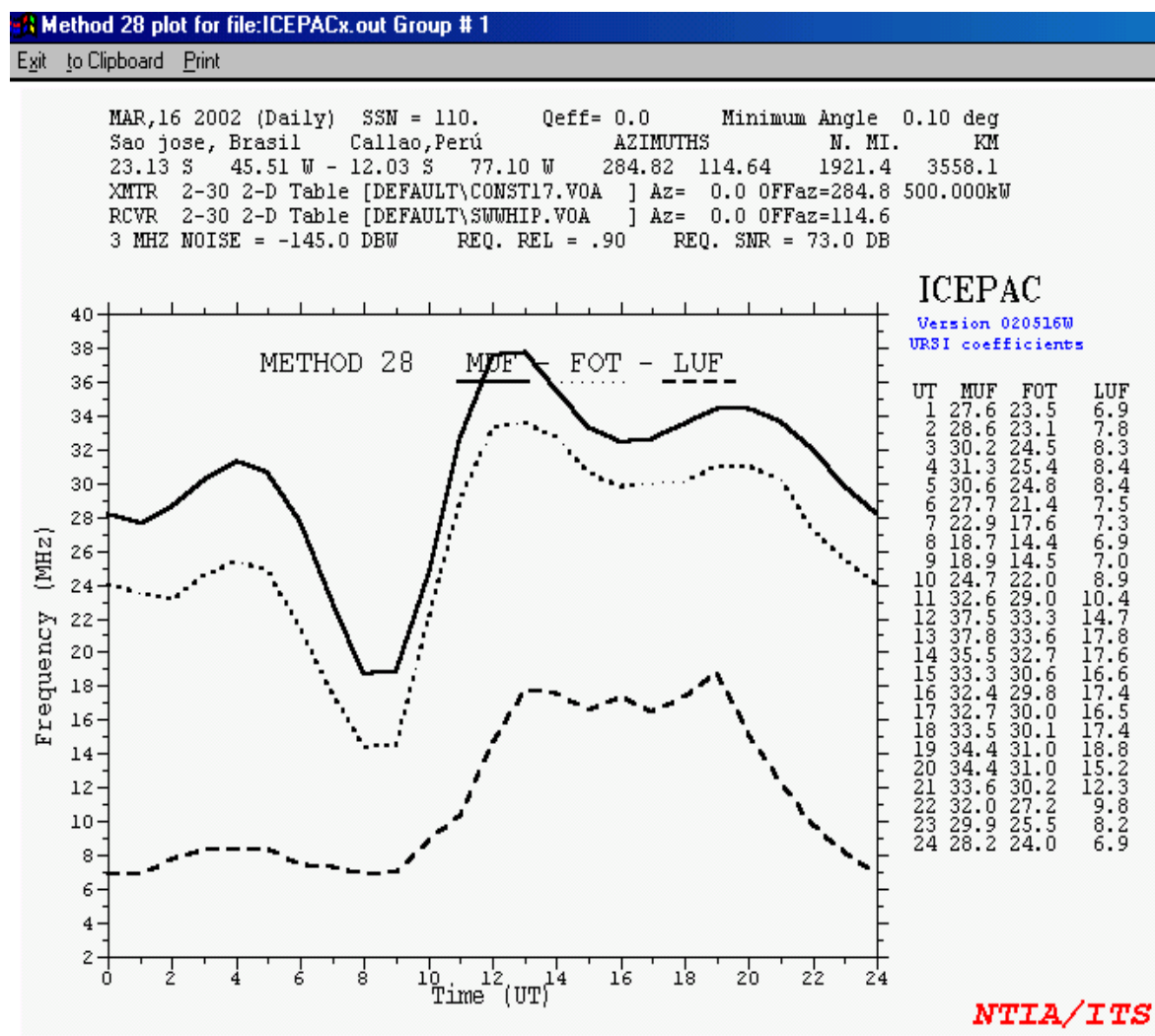


FIGURA 5.8 - Predição de frequências HF do ICEPAC (16-03-2002) com SSN 110.

FONTE: ICEPAC. (2002)



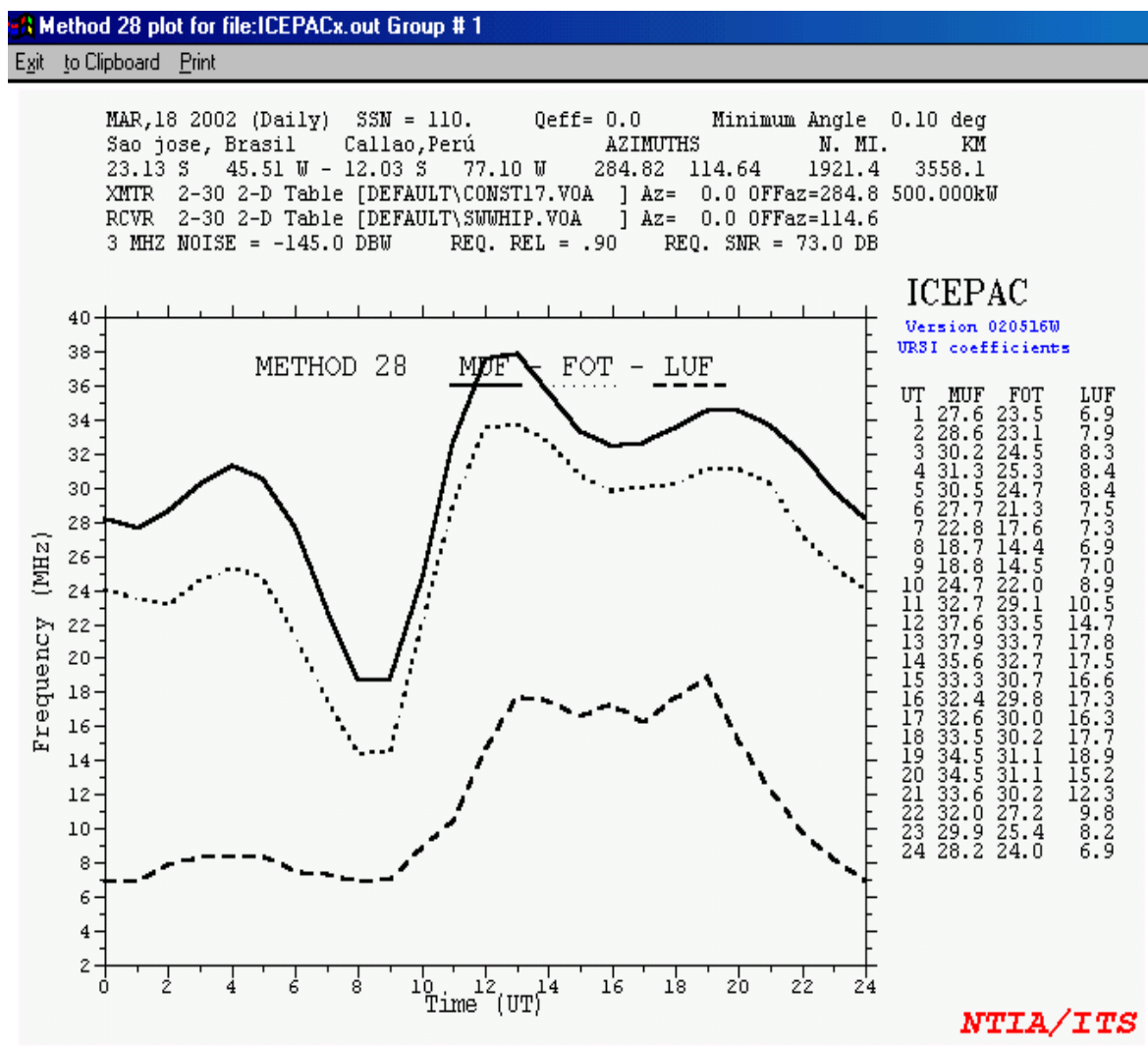


FIGURA 5.9 - Predição de frequências HF do ICEPAC (18-03-2002) com SSN 110.

FONTE: ICEPAC. (2002)



# IPS On Line GRAFEX HF PREDICTIONS

```

IPS GRAFEX HF FREQUENCY PREDICTIONS                                ADDRESS NO. 1234
=====
Circuit: Sao Jose, BCallao, Per                                     Date: 15 March, 2002          T-index: 126
Bearings: 285 115                                                  Distance: 3558 km
First Mode |-----F r e q u e n c y (MHz)-----| Second Mode
1F 0-6 1E 0 1 5 10 15 20 25 30 35 40 2F 11-23 2E 1
UT OWF EMUF ALF |...|...| ...|...| ...|...| ...|...| OWF EMUF ALF UT
00 23.5 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMMMMMMFF FFF% % % % . . . . 15.9 2.7 .0 00
01 24.3 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMMMMMMFFF FFFF% % % % . . . . 15.3 2.7 .0 01
02 25.0 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMMMMMMFF FFFF% % % % % . . . . . 16.1 2.7 .0 02
03 27.5 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMMMMMMMMM MFFFFFFF% % % % . . . . . 17.6 2.7 .0 03
04 29.9 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMMMMMMMMM MMMFFFFFFF% % % % % . . . . 19.9 2.7 .0 04
05 29.8 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMMMMMMMMM MMMMF% % % % % . . . . . 21.1 2.7 .0 05
06 24.3 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMMMMMMMMM MMMF% % % % % . . . . . 18.8 2.7 .0 06
07 18.6 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMMMMMMM% % % % . . . . . 14.5 2.7 .0 07
08 14.7 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMM% % % % . . . . . 11.5 2.7 .0 08
09 12.8 .0 .0 XXMMMMMMMM MMM% % % . . . . . 10.8 2.7 .0 09
10 14.9 .0 .0 MMMMMMMMMMM MMMF% % % % . . . . 10.5 .0 6.6 10
11 26.0 .0 10.1 AS MMMMMMMMFFF FFFF% % % % . . . . 14.8 9.8 8.9 11
12 32.6 .0 12.1 A SSXMMMMMMMM MMMMMFFFFFF F% % % % . . . . 23.0 14.4 10.0 12
13 34.2 .0 13.3 ASSXXXXMMM MMMMMFFFFFF FFFF% % % % . . . . 23.3 16.7 10.7 13
14 32.8 .0 14.0 SSXXXXXXMM MMMMMFFFFFF F% % % % . . . . 22.6 18.2 11.2 14
15 32.5 .0 14.4 SSSXXXXXXM MMMMMFFFFFF F% % % . . . . 23.3 19.2 11.4 15
16 31.4 .0 14.6 ASSXXXXXXM MMMMMFFFFFF F% % % . . . . 22.2 19.4 11.5 16
17 30.1 .0 14.5 ASSXXXXXXM MFFFFFFF% % . . . . 20.5 19.1 11.5 17
18 29.5 .0 14.2 SSSXXXXXXM MFFFFFFF% % . . . . 19.9 18.3 11.3 18
19 30.5 .0 13.5 ASSXXXXMMM MFFFFFFF% % % . . . . 19.8 17.0 11.0 19
20 30.9 .0 12.5 SSXMMMMMMMM MFFFFFFF% % % % . . . . 20.1 15.0 10.3 20
21 29.9 .0 10.8 S XMMMMMMMM MFFFFFFF% % % . . . . 20.0 11.4 9.3 21
22 27.6 .0 6.9 MMMM MMMMMMMMMMM MFFFFFFF% % % . . . . 19.0 .0 7.5 22
23 25.3 .0 .0 XXMMMMMMMM MMMMMMMMMMM FFFF% % % % . . . . . 17.7 2.7 .0
23
UT OWF EMUF ALF |...|...| ...|...| ...|...| ...|...| OWF EMUF ALF UT
=====
|. USABLE LESS THAN 50% OF DAYS| % USABLE (50%-90%) OF DAYS | |
|B BOTH E&F MODES 90% OF DAYS |M MIXED FIRST AND SECOND F MODES|
|F FIRST F MODE ONLY |E E LAYER PROPN | P 90%E & 50-90%F|
|S SECOND MODES ONLY |A HIGH ABSORPTION | X COMPLEX MODES|
(c) 30-May-02 IPS Radio & Space Services, Sydney Australia +61 2 92138000

```

FIGURA5.10 - Predição de freqncias HF do IPS *on line* (15-03-2002) para um fluxo solar de 176.

FONTE: IPS on line(2002)

# IPS On Line GRAFEX HF PREDICTIONS

```

IPS GRAFEX HF FREQUENCY PREDICTIONS                                ADDRESS NO. 1234
=====
Circuit: Sao Jose, BCallao, Per          Date: 16 March, 2002      T-index: 135
Bearings: 285 115                        Distance: 3558 km
First Mode                               |-----F r e q u e n c y (MHz)-----|      Second Mode
1F 0-7  1E 0      | 1  5  10      15  20      25  30      35  40      2F 11-23 2E 1
UT  OWF EMUF  ALF  |...|...|  ...|...|  ...|...|  ...|...|  OWF EMUF  ALF
UT
00 24.6  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMMMMMFF  FFFF% % % % . . . . 16.5  2.7  .0 00
01 25.5  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMMMMMFF  FFFF% % % % . . . . 15.9  2.7  .0 01
02 26.0  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMMMMMFF  FFFF% % % % . . . . . 16.7  2.7  .0 02
03 28.6  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMMMMMMM  MFFFFFFF% % % % . . . . 18.1  2.7  .0 03
04 31.1  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMMMMMMM  MMMMFFFFFFF F% % % % % . . . 20.4  2.7  .0 04
05 31.0  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMMMMMMM  MMMMMFFFFFF % % % % % % . . . 21.6  2.7  .0 05
06 25.3  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMMMMMMM  MMMMF% % % % % % . . . . . 19.5  2.7  .0 06
07 19.4  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMMMMMMM% % % % . . . . . 15.1  2.7  .0 07
08 15.5  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMM% % % % . . . . . 11.9  2.7  .0 08
09 13.5  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMM% % % . . . . . 11.2  2.7  .0 09
10 15.6  .0  .0  MMMMMMMMMM  MMMFF% % % . . . . . 10.9  .0  6.7 10
11 27.0  .0 10.1      AS  MMMMMMMMFF  FFFF% % % % . . . . 15.3  9.8  9.0 11
12 33.7  .0 12.1      SSXXXXMMM  MMMMMFFFF  FFF% % % % . . . 23.7 14.5 10.2 12
13 35.4  .0 13.3      ASSXXXXMM  MMMMMFFFF  FFFF% % % % . . . 24.0 16.9 10.9
13
14 34.0  .0 14.0      SSXXXXXMM  MMMMMFFFF  FFF% % % % . . . 23.3 18.4 11.3 14
15 33.6  .0 14.4      ASSXXXXXM  MMMMMFFFF  FFF% % % . . . 24.1 19.3 11.6 15
16 32.5  .0 14.6      ASSXXXXXM  MMMMFFFFFF  FF% % . . . . 23.0 19.6 11.6 16
17 30.9  .0 14.5      ASSXXXXXM  MMFFFFFFF % % % . . . 21.1 19.2 11.7 17
18 30.3  .0 14.2      ASSXXXXXM  MFFFFFFF % % . . . . 20.4 18.4 11.5 18
19 31.6  .0 13.5      SSXXXXMMM  MMFFFFFFF F% % % . . . 20.3 17.1 11.1 19
20 32.0  .0 12.5      ASXXXXMMM  MMFFFFFFF F% % % . . . 20.8 15.1 10.5 20
21 30.9  .0 10.8      S  XMMMMMMM  MMFFFFFFF % % % . . . 20.7 11.5  9.4 21
22 28.8  .0  6.9      MMMM  MMMMMMMM  MFFFFFFF% % % . . . . 19.6  .0  7.6 22
23 26.4  .0  .0  XXMMMMMMMM  MMMMMMMMMM  FFFF% % % % . . . . 18.4  2.7  .0 23
UT  OWF EMUF  ALF  |...|...|  ...|...|  ...|...|  ...|...|  OWF EMUF  ALF  UT
=====
|.  USABLE LESS THAN 50% OF DAYS| %  USABLE  (50%-90%) OF DAYS  | |
|B  BOTH E&F MODES 90% OF DAYS  |M  MIXED  FIRST AND SECOND F MODES|
|F  FIRST F MODE ONLY  |E  E LAYER PROPN  | P  90%E &50-90%F|
|S  SECOND MODES ONLY  |A  HIGH ABSORPTION  | X  COMPLEX MODES|
(c) 30-May-02 IPS Radio & Space Services, Sydney  Australia +61 2 92138000

```

FIGURA 5.11 - Predição de frequncias HF do IPS *on line* (16-03-2002) para um fluxo solar de 185.

