sid.inpe.br/mtc-m19/2012/11.19.12.07-TDI

MODELAGEM INTELIGENTE DA ANÁLISE DE TRAÇOS DE ESPECTROS ELETROMAGNÉTICOS REFLEXIVOS DA IONOSFERA, COM A APLICAÇÃO DO PARADGIMA DE LÓGICA NEBULOSA

Valdir Gil Pillat

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelo Dr. Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães, aprovada em 10 de dezembro de 2012.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3D3HARH>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
Fax: (012) 3208-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):
Presidente:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Membros:
Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)
Drª Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)
Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

sid.inpe.br/mtc-m19/2012/11.19.12.07-TDI

MODELAGEM INTELIGENTE DA ANÁLISE DE TRAÇOS DE ESPECTROS ELETROMAGNÉTICOS REFLEXIVOS DA IONOSFERA, COM A APLICAÇÃO DO PARADGIMA DE LÓGICA NEBULOSA

Valdir Gil Pillat

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelo Dr. Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães, aprovada em 10 de dezembro de 2012.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3D3HARH>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P644m

Pillat, Valdir Gil.
Modelagem inteligente da análise de traços de espectros eletromagnéticos reflexivos da ionosfera, com a aplicação do paradgima de lógica nebulosa / Valdir Gil Pillat. – São José dos Campos : INPE, 2012.
xxii + 95 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/11.19.12.07-TDI)

Tese (Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
Orientador : Dr. Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães.

1. lógica nebulosa. 2. inteligencia artificial. 3. ionossonda. 4. ionosfera. 5. relação nebulosa. . I.Título.

CDU 004.8:550.388

Copyright © 2012 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, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 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, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, 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 (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de ***Doutor(a)*** em

Computação Aplicada

Dr. Stephan Stephany

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães

Orientador(a) / IEAv/DCTA / SJCampos - SP

Dr. Solon Venâncio de Carvalho

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Humberto Andrade Sobral

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. João Manoel Losada Moreira

Convidado(a) / UFABC / São Paulo - SP

Dr. Roberto Schirru

Convidado(a) / UFRJ / Rio de Janeiro - RJ

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

Aluno (a): ***Valdir Gil Pillat***

São José dos Campos, 10 de Dezembro de 2012

A meus pais Valdir (em memória) e Ivone, e a meu irmão Vilson

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães, pelo incentivo e o empenho com que dedicou seu tempo na orientação deste trabalho e, aos valores na qual impensavelmente me ensinou, onde o esforço, o compromisso e a dedicação ao emprego e a transmissão do conhecimento levarei como exemplos para a vida.

Agradeço ao Dr. Paulo Roberto Fagundes e ao Dr. José Demísio Simões da Silva, pelas orientações e sugestões que contribuíram na elaboração deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, por ter me possibilitado ingressar no programa de doutorado em Computação Aplicada e a todos os professores e pesquisadores do Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, LAC, que enriqueceram o meu conhecimento e que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

À Universidade do Vale do Paraíba, que através do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IP& D) forneceu infraestrutura científica e condições materiais e humanas que contribuíram para a realização deste trabalho. Ao grupo de pesquisadores do laboratório de Física e Astronomia, pelo auxílio e companheirismo.

A toda minha família, que sempre me apoiou e me fez acreditar, que com fé e luta os sonhos se tornam possíveis. E também aos meus colegas de curso, aos meus amigos e a todos aqueles que me apoiaram e me acompanharam por estes anos. Finalmente, agradeço ao Senhor meu Deus, pelo conselho certo e a prudência necessária. Por estar dirigindo os meus passos para que eu possa compreender os meus caminhos. Por dar-me justiça e equidade. Por continuar a fazer com que meus planos tragam abundância. Por dar-me a vida e a glória. Por vigiar-me e preservar-me da angústia. Por estar sempre preparando meu cavalo nos dias de batalha; pois a minha vitória depende do Senhor. Por evitar que eu afadigue para enriquecer, e que eu aplique isto ao meu espírito. Por dar-me sabedoria e vigor. Porém, eu ainda necessito pedir-Lhe duas coisas, por favor, não me negue antes de minha morte, não me dê nem pobreza e nem riqueza, mas conceda-me o pão que me é necessário. Obrigado Senhor!