FONTE: IPS *on line*.(2002)

## CAPÍTULO 6

### ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

#### 6.1 Introdução

A estimação de parâmetros procura determinar os futuros parâmetros de um processo qualquer a partir de dados observados ao longo de um determinado período de tempo. O início da técnica de estimação de parâmetros foi com Kolmogorov (1941) foi em 1941 e Norbert Wiener (1949) em 1942. O objetivo era prever a posição de aviões inimigos para poder derrubá-los. A partir disto, se desenvolveram uma série de métodos como: Processos auto-regressivos, mínimos quadrados, filtro de Kalman, etc.

O método que usaremos para fazer nossa predição dos mapas globais ionosférico do conteúdo total de elétrons (TEC), é o método de *Maximum Entropy Method* (MEM) ou Método de Máxima Entropia (Kantor e Trivedi., 1977e 1980), baseado em um processo auto-regressivo (AR), o qual tem uma série de aplicações em espectro de potência, espectro cruzado, cálculo da função auto-correlação, predição linear, filtragem de dados, transmissão de sinais e cancelamento de ruído.

Um estudo completo do MEM envolve campos diversos como entropia, teoria linear de predição de Wiener, matrizes positivas definidas, processos auto-regressivos, matrizes Toeplitz, espaços de Hilbert e transformada Z, além de um conhecimento de processos estocásticos.

Este método se apresenta como uma ferramenta útil para poder estimar parâmetros que têm muita variação, como é nosso caso em que os coeficientes não seguem um padrão determinado.

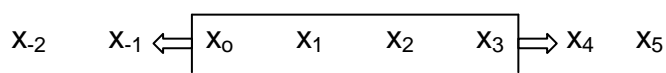
## 6.2 Processos Auto-Regresivos (AR)

Um processo auto-regressivo é baseado na informação dos eventos anteriores, que proporcionam dados do processo, que são armazenados e processados para obter informação do próximo evento.

Vamos supor um navio deslocando-se no mar. Sua posição em relação a uma direção  $x$  em intervalos fixos de tempo, gera uma série de tempo  $(x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, \dots)$ . Se a velocidade for constante é muito fácil determinar a próxima posição, a partir de dois valores anteriores. Se o navio tiver uma aceleração constante serão necessários três valores para fazer a predição de sua posição, indicada por:

$$\hat{x}_3 = 3x_2 - 3x_1 + x_0 \quad (6.1)$$

Mesmo que a velocidade ou aceleração não sejam constantes, a posição pode ser prevista aproximadamente usando os 3 pontos anteriores. Neste caso estaríamos usando um filtro preditor com três pontos ou coeficientes. Este número de coeficientes na realidade pode ser qualquer, ou seja, o ajuste dependerá de quanta informação anterior disponhamos, qual será a dimensão da amostra que queremos processar para obter o próximo ponto e da previsibilidade da série. Este processo também pode ser usado para determinar um ponto anterior, como é apresentado no diagrama abaixo.



Outra maneira de entender um processo auto-regressivo é através de uma expansão em série de Taylor no ponto  $x$  ( $t = 0$ ) de uma função  $x(t)$ , onde pode-se usar valores anteriores de  $t = -1, -2, -3, \dots$  para estimar as derivadas em  $t = 0$ . A primeira derivada seria dada pela diferença  $x_0 - x_{-1}$ . A segunda derivada vai depender dos três últimos pontos, a terceira derivada dos quatro últimos pontos, etc. A expansão em série de Taylor para calcular o valor  $x_1$ , daria a estimativa de  $x_1$  em termos de uma função

linear dos pontos anteriores. Se a série for truncada em N-1 termos teremos (Kantor e Trivedi, 1977):

$$\hat{x}_1 = \sum_{k=0}^N \frac{x^{(k)}(0)}{k!} = \sum_{k=0}^N g_k x_{-k} \quad (6.2)$$

Com isto tentamos mostrar que para prever cada ponto futuro como uma combinação linear dos pontos anteriores é o mesmo que expandir a função em série de Taylor, truncada na n-ésima derivada, correspondendo à ordem do filtro preditor.

Qualquer processo estacionário, no qual a média é constante e, em particular nula ( $E x_j = 0$ ) e a auto-correlação ( $E x_j x_k = \phi(j-k)$ ), é estacionário (Yule, 1927). A sequência  $x_t$  pode ser expressada por:

$$x_t = \sum_{k=1}^{\infty} g_k x_{t-k} + \varepsilon_k \quad (6.3)$$

onde  $\varepsilon_k$  é o resíduo. Isto implica que toda série resultante de um processo estacionário, pode ser decomposta numa parte previsível ou determinística e numa parte aleatória.

Para prever nosso ponto previsto  $\hat{x}_t$ , em função linear dos M pontos do passado, devemos otimizar os coeficientes  $g_k$ . Vamos estabelecer que a esperança do quadrado da diferença entre o predito e o real, ou erro quadrático médio da predição seja mínimo:

$$E^2 = E(x_t - \hat{x}_t)^2 = E(x_t x_t) - 2 \sum g_k E(x_t x_{t-k}) + \sum \sum g_k g_l E(x_{t-k} x_{t-l}) \quad (6.4)$$

$\Downarrow$   
 $\phi(0)$

$\Downarrow$   
 $\phi(k)$

$\Downarrow$   
 $\phi(k-l)$

O mínimo pode ser encontrado igualando a zero as derivadas parciais em relação a cada coeficiente,  $g_k$ , ou seja:

$$\partial E^2 / \partial g_m = 0 \quad (m=1,2,3,\dots,M) \quad (6.5)$$

Encontramos assim um sistema de equações chamado de Wiener- Hopf:

$$\sum_{k=1}^M g_k \phi(k-m) = \phi(m) \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (6.6)$$

Conhecendo a auto-correlação para diversos “lags” podemos resolver o sistema e obter os coeficientes  $g_k$ .

Conhecidos os  $g_k$ , que minimizam o erro, podemos calcular este erro mínimo quadrático, que chamaremos de potência do erro de previsão,  $P_M$ . Substituindo o sistema de Wiener- Hopf na expressão do erro temos:

$$P_M = E^2_{\text{MIN}} = \phi(0) - \sum_{k=1}^M g_k \phi(k) \quad (6.7)$$

Para uma visão melhor das equações usaremos vetores e matrizes, pois simplifica a notação, permitindo escrever as equações de forma mais compacta. Construindo o vetor “filtro do erro de predição”, de dimensão  $M+1$

$$\Gamma_M = \begin{pmatrix} \Gamma_0 \\ \Gamma_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Gamma_M \end{pmatrix} \quad \text{onde} \quad \begin{cases} \Gamma_0 = 1 \\ \Gamma_k = -g_k \quad k = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (6.8)$$

a matriz de auto-correlação é composta dos  $\phi(k)$ , e é simétrica em relação à diagonal:

$$\Phi_M = \begin{pmatrix} \phi(0) & \phi(1) & \dots & \phi(M) \\ \phi(1) & \phi(0) & \dots & \phi(M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(M) & \phi(M-1) & \dots & \phi(0) \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

As matrizes deste tipo são chamadas matrizes Toeplitz. Finalmente temos o “vetor potência do erro da predição”, dado por:

$$\mathbf{P}_M = \begin{pmatrix} P_{0M} \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

Substituindo os novos coeficientes  $\Gamma_k$ , no sistema de Wiener-Hopf na fórmula de  $P_M$ , obtemos:

$$\sum_{k=0}^M \Gamma_k \phi(k-m) = 0$$

$$\sum_{k=0}^M \Gamma_k \phi(k) = P_M \quad (6.11)$$

O sistema pode ser escrito na forma matricial

$$\begin{pmatrix} \phi(0) & \phi(1) & \dots & \phi(M) \\ \phi(1) & \phi(0) & \dots & \phi(M-1) \\ \vdots & \vdots & \cdot & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdot & \vdots \\ \phi(M) & \phi(M-1) & \dots & \phi(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma_0 \\ \Gamma_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Gamma_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{0M} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

o qual pode ser expresso de forma compacta:

$$\Phi_M \Gamma_M = P_M \quad (6.13)$$

Isto permite encontrar os coeficientes do erro de previsão e o valor da potência do erro de predição, sendo conhecidas as auto-correlações. O cálculo das equações cuja matriz é Toeplitz, pode ser bastante simplificado usando o método de recursão de Levinson. Este

método utiliza uma previsão para frente e para atrás, calculando sucessivamente  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \dots, \Gamma_{M+1}$  sem a necessidade da inversão da matriz  $\Phi_M$ . A potência do erro  $P_M$  vai decrescer a cada ordem sucessiva.

### 6.3 Cálculo dos Coeficientes GIM

Para calcular nosso GIM, usamos a representação do TEC global proposta por Schaer et al., (1995). Esta alternativa é uma expansão em harmônicos esféricos (Equação 4.4). Os coeficiente  $\check{C}_{nm}$  e  $\check{S}_{nm}$  são proporcionados pelo CODE (Figura 6.1) para cada dia, e são válidas para um período de duas horas , gerando um total de 12 por dia.

Para calcular a expressão 4.4, nos baseamos na subrotina proporcionada pelo CODE, Comunicação pessoal (Schaer, 2002) e programas do *Numerical Recipes in Fortran*, (Press et al., 1992), com um número de grau igual a 15, ou seja que trabalhamos com 256 coeficientes para gerar a matriz 71 x 73 (latitude, longitude) que representa todo o mundo. O programa Kantor-Dulanto (PKD) foi desenvolvido em *Interactive Data Language* (IDL 5.3) pela facilidade de recursos que ele proporciona. O programa completo é apresentado no anexo B.

A matriz gerada 71 x 73 é uma representação global do TEC em 0,1TECU ( $10^{15}$  elétrons/m<sup>2</sup>) desde uma latitude de 87.5°N até 87.5°S, de 2.5° em 2.5° e desde uma longitude 180°W até 180°E, de 5° em 5°.

Na Figura 6.1 apresentamos um trecho do arquivo de coeficientes obtidos da CODE pela Internet para o dia 15 de março de 2002, para o primeiro período compreendido entre 00:00 a 02:00 UT. Por dia são gerados 12 destes arquivos e são armazenados juntos, no mesmo formato.

Em nossa predição usamos o método de máxima entropia, tomando como base de dados 30 dias para cada período específico de duas horas (a influência horária é marcante), pois é um período que vai compreender 1 dia solar (27 dias) e dois ciclos lunares. Este



pode ser o menor lapso do tempo em que esperamos ter um comportamento com alguma tendência, pois o próximo período seria analisar 1 ano ou 11 anos, que equivale ao período de rotação da Terra e a um ciclo solar.

O número de coeficientes do filtro que usamos para a predição foi 15, que representa à metade de nossa base de dados e foi a mesma escolha que faz Schaer (1997), que também considerou a influência que exerce um ciclo lunar 14,77 dias. Isto nos permite ter suficiente informação inicial (anterior) para poder estimar os próximos valores dos coeficientes,

Nas Figuras 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 são apresentados os coeficiente  $C_{00}$ ,  $C_{11}$ ,  $S_{22}$  (Para diferenciar no arquivo este coeficiente do  $C_{22}$  é representado com número de ordem negativo) e  $C_{15,15}$  do CODE em diferentes horários para os dias 14 de fevereiro a 15 de março e a predição destes coeficientes para o 16 a 21 de Março de 2002. A linha contínua representa o valor real processado e os asteriscos representam nossa predição considerando o dia 15 de março (último dia da base de dados) para verificar se partem do mesmo ponto.

Os valores previstos dos coeficientes  $\tilde{C}_{nm}$  e  $\tilde{S}_{nm}$  para os próximos seis dias, ou seja os 256 coeficientes que geram o GIM serão analisados e comparados com outros mapas centros internacionais do IGS para o mesmo dia e o mesmo período do dia (cada período é de duas horas) no próximo Capítulo.

CODE'S GLOBAL IONOSPHERE MAPS FOR DAY 074, 2002  
22:47

18-MAR-02

```

-----
MODEL NUMBER / STATION NAME                : 0740-01
MODEL TYPE (1=LOCAL,2=GLOBAL,3=STATION)    : 2
MAXIMUM DEGREE OF SPHERICAL HARMONICS      : 15
MAXIMUM ORDER                             : 15
DEVELOPMENT WITH RESPECT TO
  GEOGRAPHICAL (=1) OR GEOMAGNETIC (=2) FRAME : 2
  MEAN (=1) OR TRUE (=2) POSITION OF THE SUN : 1
MAPPING FUNCTION (0=NONE,1=COSZ,2=MSLM,3=ESM) : 2
HEIGHT OF SINGLE LAYER AND ITS RMS ERROR (KM) : 450.00      0.00
COORDINATES OF EARTH-CENTERED DIPOLE AXIS
  LATITUDE OF NORTH GEOMAGNETIC POLE (DEGREES) : 79.55
  EAST LONGITUDE (DEGREES)                     : -71.92
PERIOD OF VALIDITY
  FROM EPOCH / REFERENCE EPOCH (Y,M,D,H,M,S) : 2002 03 15 00 00 00
  TO EPOCH                                     : 2002 03 15 02 00 00
LATITUDE BAND COVERED
  MINIMUM LATITUDE (DEGREES)                 : -88.66
  MAXIMUM LATITUDE (DEGREES)                 : 86.65
ADDITIONAL INFORMATION
  NUMBER OF CONTRIBUTING STATIONS             : 153
  NUMBER OF CONTRIBUTING SATELLITES           : 27
  ELEVATION CUT-OFF ANGLE (DEGREES)          : 10
  MAXIMUM TEC AND ITS RMS ERROR (TECU)       : 144.91      0.91
COMMENT / WARNING                           :
COEFFICIENTS
DEGREE ORDER VALUE (TECU) RMS (TECU)
  0 0 54.67370497 0.0831
  1 0 1.71368352 0.0747
  1 1 17.33254065 0.0745
  1 -1 17.25376914 0.0730
  2 0 -14.44517686 0.0775
  2 1 -1.62258123 0.0668
  : : : :
  : : : :
  15 15 0.21273672 0.0492
  15 -15 0.11673741 0.0494

```

CODE'S GLOBAL IONOSPHERE MAPS FOR DAY 074, 2002  
22:47

18-MAR-02

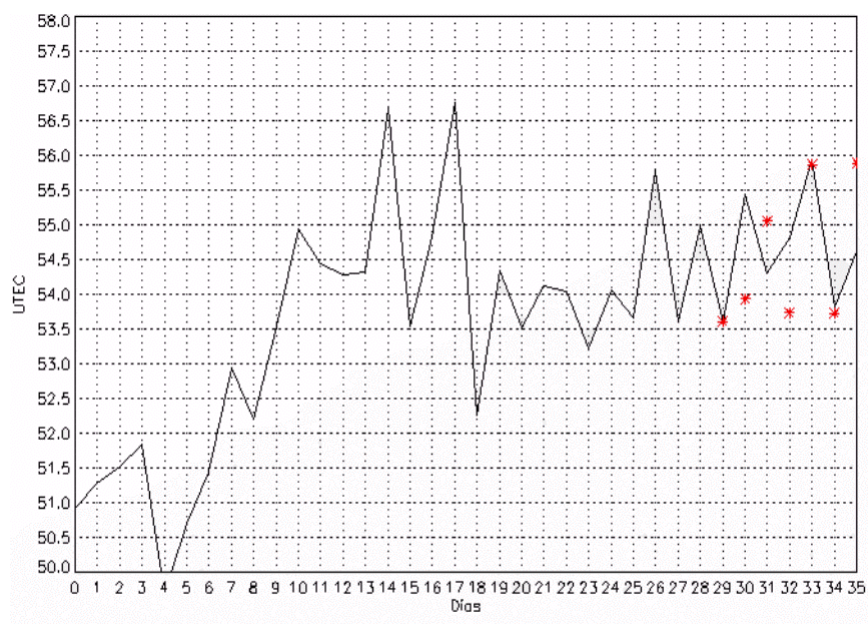
```

-----
MODEL NUMBER / STATION NAME                : 0740-02
MODEL TYPE (1=LOCAL,2=GLOBAL,3=STATION)    : 2
MAXIMUM DEGREE OF SPHERICAL HARMONICS      : 15
MAXIMUM ORDER                             : 15

```

FIGURA 6.1 - Partes do arquivo de coeficientes (15-03-2002) do CODE.