RESUMO

A ionosfera é a porção ionizada da atmosfera terrestre e o seu estudo é muito importante devido à sua influência na transmissão de sinais de satélite. A ionossonda digital é um dos instrumentos que mede a densidade eletrônica da baixa ionosfera, através de rádio frequência, obtendo como resultado espectros de frequência em função da altura chamados ionogramas. A ionosfera pode ser analisada estudando-se alguns parâmetros ionosféricos que indicam a altura da base da região F(h'F), a frequência com o pico de densidade eletrônica na região F (foF2) e a altura do pico de densidade eletrônica na região F(hpF2). Até o presente momento, estes parâmetros são extraídos dos ionogramas de uma forma manual e dependente da interpretação de um analista. Devido à grande quantidade de dados coletados pelas ionossondas necessita-se de uma automatização deste processo de coleta e análise. Este trabalho apresenta um modelo de apoio à decisão para o processo de análise dos dados coletados por ionossondas com o propósito de elevar a capacidade de compilação dos dados ionosféricos. Este modelo incorpora os aspectos cognitivos dos especialistas. A implementação do modelo de apoio à decisão foi estruturada em duas partes: a primeira parte propõe uma abordagem de lógica nebulosa, relação nebulosa, para o problema de associação de dados, classificando os dados conforme a camada da ionosfera que ele pertence e identificando o traço ionosférico da região F. O objetivo desta parte é aprimorar as fases de observação e de orientação do modelo pela otimização do processamento dos dados de modo que o modelo processe de forma isolada cada região ionosférica. A segunda parte propõe o emprego do ajuste de curva polinomial utilizando o método de eliminação de Gauss para resolver o sistema linear de funções e determinar os parâmetros para ajustar uma curva sobre o traço ionosférico e utilizá-la como guia na extração dos parâmetros ionosféricos. Esta abordagem agrega as heurísticas empregadas pelos especialistas para apoiar a classificação e a identificação dos parâmetros ionosféricos. Os benefícios operacionais obtidos foram significativos. Reduziu-se a interferência humana no processo de análise dos dados, minimizando a dependência do conhecimento no treinamento e na experiência do analista para extrair os parâmetros ionosféricos a partir dos ionogramas. Criou-se assim um paradigma novo e original que auxilia o analista de clima espacial a obter resultados melhores, mais confiáveis e com homogeneidade de tratamento na análise em um tempo menor.

MODELING INTELLIGENT ANALYSIS OF TRACE OF IONOSPHERE ELECTROMAGNETIC REFLECTIVE SPECTRA, WITH THE APPLICATION OF FUZZY LOGIC PARADIGM

ABSTRACT

The ionosphere is the ionized portion of Earth's atmosphere and its study is very important due, as for instance, to its influence on the satellite signal transmission. The digital ionosonde is a sensor that measures the electronic plasma density on the lower ionosphere. This measurement is performed by radio frequency, and generates frequency spectra as a function of height, the so called ionograms. Some of the ionosphere parameters that may be drawn from the ionogram and allow the understanding of the ionosphere phenomenology is: the base height (h'F), the electron density peak frequency (foF2) and the electron density peak height (hpF2) of the F region. Up to recently these parameters are extracted from the ionograms manually, which means that this operation is subjected to the interpretation of a human analyst. Due to a great amount of collected data a standardization of gathering and processing becomes necessary for this process. This work presents a computational model that aims to raise the compilation capacity for analysis of the ionosonde data. This computational model incorporates cognitive aspects of the specialist reasoning. This computational model development was based in two parts. The first part uses fuzzy logic paradigm, more specifically the fuzzy relation, to solve the association process of categorizing data according to the ionosphere region in which it is located. In this way, it identifies the F ionospheric trace from which the data is part of. The objective of this part is to allow the model to isolate the desired ionospheric region, more precisely the F trace region. The second part uses a polynomial fit based on the Gauss elimination to allow the ionospheric parameter extraction. This development joint together the heuristics used by specialists to classify and identify parameters from the ionospheric data. The operational benefits are significant. The human interference in the data analysis process was greatly reduced. That has greatly reduced the dependency of the analysis on knowledge perception and human experience, and increased consistency of the analysis. By standardizing the analysis, the human mood dependency was minimized. A new and original paradigm was created to perform the space weather analysis that allow for better results, reliability and consistency with greatly reduced processing time, given the huge amount of data collected.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 Distribuição vertical da densidade eletrônica na atmosfera terrestre e as camadas ionosféricas para a atividade solar máxima e mínima. 2
1.2 Exemplo de um ionograma completo, arquivo tipo MD4, gerado pelo programa do Fabricante da CADI.(Imagem não editável). 5
1.3 Exemplo de um ionograma com 6 frequências, arquivo tipo MD3, gerado pelo programa do Fabricante da CADI.(Imagem não editável). 5