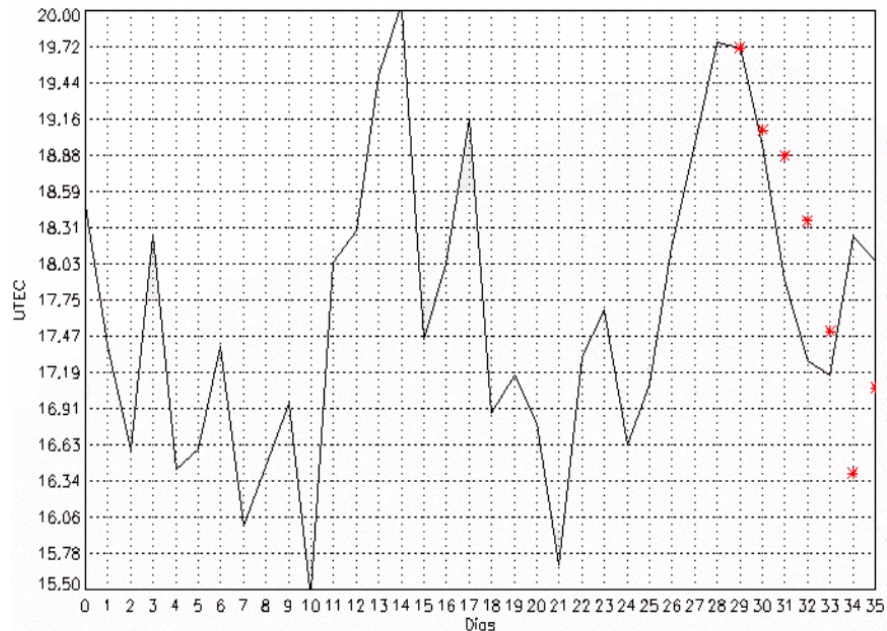
FONTE: CODE (2002).



Coeficientes processados pelo CODE \_\_\_\_\_ Coeficientes previstos PKD \*\*\*

FIGURA 6.2 - Predição do coeficiente  $C_{00}$  (16-03 ao 21-03 de 2002) para 09:00UT.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).



Coeficientes processados pela CODE \_\_\_\_\_ Coeficientes previstos PKD \*\*\*

FIGURA 6.3 - Predição do coeficiente  $C_{11}$  (16-03 ao 21-03 de 2002) para 15:00 UT.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

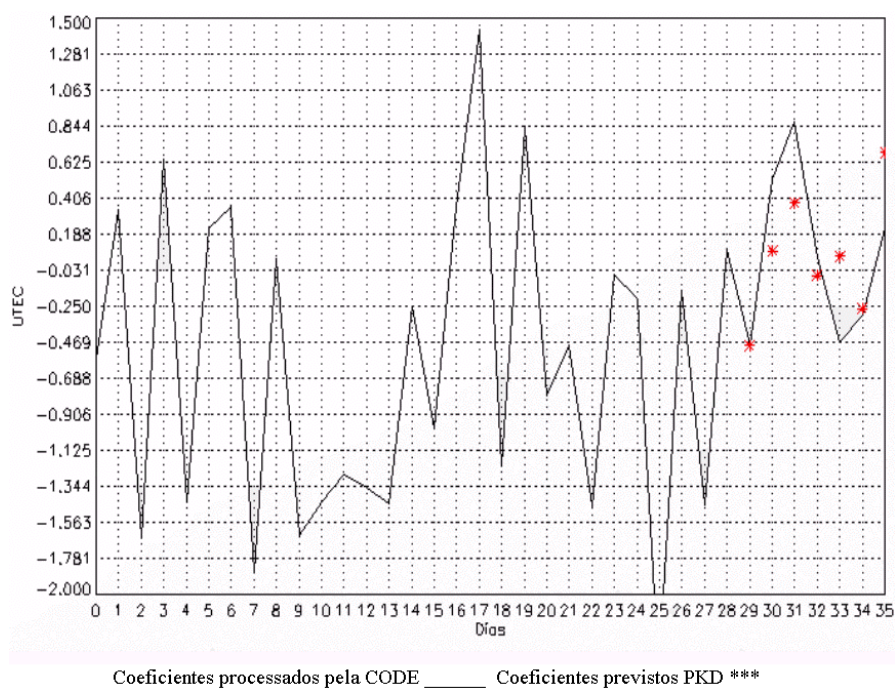


FIGURA 6.4 - Predição do coeficiente  $S_{22}$  (16-03 ao 21-03 de 2002) para 23:00 UT.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

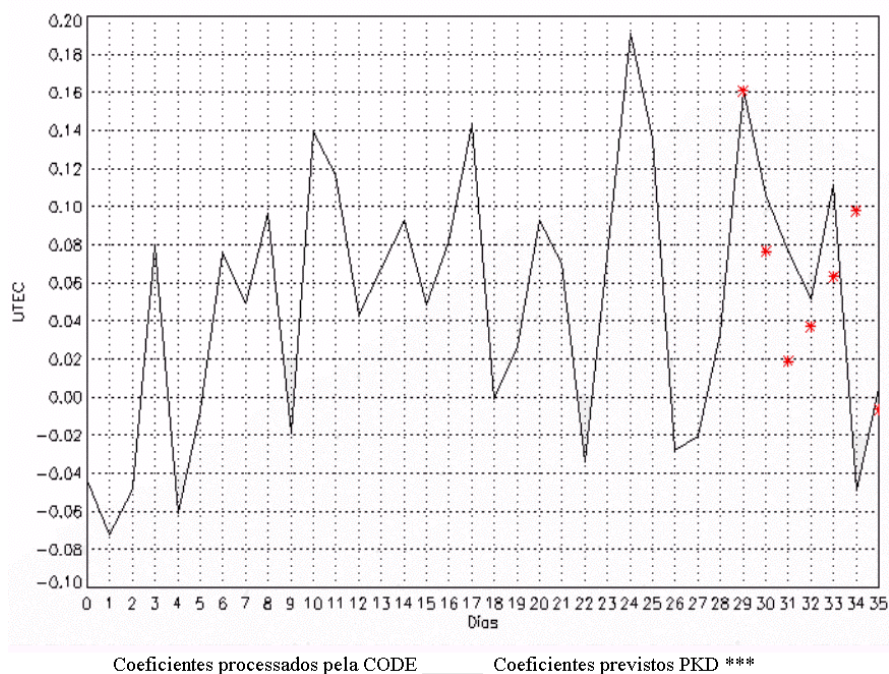


FIGURA 6.5 - Predição do coeficiente  $C_{1515}$  (16-03 ao 21-03 de 2002) para 17:00 UT.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

## CAPÍTULO 7

### ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 7.1 Introdução

Para facilitar a comparação dos resultados, vamos dividir este capítulo em duas partes, na primeira parte serão analisados os mapas GIM produzidos pelo CODE, NRCan, ESA, JPL, UPC e o Programa Kantor-Dulanto e na segunda parte serão analisados os programas de predição de frequência.

#### 7.2 Mapas Globais Ionosféricos

Os GIMs do conteúdo total de elétrons do CODE, NRCan, ESA, JPL e UPC, não são iguais entre si, e apresentam diferenças no valor pontual, mas a forma e o comportamento do TEC são semelhantes, apresentando valores máximos perto da anomalia equatorial em horários próximos às duas da tarde (hora local). Estes mapas globais ionosféricos indicam a variação do TEC em função da hora e da posição geográfica, com um movimento aparente de leste a oeste, contrário à rotação da Terra de oeste a leste.

Nas FIGURAS 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 e 7.6 são apresentados os mapas do CODE, NRCAN, ESA, JPL, UPC e predição do programa Kantor-Dulanto (para efeitos de abreviação usaremos o termo de PKD ao referirmos ao programa desenvolvido nesta tese) para o dia 16 de março de 2002 (primeiro dia da predição) para 01:00 UT. No gráfico do *Geodetic Survey Division (GSD) of Natural Resources Canada* (NRCan) a FIGURA se apresenta com distorção, pois muitos valores não foram registrados, e colocaram o valor aleatório de 9999 como não registrado, o que gerou valores muito altos fora do padrão usado, aparecendo muitas áreas com alto conteúdo fictício de elétrons. Pode-se observar que a predição PKD (FIGURA 7.6), está dentro dos valores



das outras instituições, apresentando os mesmos valores máximos perto da anomalia equatorial e em zonas onde são aproximadamente 14:00 HL.

Para efeitos do trabalho consideramos que os mapas globais ionosféricos produzidos usando os sinais do GPS são aceitáveis, uma validação de GIM-GPS usando dados TOPEX foi apresentado por Hernandez-Pajares et al (2001).

Na FIGURA 7.7 apresentam-se as diferenças que existem entre nossa predição com o mapa gerado pelo códigos da CODE para o dia 15 de março de 2002 a 15:00 Hrs. Pode observar-se que na maior parte do mapa não tem diferença substancial e os valores máximos destas diferencias são  $\leq 20$  UTEC, o qual consideramos adequado pois existem diferenças até de 50 UTEC entre mapas de diferentes centros.

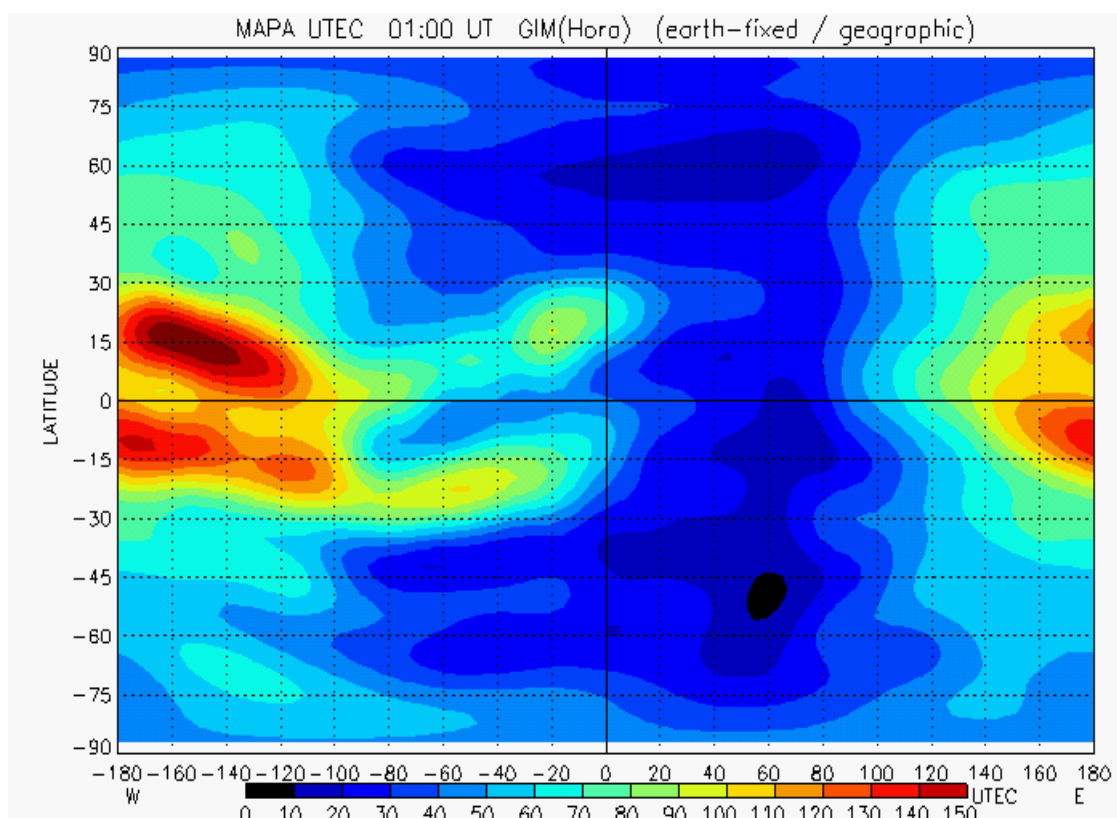


FIGURA 7.1 - Mapa do TEC gerado no PKD a partir dos valores medidos pelo CODE.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

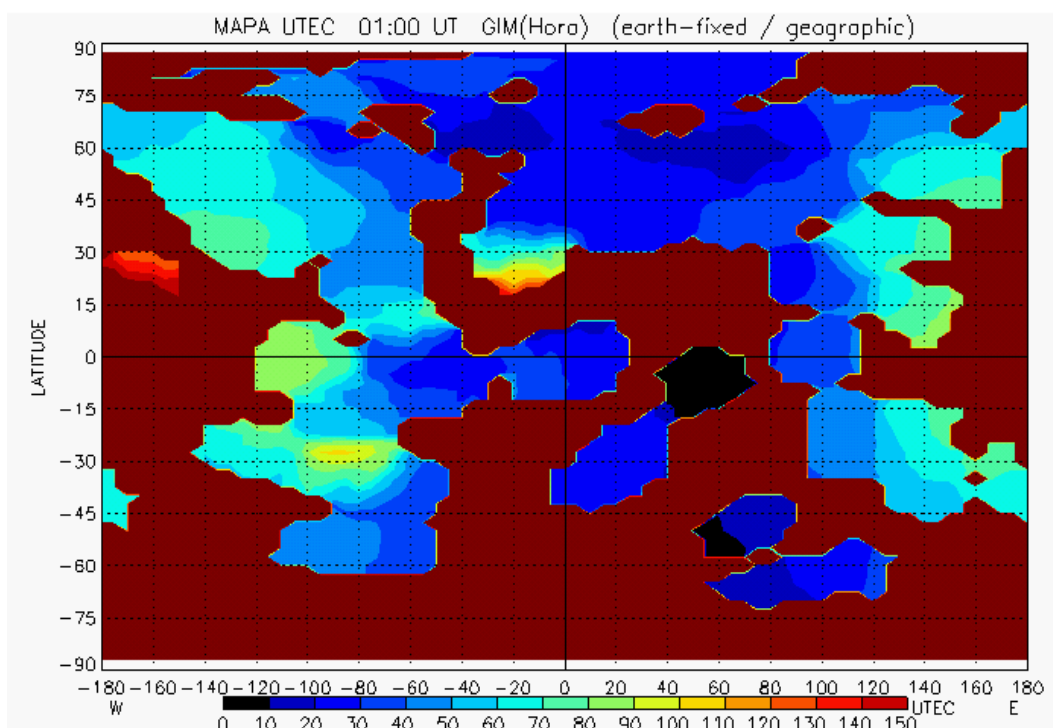


FIGURA 7.2 - Mapa do TEC gerado no PKD a partir dos valores medidos pela NRCan.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

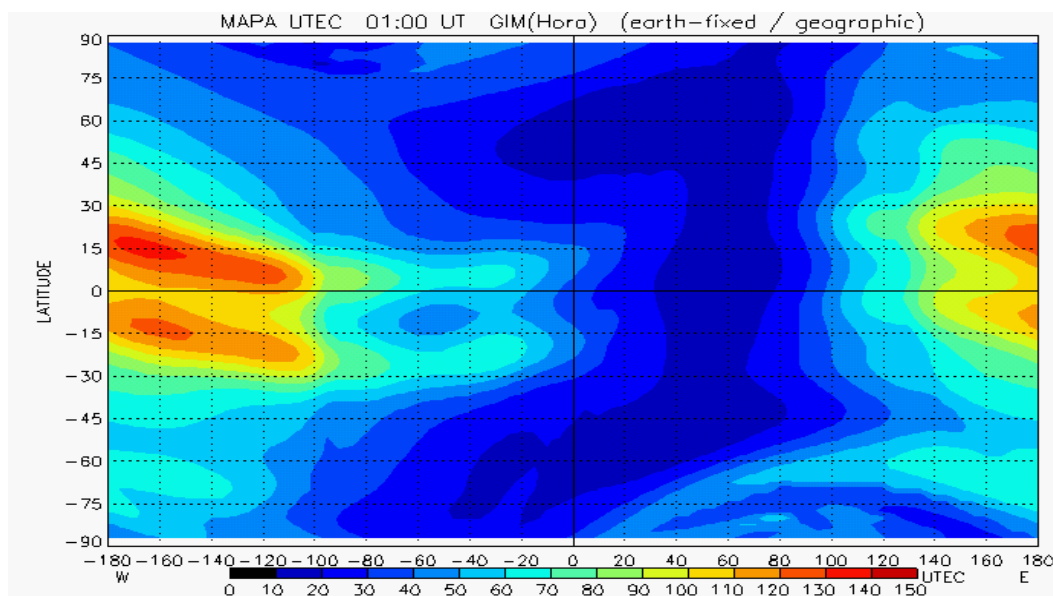


FIGURA 7.3 - Mapa do TEC gerado no PKD a partir dos valores medidos pela ESA.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