2.1 Fotografia da Digissonda^{TM} DGS256, de São Luiz do Maranhão. 12
2.2 Digissonde Portable Sounder (DPS). 14
2.3 Observatórios com Digissondas^{TM}. 14
2.4 Sistema AIS-INGV. 15
2.5 Fluxo dos dados da AIS-INGV e Autoscala. 16
2.6 Sistema de transmissão da ionossonda digital CADI. 18
2.7 Antena de transmissão e recepção da CADI instalada em São José dos Campos. 18
2.8 Interface gráfica utilizada para selecionar o observatório, data e tipo de arquivo que deve ser carregado para redução de dados. 20
2.9 Exemplo de um ionograma obtido pela ionossonda digital do tipo CADI em 02 de outubro de 2000, São José dos Campos, e visualizado através do programa "Univap Digital Ionosonde Data Analysis"(UDIDA). 21
2.10 Interface gráfica utilizada para selecionar os parâmetros no ionograma. . 21
2.11 Interface gráfica utilizada para visualizar os dados selecionados no ionograma. 21

3.1 Variável linguística "Erro em distância". 24
3.2 Diagrama de Zadeh para o conjunto nebuloso B = números pequenos. . . 27
3.3 Conjunto nebuloso A e seu corte-0.5 28
3.4 Estrutura Sistêmica de Inferência Nebulosa. 32

4.1 Arquitetura da rede neural utilizada para a determinação do valor médio mensal do parâmetro crítico foF2. 36
4.2 Comparação do foF2 calculado pela rede neural com os dados observados em Poitiers (França) durante todos os meses de 1990. A variação do índice da atividade Solar R12 também é mostrado. 37
4.3 Grafo arquitetural de uma rede de Hopfield consistindo de N=4 neurônios. 38

4.4 Exemplo da utilização do programa ARTIST sobre ionogramas obtidos pela Digissonda^{TM} de Jicamarca em 12 de maio de 2009, onde as linhas pretas indicam o traço calculado pelo ARTIST e a tabela ao lado do ionograma são os parâmetros ionosféricos determinados. 39
4.5 Comparação entre um ionograma original e um ionograma com a camada F destacada. Imagem não editável. 39
4.6 Exemplo da estrutura de uma rede supervisionada multicamada usando o algoritmo de retro-propagação. O sinal de erro são as linhas tracejadas. 40
4.7 Exemplo do alfa-cut de um conjunto nebuloso, onde o universo de discurso representa a quantidade de suporte. 41
4.8 O resultado da identificação do traço e extração dos parâmetros ionosféricos automática. 42
4.9 Identificação da camada Es utilizando lógica nebulosa. O ionograma do canto esquerdo superior é o ionograma original, depois é a identificação da região E, em seguida é encontrada a curvatura e finalmente a identificação da Es. 43