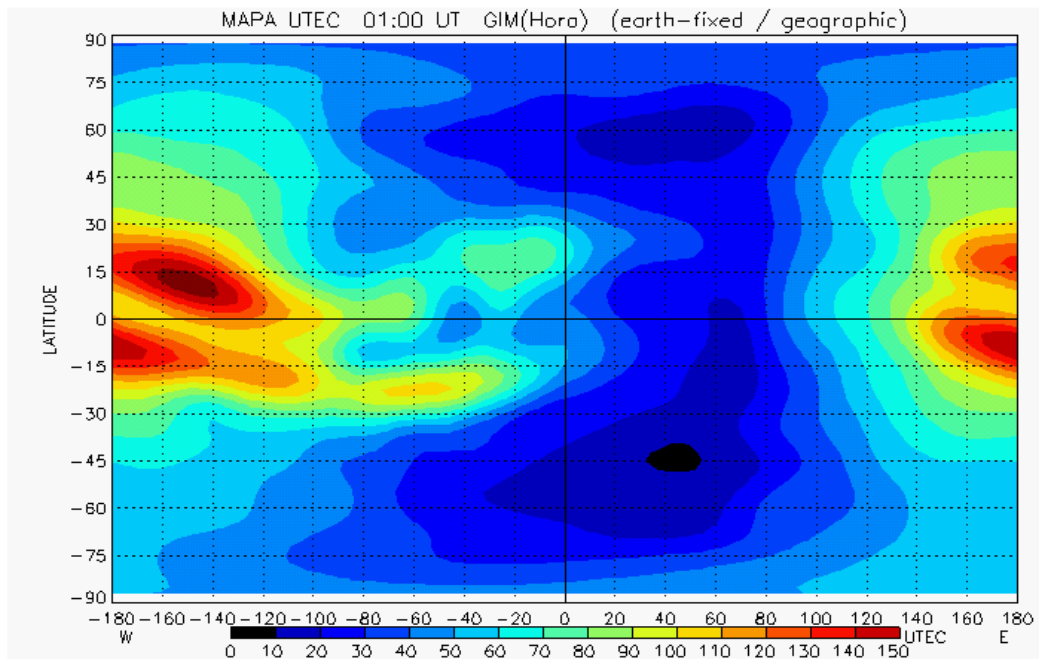


FIGURA 7.4 - Mapa do TEC gerado no PKD a partir dos valores medidos pela JPL.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

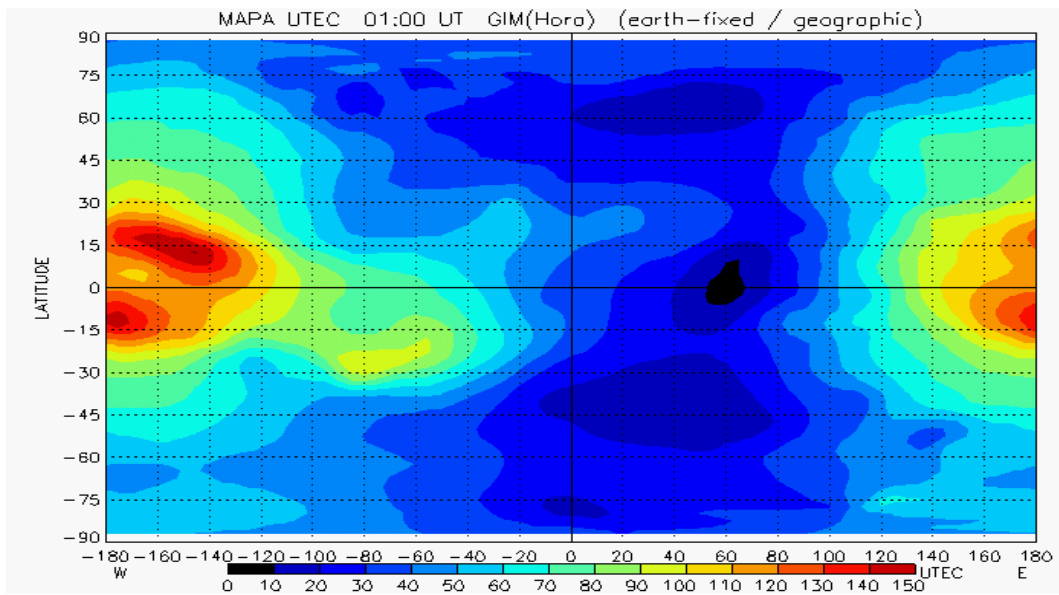


FIGURA 7.5 - Mapa do TEC gerado no PKD a partir dos valores medidos pela UPC.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).



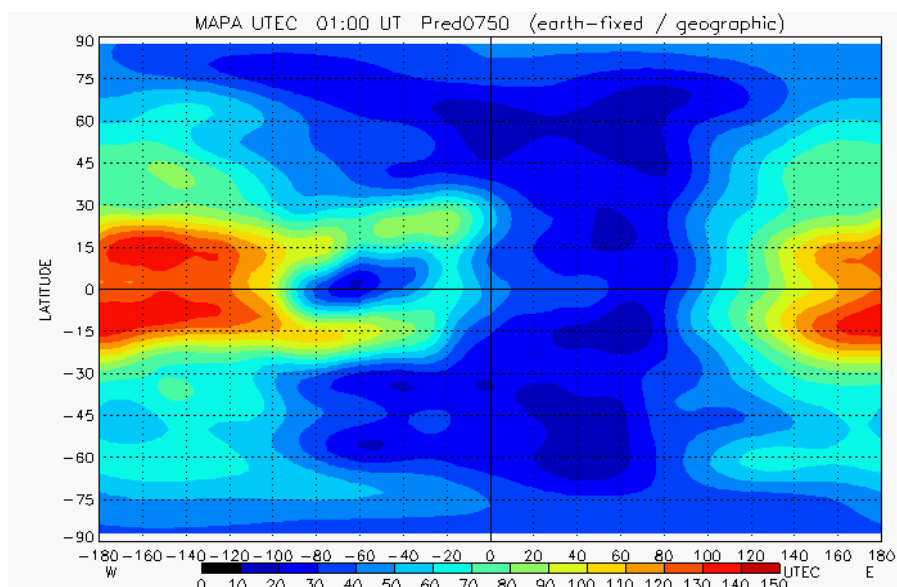


FIGURA 7.6 - Mapa do TEC gerado no PKD a partir da predição de coeficientes CODE.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

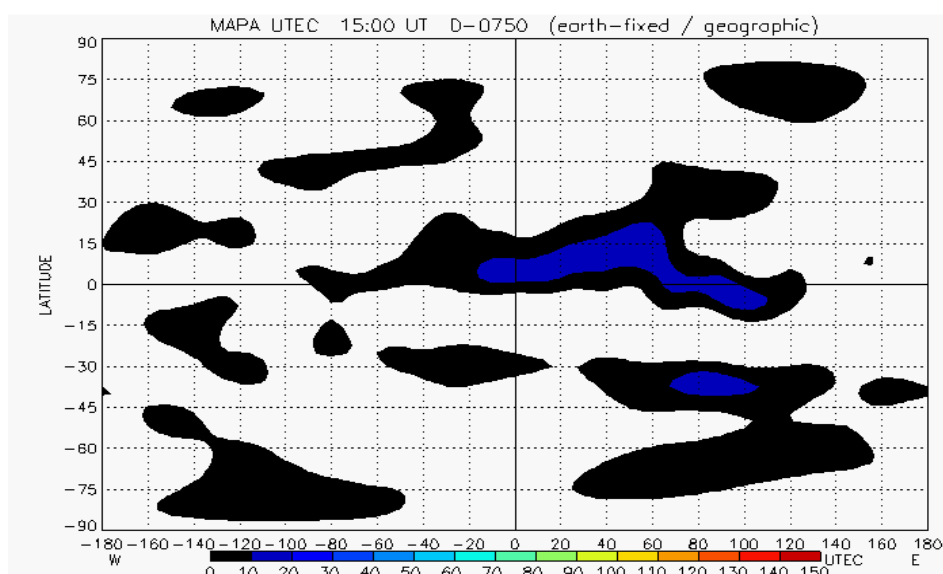


FIGURA 7.7 - Mapa de diferenças entre nossa predição e códigos CODE (15-03-2002) 15:00 UT.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

Na FIGURA 7.8 se apresentam as variações dos diferentes mapas TEC da CODE, JPL, ESA, UPC, NRCAN e PKD ao longo da linha equatorial para o dia 17 de março de 2002 (segundo dia da predição) para às 07:00 UT. A predição do PKD apresenta as mesmas variações que as outras medidas, com valores máximos em longitudes próximas a 120°E e valores mínimos em longitudes próximas a 25°W. Os valores da NRCAN que não foram medidos, forem substituídos por zero no gráfico.

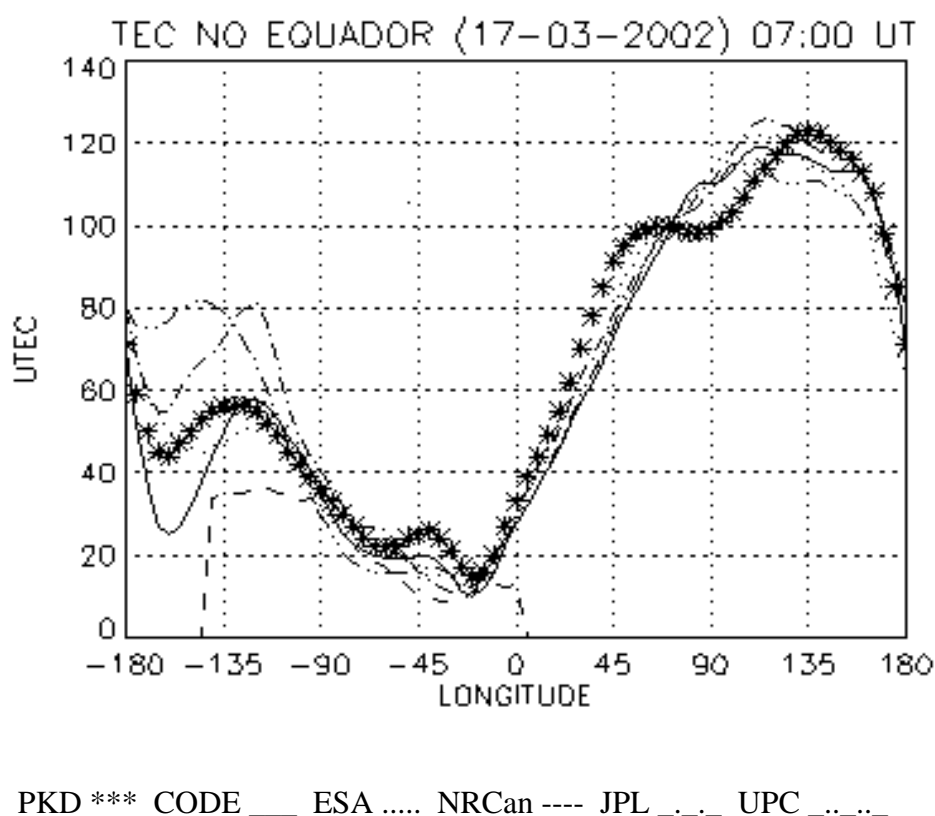
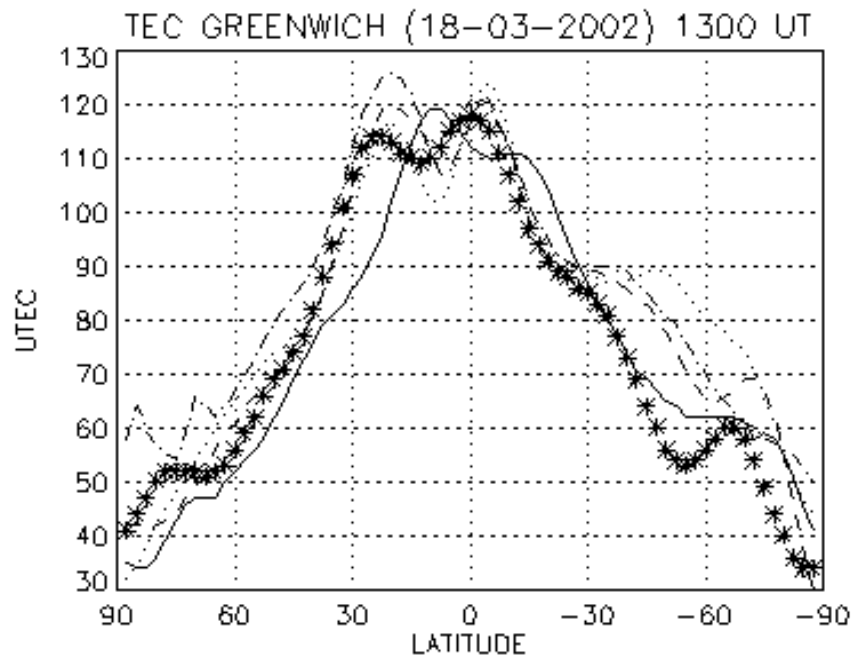


FIGURA 7.8 - Variações do TEC Equatorial de diferentes instituições (17-03-2002) 07:00 UT  
FONTE: Dulanto (2002).

Na FIGURA 7.9 se apresentam as variações do TEC dos diferentes mapas do CODE, JPL, ESA, UPC e PKD ao longo do meridiano de Greenwich para o dia 18 de março de 2002 (terceiro dia da predição) para 13:00 Hrs. A predição do PKD também apresenta os valores máximos das anomalias equatoriais e os valores mínimos perto dos pólos.



PKD \*\*\* ESA \_\_\_\_ CODE ---- JPL ..... UPC \_.\_.\_

FIGURA 7.9 - Diferentes valores TEC no meridiano Greenwich (18-03-2002) 13:00Hrs.

FONTE: Dulanto (2002).

Na FIGURA 7.10 se apresentam as variações dos diferentes mapas TEC do CODE, JPL, ESA, UPC e a predição do PKD para o ponto definido como São Paulo 1 (Latitude:  $22^{\circ} 30' S$  e Longitude:  $45^{\circ} 00' W$ ) para todos os dias da predição (16 de março a 21 de março de 2002) para 19:00 UT. Na FIGURA não esperamos obter nenhum tipo de comportamento padrão, pois é um valor pontual que vai variando aleatoriamente em forma diária, mais pode observar-se que os valores são próximos entre os diferentes dias e as diferentes instituições.

Na FIGURA 7.11 se apresentam as variações das medidas CODE, JPL, ESA, UPC e a predição do PKD do TEC ao longo do dia 20 de março de 2002 (5º dia da predição), em

uma posição escolhida ao acaso como o ponto 1 (Latitude: 77.5° N e Longitude: 180° W). Pode observar-se que os valores seguem um padrão, com máximos que correspondem aproximadamente para meia-noite UT, equivalente a meio dia do ponto (180 W).

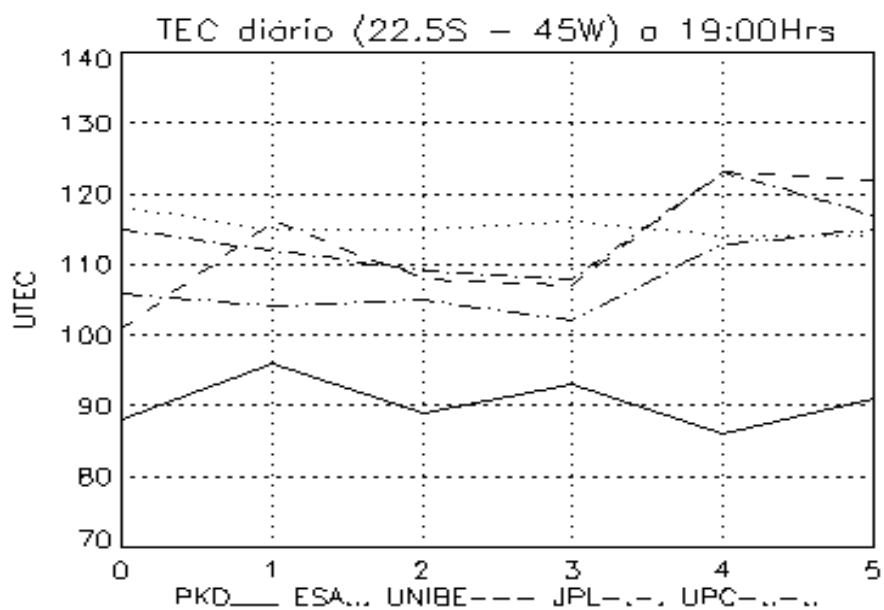


FIGURA 7.10 - Variações do TEC de diferentes instituições do 16-03 ao 21-03-2002 às 19:00 UT.

FONTE: Dulanto (2002).

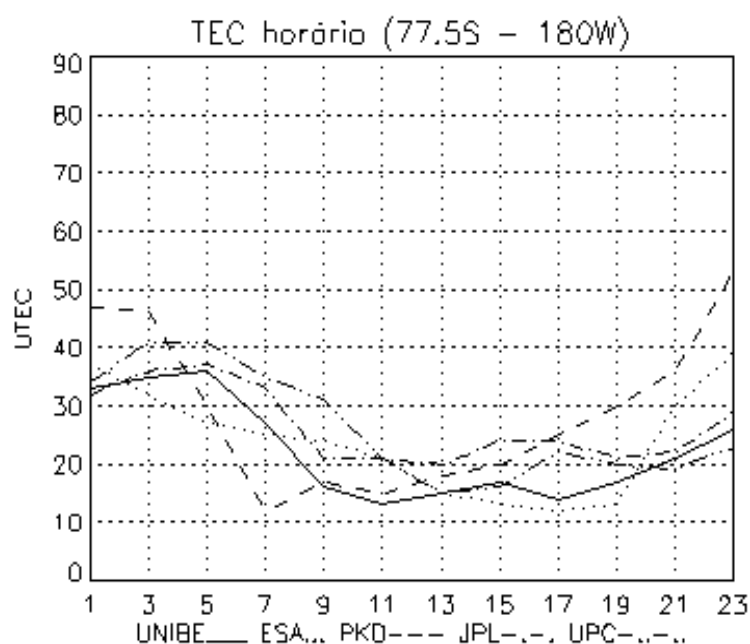


FIGURA 7.11 - Variações do TEC horário de diferentes instituições (20-03-2002).

FONTE: Dulanto (2002).

### 7.3 Frequências

O programa Kantor-Dulanto permite fazer gráficos globais da frequência crítica da camada F2, que é a principal informação para as comunicações. O PKD pode usar a informação de qualquer dos arquivos GIM, e uma vez executada a predição, também pode prever  $f_oF2$  para os próximos dias, em períodos de duas horas .

A determinação dos principais parâmetros para obter  $f_oF2$  foi feita com as seguintes equações (Davies, 1990):

$$\tau = C (1 + 0,005R_{12}) \quad (7.1)$$

onde  $R_{12}$  é a média mensal das manchas solares observadas,  $\tau$  é a semi espessura da camada F2 e C é determinado em função da estação do ano. De acordo com Davies (via

correio eletrônico, 2002),  $C = 270$  (Verão),  $C = 240$  (Outono e Primavera) e  $C = 210$  (Inverno).

O TEC ou  $N_T$  pode ser aproximado ao conteúdo de Faraday ( $N_F$ ) com a seguinte fórmula:

$$N_T(HL) = N_F(HL) + aN_F(\max) \quad (7.2)$$

Onde HL é a hora local,  $N_F(\max)$  é o máximo valor e  $a$  é uma constante que varia entre 0,1 e 0,15. Para programa usamos  $N_F = N_T / 1,125$  (valor médio). Com a determinação de  $\tau$  e  $N_F$ , pode-se determinar o parâmetro  $N_mF_2$  com a seguinte equação:

$$\tau = N_F / N_mF_2 \quad \text{ou} \quad N_mF_2 = N_F / \tau \quad (7.3)$$

onde  $N_F$  é o conteúdo Faraday e  $N_mF_2$  é a densidade máxima de elétrons. Uma vez determinado  $N_mF_2$ , a frequência crítica da camada  $F_2$  pode ser determinada. A frequência crítica é a máxima frequência em que uma onda propagando-se verticalmente vai ser refletida na ionosfera (camada  $F_2$ ), e um valor maior vai atravessar a ionosfera. Esta frequência pode ser determinada pela seguinte equação:

$$foF_2 = (80,6 N_mF_2)^{1/2} \quad (7.3)$$

onde  $foF_2$  é a frequência crítica para a camada  $F_2$ .

Na FIGURA 7.12 é mostrado o mapa de frequências críticas  $F_2$  para o dia 16 de março de 2002 (1º dia da predição), para 05:00 UT. Os valores máximos estão nas anomalias equatoriais para longitudes aproximadas de  $135^\circ$  E, onde a hora local é 14:00, o qual é o comportamento padrão esperado.

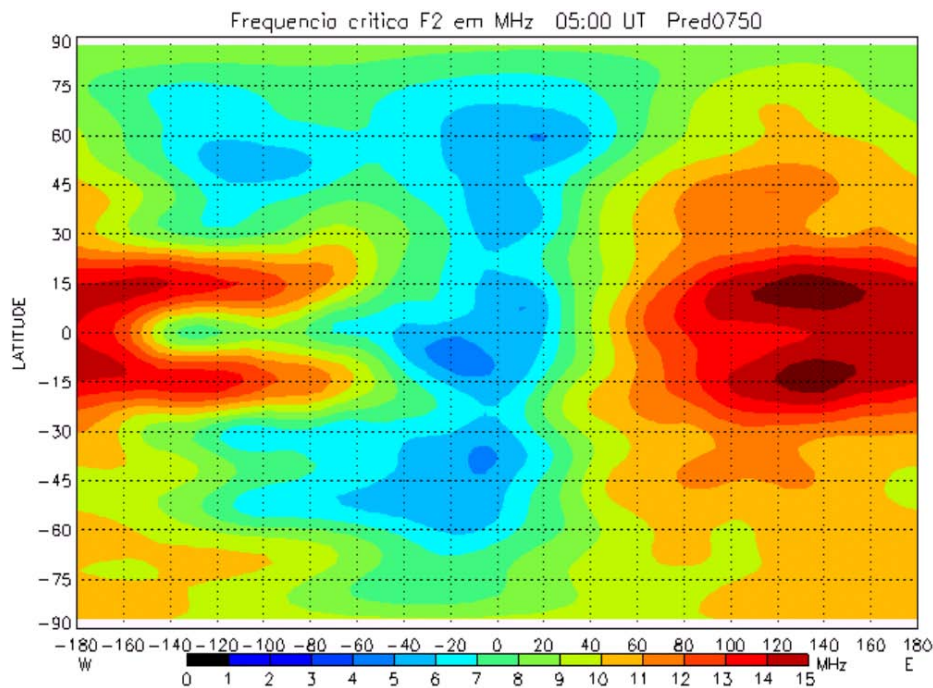


FIGURA 7.12 - Mapa  $f_oF2$  para o dia 16-03-2002 a 05:00UT.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

O programa também determina os excessos de atraso de tempo devido ao TEC para sinais de diferentes frequências ao atravessarem a ionosfera, e os cálculos foram feitos usando as fórmulas da equação 3.41 (Davies, 1990). O *Excess time delay* ou excesso de atraso de tempo é dado em segundos.

No início as comunicações com satélites utilizavam VHF (30-300 MHz), mas estas frequências geram um atraso considerável, da ordem de vários microsegundos, como é mostrado na FIGURA 7.13 para 100 MHz. Na atualidade para este tipo de comunicações se usa UHF (300 a 3000 MHz) ou SHF (3 GHz a 30 GHz). Na FIGURA 7.14 é mostrado o excesso de atraso de tempo para 1 GHz, o qual é de ordem de nanosegundos.

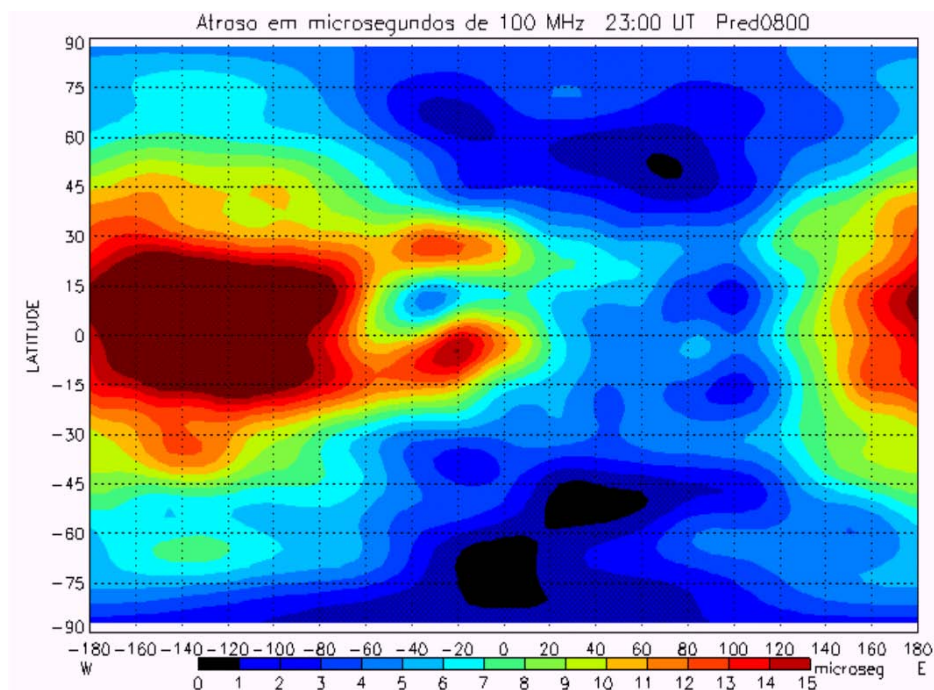


FIGURA 7.13 - Excesso de atraso de tempo para 100 MHz (21-03-2002) 23:00 UT.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).

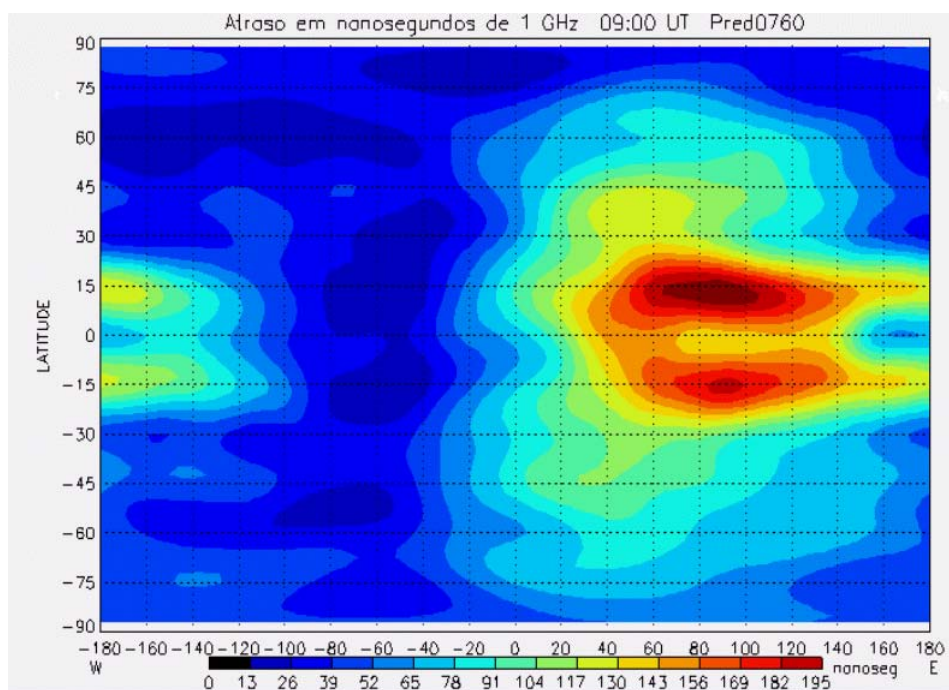


FIGURA 7.14 - Excesso de atraso de tempo para 1 GHz (17-03-2002) 09:00 UT.

FONTE: Kantor e Dulanto (2002).



O programa também poderia ser implementado para calcular a FOT, mas para isso precisa de vários dados externos, que variam em função do tempo e espaço, o que podem ser considerados para um estudo no futuro.

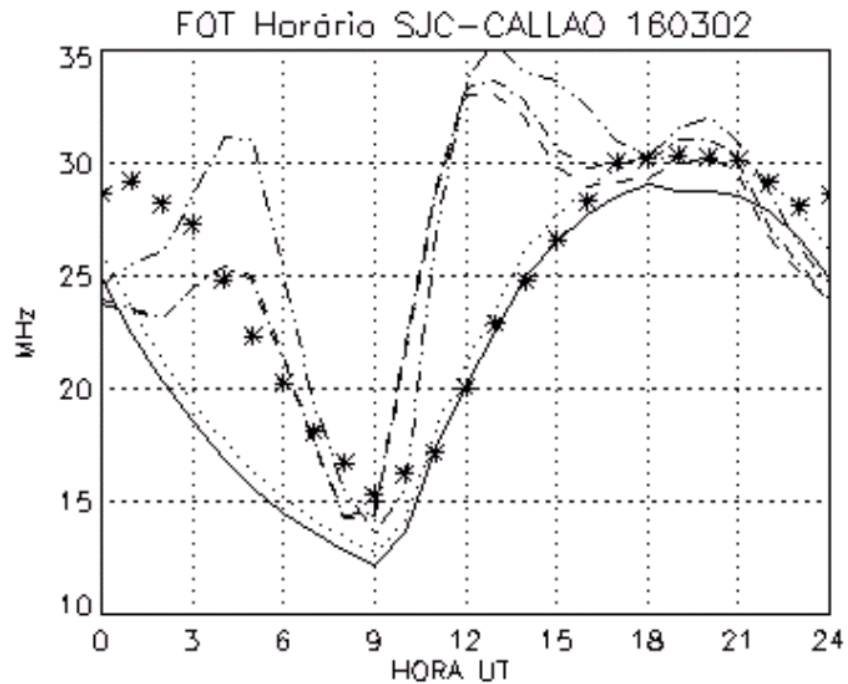
A seguir apresentaremos um procedimento que pode ser usado para calcular a FOT, considerando um transmissor em São José dos Campos (23° 13' S, 45° 51' W), Brasil e um receptor no porto do Callao (12° 03' S, 77° 10' W), Perú para o dia 16 de março de 2002:

- 1) Calculamos a distância entre as estações, que para nosso caso foi 3530 km, e aplicamos fórmulas para distâncias menores que 4000 km. Existe outras fórmulas para 4000 a 9000 km e para distâncias maiores que 9000 km.
- 2) Calculamos o ponto médio do enlace, que para nosso caso é 17° 38' S e 61° 30.5' W.
- 3) Calculamos o valor do TEC para o ponto dado. Quando não há coincidência com os pontos da grade, fazemos uma interpolação. Isto tem que ser feito para cada hora.
- 4) Usando as fórmulas descritas anteriormente neste capítulo, determinamos  $f_oF2$ .
- 5) Para determinar a frequência máxima existem varias aproximações, algumas delas com tabelas ou nomogramas, e uma delas é (Davies, 1990)  $f_{\max} \approx f_c (\alpha / 2h_o)^{1/2}$ , onde  $f_c$  é a frequência crítica ( $f_oF2$ ),  $\alpha$  é o raio da Terra ( $\cong 6371$  km) e  $h_o$  é a altura virtual de reflexão ( $\cong 450$  km).
- 6) Com a determinação da MUF é possível determinar a FOT ( $\cong 0,85$  MUF)

Na FIGURA 7.15 são mostradas as diferentes predições da FOT feitas para o dia 16 de março de 2002 e a nossa previsão com base nos valores previstos pelo PKD. A FIGURA mostra um comportamento padrão entre as FOT calculadas pelos diferentes softwares com valores máximos às 19:00 UT aproximadamente e valores mínimos às 09:00 UT.

Nas diferentes comparações de todos os resultados proporcionados pelo programa Kantor-Dulanto, utilizando dados do TEC obtido do sistema GPS que podem ser determinados em tempo quase real, os valores obtidos foram próximos do

comportamento padrão da ionosfera, mostrando que o software pode ser um elemento útil na hora de planejar, estabelecer e escolher circuitos de comunicação, além de outras capacidades que podem ser implementadas posteriormente.



PKD \*\*\* HC1 \_\_\_\_\_ HC2 ..... VOACAP---- ICEPAC \_.-. IPS on line \_...\_..

FIGURA 7.15 - Predições de FOT para o dia 16-02-2002 entre SJC e CALLAO.

FONTE: Dulanto (2002).

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Na primeira parte deste capítulo resumiremos as conclusões deste trabalho. Na segunda parte apresentamos as sugestões para outras aplicações do GPS, assim como sugestões que poderiam ser testadas e desenvolvidas em trabalhos futuros.

#### 8.1 Conclusões

Com o trabalho foi mostrado que o sistema de posicionamento global por satélites, GPS é um sistema com muitas capacidades, que além de ser um sistema de radionavegação, pode ser aplicado também em radiocomunicações.