5.1 Exemplo de ionograma obtido em São José dos Campos em 03 de dezembro de 2000, com as interferências e os parâmetros ionosféricos indicados. 46
5.2 Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 03 de dezembro de 2000: a) período noturno 00:00 UT; b) período noturno 06:00 UT; c) período matutino 12:00 UT; d) período matutino 18:00 UT. 47
5.3 Exemplo da visualização da variação dos parâmetros ionosféricos (h'F, hpF2 e foF2) para o dia 03 de dezembro de 2000 em São José dos Campos. A região cinza da imagem representa o período noturno. 48
5.4 Exemplo de um ionograma obtido pela ionossonda digital do tipo CADI em 02 de outubro de 2000, São José dos Campos, e visualizado através do programa UDIDA. Com os parâmetros ionosféricos, os ruídos e segunda reflexão identificados. 49
5.5 Exemplo de ionograma obtido em 01 de outubro de 2000 às 00:00 UT em São José dos Campos ionograma subdivido em retângulos homogêneos. . 49
5.6 Comparação entre o ionograma original (a), ionograma utilizando a metodologia antiga (b) e ionograma utilizando a nova metodologia que aumenta o limite de espalhamento (c). 50
5.7 Exemplo do ionograma obtido em 08 de março de 2004 as 08:00 UT em São José dos Campos, com as sub-regiões definidas de forma homogênea. 52
5.8 Ionograma com a identificação das cinco regiões com maior concentração de pontos (vermelho, verde, azul, ciã e preto) e as demais regiões válidas, em amarelo. 54

5.9 Árvores de vizinhança construídas para o ionograma obtido em 08 março de 2004 em São José dos Campos ilustrada na Figura 5.8. a) Apresenta a árvore de vizinhança superior e sua estrutura da região selecionada, sendo que as colunas significam: região selecionada, vizinho da direita na próxima altura, e vizinho da direita na mesma altura, respectivamente. b) Apresenta a árvore de vizinhança inferior e sua estrutura da região selecionada, sendo que as colunas significam: região selecionada, vizinho da esquerda na mesma altura, e vizinho da esquerda em uma altura inferior, respectivamente. 55
5.10 Exemplo do arquivo de caminho construído a partir da árvore apresentada na Figura 5.9(a). As colunas representam respectivamente os seguintes itens: região selecionada, ou início do caminho, com a sua frequência e altura inicial; quantidade de pontos do caminho; e as regiões que pertencem ao caminho, com as suas respectivas frequências e alturas iniciais. 56
5.11 Ionograma obtido em 08 de março de 2004 às 09:05 UT em São José dos Campos, com as regiões definidas como válidas para a busca do perfil da ionosfera 57
5.12 Ionograma obtido em 08 de março de 2004 às 09:05 UT em São José dos Campos, com as regiões definidas como válidas para a busca do perfil da ionosfera, aumentando a área de busca 57
5.13 Exemplos de ionogramas obtidos em São José dos Campos onde o método dos caminhos agrupam regiões incorretas para identificar o perfil da ionosfera. 58
5.14 Exemplo de utilização da relação nebulosa. a) Ilustra regiões nebulosas definidas para pontos da função. b) Ilustra região nebulosa definida sob a função da Figura 5.14a. c) Ilustração de como seria a relação nebulosa aplicada em um ionograma. 59
5.15 Exemplo utilizando os conjuntos nebulosos estáticos definidos em (PILLAT; GUIMARÃES, 2010). 59
5.16 Exemplo dos conjuntos nebulosos aplicados no ionograma obtido em 02 de outubro de 2000 às 10:00 UT com as regiões nebulosas definidas, retângulos em amarelo, e os conjuntos nebulosos calculados para altura e frequência. 64
5.17 Exemplos de ionogramas obtidos em São José dos Campos com a aplicação da relação nebulosa na identificação do perfil da ionosfera, ilustrando a importância da relação nebulosa neste processo de identificação do perfil da ionosfera comparada com o método dos caminhos ilustrado na Figura 5.13. 65