O resultado para efeito de análise pode ser dividido em duas partes: (1) predição do GIM e (2) predição parâmetros importantes para comunicações.

Na primeira parte, analisamos os diferentes mapas globais que existem (CODE, NRCan, JPL, ESA, UPC) e a estimativa que faz nosso programa Kantor-Dulanto (PKD). O método usado para predição foi o método de máxima entropia, que é baseado em um processo regressivo, com uma base de dados de 30 dias.

Os resultados obtidos da predição do GIM foram comparados com os outros mapas disponíveis. Pode observar-se que os resultados do nosso programa apresentaram boa concordância com todos eles, apresentado as mesmas variações, valores máximos na anomalia equatorial ( $\cong 15^{\circ}\text{N}$  e  $20^{\circ}\text{S}$ , entre 13:00 a 14:00 Hora local) e valores mínimos em latitudes médias e altas (entre 03:00 a 05:00 Hora local).

Cabe ressaltar que existem pequenas diferenças entre o mapa gerado pelos coeficientes (expansão de harmônicos esféricos) utilizado pela CODE em relação ao mapa

observado e processado depois por eles. Também analisamos nossa predição com a gerada pelos coeficientes processados do mesmo dia, pois nossa aproximação seria com os coeficientes e não com os valores processados. A maior parte do mapa global, apresentou uma diferença próxima de zero e em pequenas áreas, diferenças inferiores a 20 UTEC.

Observando as várias comparações e análises de como deveria ser o comportamento do Conteúdo Total de Elétrons na Terra, chegamos à conclusão que nosso programa se apresenta como uma boa alternativa para predizer o TEC no mundo, pois é um método simples, econômico, com uma precisão razoável, tendo informação disponível durante as 24 horas do dia e em quase toda a Terra.

Na segunda parte analisamos os diferentes softwares que fazem predições de frequência. Escolhemos como exemplo um transmissor em São José dos Campos (Brasil) e o receptor no porto do Callao (Perú), para o dia 16 de março de 2002. Nosso software faz gráficos do excesso de atraso de tempo e a frequência crítica para a camada  $f_oF2$ , o qual é um parâmetro fundamental para determinar a MUF e a FOT. Estes valores previstos foram introduzidos em fórmulas e com algumas constantes, foi feito uma predição da MUF e FOT. Pode observar-se que nossa predição tem valores máximos do TEC na região da anomalia equatorial, em concordância com os outros programas para horários próximos as 15:00 HL, em que é previsto trabalhar em frequências mais altas, pela máxima influência diurna do sol, e os valores mínimos são para as 05:00 HL, horário em que a influência solar é mínima.

As predições de frequência crítica da camada F2, assim como os cálculos de excesso de atraso de tempo, não devem apresentar problemas (considerando que a predição de coeficientes é válida), pois se derivam de fórmulas ou aproximações.

A predição da frequência ótima de trabalho não foi configurada em nosso programa, pois existem várias constantes ou fatores externos que variam em função da posição e tempo, e poderia fazer-se melhores aproximações, mas ainda assim o resultado foi bom.

Analizando os diferentes programas de predições de frequência em HF, chegamos a conclusão que o sistema GPS se apresenta como uma boa alternativa para determinar e prever excesso de atraso de tempo, calcular a frequência crítica da camada F2, e prever a MUF, FOT e LUF.

## **8.2 Sugestões**

Existe um grande potencial no sistema GPS, pois este pode ser uma fonte de dados praticamente interminável (o sistema já tem projeção até o ano 2050). A informação obtida entre um receptor ou estação qualquer, com um satélite posicionado a 20200 km de altura, pode ser usado para diversas áreas do conhecimento humano, e com a futura habilitação do sinal L5 (1176,45 MHz) devem aparecer novos usos e aumentar a precisão dos existentes.

Na área da ionosfera, o sistema se apresenta como uma ferramenta útil de estudo, pois é fácil de implementar, acessível em qualquer instante (24 horas do dia) e em quase qualquer ponto da Terra ou próximo de ela. O trabalho pode ser usado para novas pesquisas no campo da geofísica espacial, como no estudo do TEC, determinação de distúrbios ionosféricos, comparação com modelos de TEC plasmasférico ou TEC Faraday, etc. Pode-se também desenvolver-se e adaptar ao programa de Fedrizzi (1999) para obter a leitura direta de um receptor de GPS de dupla frequência e determinar o TEC local.

Na área de comunicações, o programa pode ser desenvolvido para fazer cálculos de frequências críticas das outras camadas F1, E e D, assim como cálculos diretos da frequência ótima de trabalho. Não foram completadas estas funções, porque é nossa intenção continuar pesquisando quais seriam os valores das diferentes constantes e parâmetros externos, que se ajustariam melhor à nossa realidade (hemisfério Sul), pois muitos dos coeficientes foram calculados tomando a maioria de medidas no hemisfério Norte, o que pode observar-se claramente no gráfico das estações do IGS.

Na área espacial e de sensoramento remoto, deve-se ter em conta o excesso de atraso de tempo, para escolher as melhores frequências de comunicação e de controle dos satélites, pois muitos dos trabalhos ou medições que se realizam são de alta precisão.

Seria interessante para a estimativa de parâmetros testar outros métodos como filtro de Kalman e mínimos quadrados.

Na área da meteorologia, poderia ser interessante ler e processar mapas globais de parâmetros meteorológicos para fazer estimativas dos diferentes fatores climáticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Appleton, E.V. **The influence of the earth's magnetic field on wireless transmission.** Washington: URSI, 1927.

CCIR. **CCIR Atlas of ionospheric charecteristics.** Genvea: ITU, 1986. p.40-47. (Report 340-5).

CODE. **Global Ionosphere Maps (GIMs).** Disponível em:  
<<http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere.html> >. Acesso em: 12 mar. 2002.

Dana, H. Peter. **Global Positioning System (GPS) master control station network.** Boulder: Universidad de Colorado, 1995. Disponível em:  
<<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gif/gpscont.gif> >. Acesso em: 27 mar. 2002.

Dana, H. Peter. **GPS nominal constellation.** Boulder: Universidad de Colorado, 1998. Disponível em: <<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gif/orbits.gif>>. Acesso em: 27 mar.2002.

Davies, K. **Ionospheric Radio Propagation.** Londres: Peter Peregrinus,1969.

Davies, K. **Ionospheric Radio Propagation.** Londres: Peter. Peregrinus,1990.

Dulanto, M. **Comparação de diferentes dados TEC (PKD, CODE, ESA, NRCan, JPL, UPC) e diferentes valores horarios de FOT (PKD, Ham Companion, VOACAP, ICEPAC, IPS on line).** Desenvolvidas em IDL 5.3. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002.

Fedrizzi, M. **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS**. 1999. 142p. (INPE – 7259-TDI/703). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

Ham Companion. **Programa para predição de frequências**. [S.l.]: Brinson Microwave Corporation, 1989.

Hernandes-Pajares, M. et al. Validation of the GPS TEC maps with TOPEX data. In: International Reference Ionosphere Workshop, São José dos Campos, June 2001. **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2001.

Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J. **GPS Theory and practice**. New York: Springer Wien, 1994.

Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J. **GPS Theory and practice**. New York: Springer Wien, 2001.

ICEPAC. **Programa de predição de frequências**. Disponível em: <[http://elbert.its.bldrdoc.gov/pc\\_hf/hp\\_icepac.html](http://elbert.its.bldrdoc.gov/pc_hf/hp_icepac.html)>. Acesso em: 07 jan. 2002

IDL Version 5.3. **Using IDL**. Research Systems, 1999.

IPS Radio and Space Service. **Introduction to HF radio propagation**. Disponível em: <<http://www.ips.gov.au/Main.pgh?CatID=6>>. Acesso em: 13 fev. 2002.

IPS on line. **Software for HF Predictions**. Disponível em: <[http://www.ips.gov.au/HF\\_Systems](http://www.ips.gov.au/HF_Systems)>. Acesso em: 13 fev. 2002.



Jackson, J.D. **Classical electrodynamics**. Illinois: Illinois University, 1966.

JPL. **Imagens das estações IGS no mundo**. Disponível em:

<[http://igscb.jpl.nasa.gov/imagenes/world\\_clean.jpg](http://igscb.jpl.nasa.gov/imagenes/world_clean.jpg)>. Acesso em: 12 mar. 2002

Jursa, A.S. **Handbook of geophysics and the space environment**. [S.l.]: Air Force Geophysics Laboratory, 1985.

Kantor, I.J.; Trivedi, N.B.. **Espectro de potência do campo geomagnético pelo Método da Máxima Entropia**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1977. (INPE – 1082-PE/068).

Kantor, I.J.; Trivedi, N.B. Espectro de potência do campo geomagnético pelo método da entropia máxima. **Revista Brasileira de Física**, v. 10, n. 3, p.569-595, set. 1980.

Kantor, I.J.; M. Fedrizzi; Paula, E. R. Total ionospheric electron content from GPS measurements over the Brazilian region. **Geofísica Internacional**, Mexico, v. 39, n. 1, p. 81-85, 1999.

Kantor, I. J.; Dulanto, M.; **Programa Kantor-Dulanto (Desenvolvido em IDL 5.3 para processar dados TEC de diferentes instituições e fazer previsões aplicáveis para radio-comunicações)**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002.

Kolmogorov, A. Interpolation und Extrapolation Stationären Zufälligen Folgen. **Bulletin of Academic Science**, v. 5, p.3-14, 1941.

Komjathy, A. **Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system**. 1997. Thesis (Doctor in Philosophy in Geodesy and Geomatic Engineering) – University of New Brunswick, Canadá, 1997.

Kraus, J. D.; Carver, K. R. **Eletromagnetismo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986.

Maxwell, J.C. **A Treatise on electricity and magnetism**. Oxford: [S.n.], 1873.

Monico, J.F.G. **Posicionamento pelo NAUSTAR-GPS, descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: UNESP, 2000.

NASA. **Base dados de mapas ionosféricos globais**. Disponível em:  
< <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/2002/>>. Acesso em: 12 mar. 2002.

Puliafito, S. **Propagación y radiación de ondas electromagnéticas-El campo eletromagnético**. 2.ed. Mendoza: Universidad de Mendoza, 1987.

Schaer, S. et al. **Global and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable**. Suíça: Berna University, 1995.

Schaer, S. **How to use CODE's global ionosphere maps**. Suíça: Berna University, 1997.

Schaer, S. **IONEX: the Ionosphere Map Exchange format version 1**. Suíça: Berna University, 1998.

Schaer, S., **Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system**. 1999. Thesis (Doctor in Philosophy) - Berna University, Berna, 1999.

Tanenbaum, A.S. **Redes de computadoras**. 3.ed. México: Prentice Hall, 1992.

VOACAP. **Programa de predição de frequências.** Disponível em:  
<[Http://www.uwasa.fi/~jpe/voacap/index.html](http://www.uwasa.fi/~jpe/voacap/index.html)>. Acesso em: jan. 2002.

Yule, G.U. **On a method of investigating periodicities in disturbed.** London: Royal Society London, 1927.



## APÊNDICE A

### ESPECTRO DAS ONDAS DE RÁDIO

Na tabela A1 apresenta-se o espectro das ondas de rádio com suas formas primárias de propagação e usos.

TABELA A1 - Espectro das Ondas de Rádio.

Nome	freqüências	Forma primário de Propagação	Usos Primários
Extremely Low Frequency ( <b>ELF</b> )	< 3 KHz	Onda guiada pela terra- ionosfera, penetra na água do mar.	Comunicação terra – submarinos.
Very Low frequency ( <b>VLf</b> )	3-30 KHz	Ondas guiadas (entre a terra e baixa ionosfera) Ondas de terra.	Navegação, comunicação, freqüência padrão e tempo.
Low frequency ( <b>LF</b> )	30-300KHz	Onda guiada, onda de terra.	Marítima, Loran C, radiodifusão.
Medium frequency ( <b>MF</b> )	300-3000KHz	Reflexão na região E (noite), onda de terra.	Marítima, Aeronautica, salvamento internacional, radiodifusão AM, móvel terrestre.
High Frequency ( <b>HF</b> )	3-30 MHz	Reflexão na região E e F.	Serviços fixos marítimos e aeronáuticos, radio- difusão (aficionados).
Very High Frequency ( <b>VHF</b> )	30-300 MHz	Linha de horizonte, dispersa -se na ionosfera.	Televisão, radiodifusão FM, segurança pública, aeronáutica.
Ultra High Frequency ( <b>UHF</b> )	300-3000 MHz	Linha de horizonte (afetada pelas irregularidades da ionosfera).	Comunicações espaciais, televisão, radar, radio-difusão, navegação.
Super High Frequency ( <b>SHF</b> )	3-30 GHz	Linha de horizonte (troposférica, afetada pelas irregularidades da ionosfera).	Comunicações espaciais, televisão, radar, radio-difusão, navegação.

FONTE: Davies (1990, p. 3).



## APÊNDICE B

### PROGRAMA KANTOR-DULANTO

```
;msg ã implementado
;mapa foF2
;R<=M, M<=R, M<=M-R
; Estatística, histograma, std, média etc
; P41 maior do que +-1 ?
; procurar o File correspondente ao Plot que tenho do dia 120.

#####
;# Prediccion01.pro          #
;# Predição dos Coeficientes do GIM  #
;# Ivan J.Kantor - Miguel Dulanto  #
;# 01/05/02 - IDL 5.3  SJC INPE  #
#####
;
; Programa lê 36 files de Coeficientes
; usa 30 para prever as próximas 6
; no. máximo = 36
; Lon = 73, Lat = 71 para mapa GIM
; etc
;
;

pro LeCoeficientes, Coef,Files,diretorio ;-----
;Subrotina para ler os coeficientes do Global Ionosphere Maps

; Armazenados da seguinte forma Coef[n,m] n=grau m=ordem
;
;   |00 10 20 30 ..|   |0+0 1+1 2+2 3+3 ..|
; array |01 11 21 31 ..| = Coef |1-1 1+0 2+1 3+2 ..|
;   |02 12 22 32 ..|   |2-2 2-1 2+0 3+1 ..|
;   |03 13 23 33 ..|   |3-3 3-2 3-1 3+0 ..|
;   |...      |   |...      |
;
; array[i,j] = Coef[n,n-|m|]  m >= 0
;             Coef[n-|m|,n]  m < 0
;
; Coef[ n=i, m=i-j] = array[i,j]  i >= j
; Coef[ n=i-j, m=i]      i < j
;   i = (m ge 0)? n:n+m
;   j = (m ge 0)? n-m:n
```













```

;surface, E,Lon,Lat
;contour, E,Lon,Lat, NLevels=10,/fill,/overplot
;contour, E,Lon,Lat, NLevels=10,/fill,/overplot ; animação
;if ((n eq 15)and(m eq -15)) then goto,fim
;endwhile
fim:
endfor
endfor
end

pro PlotGIM, E,Lon,Lat ;-----
;Plot GIM map

;loadct,33

MAP_SET,/mercator,/Grid,LONDEL=30,LATDEL=15;>>>>>>>mdc

contour, E,Lon,Lat, Levels=indgen(16)*10,/fill,/overplot
;contour, E,Lon,Lat, Levels=indgen(16)*10,/overplot ;coloca as
linhas
for j=0,14 do TV, replicate((!D.Table_Size/15)*j,30,10), 30*j+50,20 ; tabela de cores
;TEK_COLOR
;32 colors. Index 0=black,1=white,2=red,3=green,4=blue,5=cyan,6=magenta,8=orange
etc.
;!P.Color=0
;!P.BackGround=1; linhas pretas em fundo branco
contour, E,Lon,Lat, Levels=indgen(16)*10,/overplot,color=1,XRANGE=[-
180,180],/XSTYLE,YRANGE=[-
90,90],/YSTYLE,XGRIDSTYLE=1,XTHICK=1.2,XTICKLEN=1,XTICKS=18 $
,yGRIDSTYLE=1,yTHICK=1.2,YTICKLEN=1,YTICKS=12;>>>mdc
map_continents, color=0,/Grid,LONDEL=30,LATDEL=15;>>>>>>>mdc
plots,[50,30*15+50],[20,20],color=1,/device
plots,[50,30*15+50],[20+10,20+10],color=1,/device
for j=0,15 do plots,[30*j+50,30*j+50],[20,20+10],color=1,/device
for j=0,15 do xyouts, 30*j+5,8, j*10 ,color=1,/device
return
end

pro PlotGIM_BW, E,Lon,Lat ;-----
;Plot GIM map B&W

MAP_SET,/mercator,/Grid,LONDEL=30,LATDEL=15;>>>mdc

;contour, E,Lon,Lat, Levels=indgen(16)*10,/fill,/overplot

```

```

contour, E,Lon,Lat, Levels=indgen(16)*10,/overplot
;for j=0,14 do TV, replicate(!D.Table_Size/15)*j,30,10), 30*j+50,20 ; tabela de cores
;TEK_COLOR
;32 colors. Index 0=black,1=white,2=red,3=green,4=blue,5=cyan,6=magenta,8=orange
etc.
;!P.Color=0 & !P.BackGround=1; linhas pretas em fundo branco
contour, E,Lon,Lat, Levels=indgen(16)*10,/overplot
map_continents
return
end

```

```

pro calculate_plot_Default,info      ;-----
n=info.Grau
m=info.Sinal*info.Ordem
i = (m ge 0)? n:n+m
j = (m ge 0)? n-m:n
case info.plotDefault of
'Coef(dias)': begin
    plot,info.Coeff[*],info.iHora,i,j],title='Coeficiente'+string(n)+string(m),xtitle='dias'
end
'Coef(horas)': begin
    tempo = indgen(12)*2+1
    plot,tempo,info.Coeff[info.iFile,*,i,j],title='Coeficiente'+string(n)+string(m),xtitle
='horas'
end
'Coef(tempo)': begin
    x = info.Coeff[0,*,i,j]
    for iFile=1,35 do x=[x,info.Coeff[iFile,*,i,j]]
    plot,x,title='Coeficiente'+string(n)+string(m),xtitle='horas + dias'
end
'correlação': begin
    x =info.Coeff[*],info.iHora,i,j] & help,x      ; veja a dimensao
    lag = indgen(30)
    c = fltarr(30)
    for i=0,29 do c[i] = a_correlate(x,lag[i])
    plot,lag,c,title='Coeficiente'+string(n)+string(m)
    plots,[0,30],[0,0]
end
'Espectro': begin
    espectro = abs(FFT(info.Coeff[*],info.iHora,i,j]))
    plot,espectro[1:*],title='Coeficiente'+string(n)+string(m)
end
'Plot Pnm(x)': begin
    x = (findgen(201)-100.)/100.