5.18 Exemplos de ionogramas obtidos em São José dos Campos com a aplicação da relação nebulosa na identificação do perfil da ionosfera, ilustrando o ganho na identificação utilizando relação nebulosa comparada com a Figura 5.15. 66
5.19 Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 24 de agosto de 2001 com a curva do polinômio traçada sobre o traço da camada F e os parâmetros ionosféricos identificados por cruz. 71
5.20 Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 08 de julho de 2003 com a curva do polinômio traçada sobre o traço da camada F e os parâmetros ionosféricos identificados por cruz. 71
5.21 Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 08 de julho de 2003 com a curva do polinômio traçada sobre o traço da camada F e os parâmetros ionosféricos identificados por cruz. 72
5.22 Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 08 de julho de 2003 com a curva do polinômio traçada sobre o traço da camada F e os parâmetros ionosféricos identificados por cruz. 72

6.1 Ferramenta utilizada para comparar os dados extraídos entre dois analistas 75
6.2 Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 24 de agosto de 2001 em São José dos Campos. 77
6.3 Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 08 de junho de 2003 em São José dos Campos. 79
6.4 Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 03 de janeiro de 2004 em São José dos Campos. 80
6.5 Comparação entre a média dos parâmetros ionosféricos foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente, do mês de janeiro de 2004, em São José dos Campos. 82
6.6 Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 16 de agosto de 2003 em Palmas. 84

6.7 Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 26 de março de 2004 em Palmas. 85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	–	Autoscaling Condence Level
ADC	–	Analog Digital Converter
ADEP	–	ARTIST Data Editing and Printing
AIS-INGV	–	Advanced Ionospheric Sounder - Istituto Nazionali di Geofisica e Vulcanologia
ARTIST	–	Automatic Real-Time Ionogram Scaler with True-height
BOA	–	Bissetor de Área
CADI	–	Canadian Advanced Digital Ionosonde
COA	–	Centro de áreas
CoG	–	Centro de Gravidade
COGS	–	Centro de Gravidade para Singletons
COM	–	Centro dos Máximos
CTM	–	Code and Timing Board
D/A	–	Digital/Analógico
DC	–	Direct Current
DGS256	–	Digissonda
DPS	–	Digisonde Portable Sounder
Es	–	camada E-esporádica
FSY	–	Frequency Synthesis Board
GPS	–	Global Position System
IC	–	Inteligência Computacional
INGV	–	Istituto Nazionali di Geofisica e Vulcanologia
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LGA	–	Laboratório di Geofísica Ambientale
LM	–	Left Most Maximum
MLP	–	Rede Multicamadas com função de ativação sigmoidal
MoM	–	Mean of Maximum
PC	–	Personal Computer
PWS	–	Power Supply Board
R12	–	Número de manchas solares
RBC	–	Raciocínio Baseado em Casos
RBF	–	Rede Neural com Funções de Ativação de Base Radial
RCV	–	Receiver Board
RCVR	–	Receiver
RF	–	Rádio Frequência
RM	–	Right Most Maximum
RNA's	–	Redes Neurais Artificiais
SDD	–	Síntese Digital Direta
SWF	–	Switching Filters Boards
SYE	–	Synthetic Echo Board
UDIDA	–	UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis

UMLCAR – University of Massachusetts Lowell's Center for Atmospheric Research
UNIVAP – Universidade do Vale do Paraíba
UT – Universal Time

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Considerações Iniciais 1
1.2 Linha do tempo para extração automática de parâmetros ionosféricos do ionograma 6
1.3 Objetivo 7
1.4 Motivações 8
1.5 Contribuições 9
1.6 Organização da Tese 10

2 IONOSSONDA DIGITAL 11
2.1 Digissonda 12
2.2 "Advanced Ionospheric Sounder - Istituto Nazionali di Geofisica e Vulcanologia" (AIS-INGV) 15
2.3 "Canadian Advanced Digital Ionosonde" (CADI) 17
2.3.1 UDIDA 19
2.4 Conclusões 22

3 LÓGICA NEBULOSA 23
3.1 Introdução 23
3.2 Conceitos Básicos 24
3.3 Relação Nebulosa 28
3.4 Sistema de Inferência Nebulosa 31
3.5 Conclusões 34