```



```

        end
47 ge info.iFile: begin ; diferenças
    iP = info.iFile - 42 ; indice do File predito - medido
    DCoef = reform(info.CoeFP[iP,info.iHora,*,*]) -
reform(info.Coeff[iP+30,info.iHora,*,*])
    GIM, E,Lon,Lat,info,DCoef,'calculate GIM';reform elimina dimensão 1
    info.GIM = E
    end
48 eq info.iFile: begin
    GIM, E,Lon,Lat,info,reform(info.CoeFile[info.iHora,*,*]),'calculate GIM'
;reform elimina dimensão 1
    info.GIM = E
    end
49 eq info.iFile: info.GIM = reform(info.TEC[*,*,info.iHora])
50 eq info.iFile: info.GIM = info.M[*,*]
else:
endcase
case info.graphicDefault of
'Plot GIM': PlotGIM, info.GIM,info.Lon,info.Lat
'Plot Contour B&W': PlotGIM_BW, info.GIM,info.Lon,info.Lat
'surface': SURFACE, info.GIM,info.Lon,info.Lat
'shade': shade_surf, info.GIM,info.Lon,info.Lat
'trigrd':begin
    end
'shade 3grid': begin
    end
'polar equador': begin
    plot,/polar, [info.GIM[*,35],info.GIM[0,35]], [info.Lon,info.Lon[0]]*!DtoR
    plots,0,0, PSym=1
    end
'polar Greenwich': begin
    plot,/polar, info.GIM[36,*], info.Lat*!DtoR
    plots,0,0, PSym=4
    end
'contour': begin
    SunEarth = ['sun-fixed','earth-fixed']
    GeogrGeomag = ['geographic','geomagnetic']
    contour, info.GIM,info.Lon,info.Lat, Levels=indgen(16)*10,/fill $
        ,title='MAPA UTEC ' + info.Horas[info.iHora]+' :00 UT'+
'+info.FilesCoef[info.iFile] $
        +' (+SunEarth[info.SunEarth]+' /
'+GeogrGeomag[info.GeogrGeomag]+' ),xtitle='W
UTEC E' $
        ,ytitle='LATITUDE',XRANGE=[-180,180],/XSTYLE,YRANGE=[-
90,90],/YSTYLE,XGRIDSTYLE=1,XTHICK=1.2,XTICKLEN=1,XTICKS=18 $
        ,yGRIDSTYLE=1,yTHICK=1.2,YTICKLEN=1,YTICKS=12;>>>mdc

```



```

for j=0,14 do TV, replicate((!D.Table_Size/15)*j,30,8), 30*j+150,15
plots,[70,680],[240,240],color=0,/device
plots,[375,375],[40,440],color=0,/device
plots,[150,30*15+150],[15,15],color=0,/device
plots,[150,30*15+150],[15+8,15+8],color=0,/device
for j=0,15 do plots,[30*j+150,30*j+150],[15,15+8],color=0,/device
for j=0,15 do xyouts,100+ 30*j+5,2, j*10 ,color=0,/device
return

end
'estatistica': begin
;plot,histogram(info.GIM)
data = info.GIM
hist = HISTOGRAM(data)
bins = FINDGEN(N_ELEMENTS(hist)) + MIN(data)
;PRINT, MIN(hist)
;PRINT, bins
PLOT, bins, hist, YRANGE = [MIN(hist)-1, MAX(hist)+1], PSYM = 10, $
XTITLE = 'TECU', YTITLE = 'Histograma'
momento = moment(data,sdev=sdev,mdev=mdev)
media = string(momento[0])
varianca = string(momento[1])
mdev = string(mdev)
sdev = string(sdev)
maxGim = string(max(data))
minGIM = string(min(data))
x=400 & y=400 & dy=-20
xyouts,[x,x,x,x,x,x],[y,y+dy,y+2*dy,y+3*dy,y+4*dy,y+5*dy], $
['media'+media,'mean
abs.dev'+mdev,'variança'+varianca,'stdv'+sdev,'max'+maxGIM,'min'+minGIM],/device
end
'subtrai GIM':
else: print,'erro plot Default:',selecao
endcase
end

pro MEM, G,mm,x,n,P ;-----
;Maximum Entropy Method
;Prediction Error Filter - Burg

G=fltarr(128) & EB=fltarr(128) & EF=fltarr(128) & GG=fltarr(128)
; n is limited to 128
;P=0.0 & for j=1,n do begin P=P+x[j]*x[j] & P=P/n
P=0.0 & for j=1,n do P=P+x[j-1]*x[j-1] & P=P/n & P0=P
print,format="( ' M= 0',17X,' P=',E14.6)",P

```

```

;G[1]=1.0 & m=1 & EB[1]=x[1] & EF[n-1]=x[n]
G[1]=1.0 & m=1 & EB[1]=x[0] & EF[n-1]=x[n-1]
for j=2,n-1 do begin
;   EB[j] = x[j]
;   EF[j-1]=x[j]
   EB[j] = x[j-1]
   EF[j-1]=x[j-1]
endfor
goto, IN

```

```

LOOP:
m = m + 1
G[m]=R & for j=1,m do GG[j]=G[j]
for j=1,n-m do begin
   EB[j] = EB[j] + R*EF[j]
   EF[j] = EF[j+1] + R*EB[j+1]
endfor

```

```

IN:
Nom=0.0 & Den=0.0
for j=1,n-m do begin
   Nom = Nom + EB[j]*EF[j]
   Den = Den + EB[j]*EB[j] + EF[j]*EF[j]
endfor
R=-2.*Nom/Den & P=P*(1.-R*R)
FPE = (n+m+1)*P*P/(n-(m+1))
print,format="(' M=',I3,' R=',E14.6,' P=',E14.6,' P%=',F8.3,'
FPE=',E14.6)",m,R,P,100.*P/P0,FPE
if (m eq 1) then goto, LOOP
for j=2,m do G[j]=GG[j]+R*GG[m-j+2]
if (m lt mm) then goto,LOOP
G[m+1] = R
return
end

```

```

pro Serie_Predita_MEM, xp,x ;-----
n=36 & t=findgen(n)
nn=30 & m=nn/2
MEM, G,m,x[0:nn-1],nn,P ; pega só os 30 pontos iniciais

```

```

;Print,' P=',P
;print,'G=',G

```

```

; Prediccion x=série; xp=x predito a partir de nn+1
ggg=-G[1:m+1] ;& print,ggg
xp=fltarr(n) & xp[0:nn-1]=x[0:nn-1]

```

```

for i=nn,n-1 do begin
    xp[i]=0.0
    for j=1,m do xp[i]=xp[i]+ggg[j]*x[i-j]
endfor
;plot,t,x
;oplot,t[nn-1:n-1],xp[nn-1:n-1],color=2
xp = xp[nn:n-1]      ;toma só a parte predita
end

pro Prediccion01      ; -----
; Lê os coeficientes do GIM, prepara a tela
set_plot,'WIN'
device,decompose=0
NOut=0      ; contador de Output Files
;TEK_color
;32 colors. Index 0=black,1=white,2=red,3=green,4=blue,5=cyan,6=magenta,8=orange
etc.
LoadCT,33
TVLCT,[0B,255B,255B,0B],[0B,255B,0B,0B],[0B,255B,0B,255B]      ;
[preto,branco,vermelho,azul]
!P.Color=0 & !P.BackGround=1      ; linhas pretas em fundo branco

;LEITURA DOS COEFICIENTES
Coef = dblarr(36,12,16,16)  ; 35x12x16x16 = 107.520 números
;File = 'D:/gps/Miguel/dadosTEC/Cod11475.ion'
;File = 'D:/gps/Miguel/dadosTEC/example.ion'
;diretorio=" & diretorio_D='c:\Miguel\CoefGIM\'
diretorio=" & diretorio_D='c:\Miguel\CoefGIM\'
File = findfile(diretorio_D+'Coeficientes.ini',count=NFile) & help,NFile & print,File
; <<<<<<<<<
if NFile eq 1 then begin      ; Já existe a Tabela de Coeficientes
    openr,lun,File[0],/get_lun
    readu,lun,Coef
    close,lun & free_lun,lun
    Files = findfile(diretorio_D+'coe*.txt',count=NFile)
    if NFile eq 0 then return      ; evitar file vazio
    Files = Files(sort(Files))      ; ordena os files
end else begin ; Não existe a Tabela dos Coeficientes, precisa lê-los
    read,PROMPT='Diretorio('+diretorio_D+'):',diretorio
    if(diretorio eq ") then diretorio=diretorio_D
    LeCoeficientes, Coef,Files,diretorio ;Le os coeficientes GIM nos files do
diretorio
    gravaCoef = dialog_message('Grava os Coeficientes ?','question)
    if gravaCoef eq 'Yes' then begin
        openw,lun,diretorio+'Coeficientes.ini',/get_lun
        writeu,lun,Coef
    end
end

```

```

        close,lun & free_lun,lun
    endif
endelse

FilesCoef = strarr(36+6+6+3)
FilesCoef[0:35] = strmid(Files,10,/reverse)
FilesCoef[36:41] = 'Pred'+strmid(FilesCoef[30:35],3,4)
FilesCoef[42:47] = 'D-'+strmid(FilesCoef[30:35],3,4)
FilesCoef[48:50] = ['Coef(Hora)','GIM(Hora)','memory']
Horas = ['01','03','05','07','09','11','13','15','17','19','21','23']

descricao = [ $
    '1\Lê Files','0\File Coef','2\File GIM', $
    '1\Plot','0\Coef(dias)','0\Coef(horas)','0\Coef(tempo)','0\correlação','0\Espectro', $
    '4\Plot Pnm(x)','2\Plot Pnm(senB)', $
    '1\Calculate Coef','0\calculate GIM','0\GIM grau fixo','0\GIM ordem fixa','4\M
<= R','0\M = M - R','0\M = - M','4\sun-fixed','0\earth-fixed','4\geogr.','2\geomag.', $
    '1\GIM','0\Plot GIM','0\Plot Contour B&W','0\surface', $
    '0\shade','0\trigrid','0\shade 3grid','0\contour','4\polar equador','0\polar
Greenwich','0\estatística','2\subtrai GIM', $
    '1\Predicao Coef','0\Kalman','0\MEM','2\MinQua', $
    '1\Predicao GIM','0\Kalman_GIM','0\MEM_GIM','2\MinQua_GIM', $
    '1\Animação','0\24 horas','2\36 dias', $
    '1\Frequência','0\Mapa F2crit','0\Pred. F2crit 1d','3\atraso','0\1 MHz ','0\10
MHz','0\100 MHz','0\1 GHz','2\10 GHz',$
    '1\Output','0\print
tela','0\annotate','0\coeficientes','0\Coef(File,H)','2\GIM(File,H)', $
    '1\Sair','0\teste','2\sair']
base0 = widget_base(/col,MBar=bar,title='GPS Predicción')
menu0 = cw_PDMenu(bar,descricao,MBar,/return_name,uvalue='menu0')
base = widget_base(base0,/column)
;texto = widget_text(base,value='Stations.txt')
base1 = widget_base(base,/column)
    base10 = widget_base(base1,/row)
        iFile = widget_droplist(base10,value=FilesCoef,uvalue='file')
        espaco = widget_label(base10,value=' ')
        hora = widget_droplist(base10,title='Hora',value=Horas,uvalue='hora')
        espaco = widget_label(base10,value=' ')
        grau = widget_slider(base10,title='grau',max=15,value=0,uvalue='grau')
        espaco = widget_label(base10,value=' ')
        maismenos = ['+','-']
        sinal =
cw_bgroup(base10,maismenos,/row,/exclusive,/return_name,uvalue='sinal')
;label_top ??
    widget_control,sinal,set_value=0

```

```

        w_ordem =
widget_slider(base10,title='ordem',max=15,value=0,uvalue='ordem')
        espaco = widget_label(base10,value='      ')
        base11 = widget_base(base10,/column)
        aviso1 = widget_label(base11,value='geogr./earth-fixed
')
        aviso2 = widget_label(base11,value='output: predicaoNN.txt ou
gif      ')
        draw = widget_draw(base1,xsize=700,ysize=460)
NLat=71 & Lat=findgen(NLat)*(-2.5)+87.5
NLon=73 & Lon=findgen(NLon)*5-180.
widget_control,base0,set_uvalue = $
{
        $
;texto:texto, $
FilesCoef:FilesCoef, $
iFile:0, $
Horas:Horas, $
iHora:0, $
Grau:0, $
Ordem:0, $
w_ordem:w_ordem, $
Sinal:+1, $ ; Sinal = +1 ou -1 [default=+1]
Coef:Coef, $ ; Coef = dblarr(36,12,16,16) ; 35x12x16x16 =
107.520 números
        Coef:dblarr(6,12,16,16), $ Coef.preditos
        GIM:dblarr(73,71), $ ; register
        M:dblarr(73,71), $ ; memory
        Lon:Lon, $
        Lat:Lat, $
        TEC:fltarr(73,71,12), $ ;TEC lido de file GIM
        CoeFile:dblarr(12,16,16), $ ;Coef lido de file Coef
        SunEarth:1, $ ; sun-fixed(0), earth-fixed(1=default)
        GeogrGeomag:0, $ ; geographic(0=default. geomagnetic(1)
        plotDefault:'Coef(tempo)', $ ; default para o plot
        graphicDefault:'contour', $ ; default para o graphic
        DadosPredicao:'dados', $ ; default dados p/ graphic
        aviso1:aviso1,$
        aviso2:aviso2,$
        NOut:NOut}
widget_control,base0,/realize
erase,1
xmanager,'Prediccion01',base0,/no_block
end

pro Prediccion01_event, event ; -----
widget_control,event.id,get_uvalue=selecao

```



```

'Coef(tempo)':      begin & info.plotDefault=selecao & calculate_plot_Default,info
& end
'correlação':      begin & info.plotDefault=selecao & calculate_plot_Default,info & end
'Espectro':        begin & info.plotDefault=selecao & calculate_plot_Default,info & end
'Plot Pnm(x)':      begin & info.plotDefault=selecao & calculate_plot_Default,info & end
'Plot Pnm(senB)':   begin & info.plotDefault=selecao & calculate_plot_Default,info & end
'calculate GIM':    calculate_graphic_GIM,info,selecao
'GIM grau fixo':    calculate_graphic_GIM,info,selecao
'GIM ordem fixa':   calculate_graphic_GIM,info,selecao
'M <= R':           info.M = info.GIM                      ; coloca o GIM na Memory
'M = M - R':         info.M = info.M - info.GIM           ; subtrai o Registro da Memory
'M = - M':           info.M = - info.M                     ; inverte o sinal da Memory
'sun-fixed':         info.SunEarth = 0
'earth-fixed':       info.SunEarth = 1
'geogr.':            info.GeogrGeomag = 0
'geomag.':           info.GeogrGeomag = 1
'Plot GIM':          begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'Plot Contour B&W':  begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'surface':           begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'shade':             begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'trigrd':            begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'shade 3grid':       begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'polar equador':     begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'polar Greenwich':   begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'estatistica':       begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'contour':           begin & info.graphicDefault = selecao &
calculate_graphic_Default,info & end
'24 horas':          begin
    widget_control,/hourglass
    for iHora=0,11 do begin
        infoL = info
        infoL.iHora = iHora+1
        GIM, E,Lon,Lat,infoL,reform(info.Coeff[info.iFile,iHora,*,*]),selecao
;reform elimina dimensão 1
        PlotGIM, E,Lon,Lat
    endfor
end

```

```

'36 dias': begin
    widget_control,/hourglass
    for iFile=0,11 do begin
        GIM, E,Lon,Lat,info,reform(info.Coeff[iFile,info.iHora,*,*]),selecao
        ;reform elimina dimensão 1
        PlotGIM, E,Lon,Lat
    endfor
end
'subtrai GIM': begin
    GIM, E,Lon,Lat,info,reform(info.Coeff[info.iFile,info.iHora,*,*]),selecao
    ;reform elimina dimensão 1
    E = info.GIM - E
    PlotGIM, E,Lon,Lat
    info.GIM = E
end
'Kalman':
'MEM': begin
    n=info.Grau
    m=info.Sinal*info.Ordem
    i = (m ge 0)? n:n+m
    j = (m ge 0)? n-m:n
    help,i,j

    ;plot,info.Coeff[* ,info.iHora,i,j],title='Coeficiente'+string(n)+string(m)
    n=36 & t=findgen(n)
    x = info.Coeff[* ,info.iHora,i,j]

    ;print,'x',x & plot,t,x
    nn=30 & m=nn/2
    MEM, G,m,x[0:nn-1],nn,P    ; pega só os 30 pontos iniciais

    ;Print,' P=',P
    ;print,'G=',G

    ;plot,P/abs(complex(FFT(G)))^2
    ;y=fltarr(33) & y[0:15]=x & print,y & oplot,abs(FFT(y))
    ; Prediccion x=série; xp=x predito a partir de nn+1
    ggg=-G[1:m+1] & print,ggg
    xp=fltarr(n) & xp[0:nn-1]=x[0:nn-1]
    for i=nn,n-1 do begin
        xp[i]=0.0
        for j=1,m do xp[i]=xp[i]+ggg[j]*x[i-j]
    endfor
    plot,t,x,xtitle= 'Dias',xrange=[0,35],/xstyle,ytitle=
'UTEC',/ystyle,YGRIDSTYLE=1,YTHICK=1.2,YTICKLEN=1,YTICKS=15 $

```



```

,XGRIDSTYLE=1,XTHICK=1.2,XTICKLEN=1,XTICKS=35;mmmmmmmmmm
mmm
    oplot,t[nn-1:n-1],xp[nn-1:n-1],color=2,psym=2
    end
'MinQua':
'Kalman_GIM':
'MEM_GIM': begin
    widget_control,/hourglass
    for iHora=0,11 do begin
        for i=0,15 do begin
            for j=0,15 do begin
                widget_control,info.aviso2,set_value='Hora
= '+string(iHora*2+1)
                x = info.Coeff[* ,iHora,i,j]
                Serie_Predita_MEM, xp,x
                info.Coeffp[* ,iHora,i,j] = xp
            endfor; j
        endfor; i
    endfor; iHora
    end
'Mapa F2crit':begin
    NT=info.GIM
    C=270;Verão=270,Outono=Primavera=240,Inverno=210
    R12=103.05;R12=SSN
    T=C*(1+0.005*R12);dado em Km
    NF=NT/1.125;NT(UT)=NF(UT)=aNF(max), a=0.1 USA,a=0.15, Usado a=0.125, NT
em UTEC=10^16e/m2
    NmF2=NF/T
    FoF2= sqrt(80.6*NmF2*10)
    Lon=info.Lon
    Lat=info.Lat
    contour,FoF2,Lon,Lat,Levels=indgen(16)*1,/fill,title='Frequencia critica F2 em MHz
' $
    + info.Horas[info.iHora] + ':00 UT'+ ' '+info.FilesCoef[info.iFile] $
    ,xtitle='W                                     MHz      E' $
    ,ytitle='LATITUDE',XRANGE=[-180,180],/XSTYLE,YRANGE=[-
90,90],/YSTYLE,XGRIDSTYLE=1,XTHICK=1.2,XTICKLEN=1,XTICKS=18 $
    ,YGRIDSTYLE=1,YTHICK=1.2,YTICKLEN=1,YTICKS=12;>>>mdc
        for j=0,14 do TV, replicate((!D.Table_Size/15)*j,30,8), 30*j+150,15
        plots,[150,30*15+150],[15,15],color=0,/device
        plots,[150,30*15+150],[15+8,15+8],color=0,/device
        for j=0,15 do plots,[30*j+150,30*j+150],[15,15+8],color=0,/device
        for j=0,15 do xyouts,100+ 30*j+5,2, j*1 ,color=0,/device
return
end
end

```

'Pred. F2crit':

```
'1 MHz ':begin
  Val=info.GIM
  A=Val*1.343
  Lon=info.Lon
  Lat=info.Lat
  contour,A,Lon,Lat,Levels=indgen(16)*13,/fill,title='Atraso em milisegundos de 1
MHz ' $
  + info.Horas[info.iHora] +':00 UT'+ ' '+info.FilesCoef[info.iFile] $
  ,xtitle='W                                     miliseg      E' $
  ,ytitle='LATITUDE',XRANGE=[-180,180],/XSTYLE,YRANGE=[-
90,90],/YSTYLE,XGRIDSTYLE=1,XTHICK=1.2,XTICKLEN=1,XTICKS=18 $
  ,YGRIDSTYLE=1,YTHICK=1.2,YTICKLEN=1,YTICKS=12;>>>mdc
    for j=0,14 do TV, replicate((!D.Table_Size/15)*j,30,8), 30*j+150,15
    plots,[150,30*15+150],[15,15],color=0,/device
    plots,[150,30*15+150],[15+8,15+8],color=0,/device
    for j=0,15 do plots,[30*j+150,30*j+150],[15,15+8],color=0,/device
    for j=0,15 do xyouts,100+ 30*j+5,2, j*13 ,color=0,/device
return

end

'10 MHz':begin
  Val=info.GIM
  A=Val*13.43
  Lon=info.Lon
  Lat=info.Lat
  contour,A,Lon,Lat,Levels=indgen(16)*100,/fill,title='Atraso em microsegundos de 10
MHz ' $
  + info.Horas[info.iHora] +':00 UT'+ ' '+info.FilesCoef[info.iFile] $
  ,xtitle='W                                     microseg E' $
  ,ytitle='LATITUDE',XRANGE=[-180,180],/XSTYLE,YRANGE=[-
90,90],/YSTYLE,XGRIDSTYLE=1,XTHICK=1.2,XTICKLEN=1,XTICKS=18 $
  ,YGRIDSTYLE=1,YTHICK=1.2,YTICKLEN=1,YTICKS=12;>>>mdc
    for j=0,14 do TV, replicate((!D.Table_Size/15)*j,30,8), 30*j+150,15
    plots,[150,30*15+150],[15,15],color=0,/device
    plots,[150,30*15+150],[15+8,15+8],color=0,/device
    for j=0,15 do plots,[30*j+150,30*j+150],[15,15+8],color=0,/device
    for j=0,15 do xyouts,100+ 31*j+5,2, j*100 ,color=0,/device
return

end

'100 MHz':begin
  Val=info.GIM
```

```

A=Val*0.1343
Lon=info.Lon
Lat=info.Lat
contour,A,Lon,Lat,Levels=indgen(16)*1,/fill,title='Atraso em microsegundos de 100
MHz ' $
+ info.Horas[info.iHora] + ':00 UT'+ ' '+info.FilesCoef[info.iFile] $
,xtitle='W microseg E' $
,ytitle='LATITUDE',XRANGE=[-180,180],/XSTYLE,YRANGE=[-
90,90],/YSTYLE,XGRIDSTYLE=1,XTHICK=1.2,XTICKLEN=1,XTICKS=18 $
,YGRIDSTYLE=1,YTHICK=1.2,YTICKLEN=1,YTICKS=12;>>>mdc
for j=0,14 do TV, replicate((!D.Table_Size/15)*j,30,8), 30*j+150,15
plots,[150,30*15+150],[15,15],color=0,/device
plots,[150,30*15+150],[15+8,15+8],color=0,/device
for j=0,15 do plots,[30*j+150,30*j+150],[15,15+8],color=0,/device
for j=0,15 do xyouts,100+ 30*j+5,2, j*1 ,color=0,/device
return

end

'1 GHz':begin
Val=info.GIM
A=Val*1.343
Lon=info.Lon
Lat=info.Lat
contour,A,Lon,Lat,Levels=indgen(16)*13,/fill,title='Atraso em nanosegundos de 1
GHz ' $
+ info.Horas[info.iHora] + ':00 UT'+ ' '+info.FilesCoef[info.iFile] $
,xtitle='W nanoseg E' $
,ytitle='LATITUDE',XRANGE=[-180,180],/XSTYLE,YRANGE=[-
90,90],/YSTYLE,XGRIDSTYLE=1,XTHICK=1.2,XTICKLEN=1,XTICKS=18 $
,YGRIDSTYLE=1,YTHICK=1.2,YTICKLEN=1,YTICKS=12;>>>mdc
for j=0,14 do TV, replicate((!D.Table_Size/15)*j,30,8), 30*j+150,15
plots,[150,30*15+150],[15,15],color=0,/device
plots,[150,30*15+150],[15+8,15+8],color=0,/device
for j=0,15 do plots,[30*j+150,30*j+150],[15,15+8],color=0,/device
for j=0,15 do xyouts,100+ 30*j+5,2, j*13 ,color=0,/device
return

end

'10 GHz':begin
Val=info.GIM
A=Val*13.43
Lon=info.Lon
Lat=info.Lat

```

```

    contour,A,Lon,Lat,Levels=indgen(16)*100,/fill,title='Atraso em picosegundos de 10
GHz ' $
    + info.Horas[info.iHora] + ':00 UT'+ ' '+info.FilesCoef[info.iFile] $
    ,xtitle='W                                     picoseg    E' $
    ,ytitle='LATITUDE',XRANGE=[-180,180],/XSTYLE,YRANGE=[-
90,90],/YSTYLE,XGRIDSTYLE=1,XTHICK=1.2,XTICKLEN=1,XTICKS=18 $
    ,YGRIDSTYLE=1,YTHICK=1.2,YTICKLEN=1,YTICKS=12;>>>mdc
        for j=0,14 do TV, replicate((!D.Table_Size/15)*j,30,8), 30*j+150,15
        plots,[150,30*15+150],[15,15],color=0,/device
        plots,[150,30*15+150],[15+8,15+8],color=0,/device
        for j=0,15 do plots,[30*j+150,30*j+150],[15,15+8],color=0,/device
        for j=0,15 do xyouts,100+ 30*j+5,2, j*100 ,color=0,/device
return
end

'print tela': begin
    info.NOut = info.NOut + 1
    OutFile = strcompress('predicao'+string(info.NOut)+'.gif')
    write_gif,OutFile,color_quan(TVRD(true=1),1,R,G,B,colors=32),R,G,B
    widget_control,info.aviso2,set_value='OUTPUT = '+OutFile
end
'annotate': annotate
'coeficientes': ; todos
'Coef(File,H)': begin
    if (info.iFile le 35)then begin
        info.NOut = info.NOut + 1
        OutFile = strcompress('predicao'+string(info.NOut)+'.txt')
        openw,lun,OutFile,/get_lun
        printf,lun,'File =',info.iFile,' Hora = ',info.Horas[info.iHora]
        for n=0,15 do begin                ;Grau
            for mm=0,n do begin ;Ordem
                m = +mm
                i = (m ge 0)? n:n+m
                j = (m ge 0)? n-m:n
                printf,lun,'n,m =
',n,m,info.Coeff[info.iFile,info.iHora,i,j]
                m = -mm
                i = (m ge 0)? n:n+m
                j = (m ge 0)? n-m:n
                printf,lun,'n,m =
',n,m,info.Coeff[info.iFile,info.iHora,i,j]
            endfor & endfor
        close,lun & free_lun,lun
        widget_control,info.aviso2,set_value='OUTPUT = '+OutFile
    end
end

```

```

        endif
    end
    'GIM(File,H)': begin ;      ; imprime tabela de GIM*10 números inteiros
        info.NOut = info.NOut + 1
        OutFile = strcompress('predicao'+string(info.NOut)+'.txt')
        openw,lun,OutFile,/get_lun
        printf,lun,'File =',info.iFile,' Hora = ',info.Horas[info.iHora]
        printf,lun,fix(info.GIM*10)
        close,lun & free_lun,lun
        widget_control,info.aviso2,set_value='OUTPUT = '+OutFile
    end
    'teste': stop,'teste'
    'sair': widget_control,event.top,/destroy
endcase
if selecao ne 'sair'then begin
    F51=(F5.1)
    SunEarth = ['sun-fixed','earth-fixed']
    GeogrGeomag = ['geographic','geomagnetic']
    widget_control,info.aviso1,set_value=SunEarth[info.SunEarth]+' /
'+GeogrGeomag[info.GeogrGeomag]
    widget_control,event.top,set_uvalue=info
endif
end

```



## APÊNDICE C

### BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Arfken, G.B. **Mathematical methods for physicists**. 4.ed. [S.l]: Academic Press, 1995.

Bent, R.B.; Llevellyn, S.K.; Walloch, M.K. **Description and evaluation of the bent ionospheric mode**. Melbourne: DBA Systems, 1972. (SAMSO-TR-72-239).

Bradford, W.; Parkinson, J.; Spilker Jr., **Global positioning system: theory and applications**. [S.l.]: AIAA, 1996.

Davies, K. **Aproximações e constantes para determinar a  $f_oF2$** . [mensagem pessoal]. Mensagem recebida em 12 jan. 2002.

De Paula, E.R. **Curso de Geofísica Espacial (GES – 201)**. Anotações de aula, 2001.

De Paula, E.R. **Predição a longo prazo de circuitos HF**. 1977. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1977.

Freeman, R. L. **Radio systems design for telecommunications (1-100 GHz)**. New York: John Wiley and Sons, 1987.

Gould, R.G.; Lum, Y.F. **Communications satellite systems: an overview of the technology**. [S.l.]: IEEE, 1976.

Kantor, I.J. **Propagação de ondas em meio magneto-ionizado (GES 406)** Anotações e material de aulas, 2001.

Kantor, I.J.; M. Fedrizzi; Paula, E. R. Total ionospheric electron content from GPS measurements over the Brazilian region. **Geofísica Internacional**, Mexico, v. 39, n. 1, p. 81-85, 1999.

Katzberg, S.J. et al. **Utilizing GPS to determine Ionospheric Delay over the Ocean**. Hampton: NASA, Dec. 1996. (NASA Technical Memorandum 4750).

Kirchhoff, V.W.J. **Introdução à geofísica espacial**. [S.l.]: Nova Estrela, 1991.

Press, H.W.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.; Flannery, B.P. **Numerical recipes in fortran**. 2.ed. London: Cambridge University Press, 1992.

Galiardi, Robert M. **Satellite communications**. Hardcover: Lifetime Learning, 1984.

Sardon, E.; Rius, A.; Zarraoa, N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning Systems observations. **Radio Science**, v.29, n.3, p. 577-586, May-June 1994.

Schaer, S. et al. **Mapping and predicting the ionosphere**. Suíça: Berna University, 1998.

Silva, A.A. **Determinação de Órbitas com o GPS através de Mínimos Quadrados Recursivos com Rotações de Givens**. 2001. Dissertação (Mestrado em Física) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2001.

Souza, J.R., **Estudo do conteúdo eletrônico total ionosférico**. 1992. 70p. (INPE–5417–TDI/481).Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.

Schaer, S. **Representação do TEC global e uso de coeficientes CODE**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida em 12 jan. 2002.



Ulrych, T.J. Maximum entropy power spectrum of truncated sinusoids, **Journal of Geophysical Resesarch**, v.77, n.8, p.1396-1400, 1972.

Wiener, N. **Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series with engineering applications**. Cambridge: MIT Press, 1949.

## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.