4 ESTADO DA ARTE 35
4.1 Redes Neurais 35
4.2 Lógica nebulosa 40
4.3 Reconhecimento de imagens 42
4.4 Conclusões 44

5 METODOLOGIA DO MODELO PROPOSTO 45
5.1 Conceitos Básicos 45
5.2 Remoção dos ruídos 48

5.3 Identificação do grupo de retângulo com maior concentração de pontos . 53
5.4 Identificação da região que contem o perfil da ionosfera 54
5.5 Justificativa da aplicação da Relação Nebulosa 58
5.5.1 Ajuste dos conjuntos nebulosos 60
5.6 Preparar os dados para extração dos parâmetros ionosféricos 67
5.6.1 Cálculo do polinômio utilizado na extração dos parâmetros ionosféricos do ionograma 68
5.6.2 Extração dos parâmetros ionosféricos utilizando o polinômio 70
5.7 Conclusões 73

6 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO E OS OBTIDOS MANUALMENTE POR UM ANALISTA 75
6.1 Comparação da extração dos parâmetros ionosféricos de maneira manual versus automática em ionogramas obtidos em São José dos Campos . . . 77
6.2 Comparação da extração dos parâmetros ionosféricos de maneira manual versus automática em ionogramas obtidos em Palmas 83
6.3 Conclusões 86

7 CONCLUSÕES 87
7.1 Sugestões 88

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O surgimento da atmosfera terrestre aconteceu a, aproximadamente, 5 bilhões de anos a partir da liberação de gases do interior da Terra recém-criada. É muito provável que a produção de oxigênio se estabilizou a partir do surgimento de algas que sintetizavam suas moléculas orgânicas através do processo de fotossíntese (ANTHES et al., 1981). Alguns parâmetros físicos são utilizados para descrever a atmosfera, como pressão (p), densidade de massa (ρ) ou densidade numérica (n), e temperatura (T), os quais estão relacionados entre si através da equação de estado para gases ideais (BRASSEUR; SOLOMON, 2005).

$$p = \frac{\rho}{m} kT = nkT, \tag{1.1}$$

onde m é a massa do constituinte envolvido e k denota a constante de Boltzmann.

A atmosfera terrestre geralmente é dividida em duas grandes áreas de estudo: atmosfera neutra e atmosfera ionizada. A atmosfera neutra pode ser estudada devido à sua composição química ou variação da temperatura (TASCIONE, 1988). A atmosfera ionizada é dividida em ionosfera e magnetosfera (CHAPMAN; COWLING, 1939). Este trabalho tem como região de estudo a ionosfera. A ionosfera está situada aproximadamente entre 70 km e 1000 km de altitude e sua formação é devida principalmente ao mecanismo de foto-ionização, processo químico que ocorre quando a energia enviada pelo Sol colide com moléculas na atmosfera terrestre, conforme mostra a Tabela 1.1, onde ν é a frequência da radiação (em s^{-1} ou Hertz), h é a constante de Planck, que é igual a $6,626x10^{-34}Js$. A ionosfera pode ser classificada em camadas concêntricas da superfície da Terra de acordo com seus níveis de densidade eletrônica, (D [70 a 90 km], E [90 a 150 km] e F [150 a 1000 km]), conforme ilustra a Figura 1.1 (BITTENCOURT, 1996).

Tabela 1.1 - Foto-ionização, reações íon-moléculas e recombinação elétron-íon (Regiões E e F), onde (a) é a produção e (b) é a perda. (SCHUNK; NAGY, 2000)

$O + h\nu \rightarrow O^+ + e$ (a)
O_2+h$\nu \rightarrow O_2^+ + e$ (a)
N_2+h$\nu \rightarrow N_2^+ + e$ (a)
$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$ (a)
$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$ (a)
$N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$ (a)
$N_2^+ + O \rightarrow O^+ + N_2$ (a)
$N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N$ (a)
$NO^+ + e \rightarrow N + O$ (b)
$O_2^+ + e \rightarrow O + O$ (b)
$N_2^+ + e \rightarrow N + N$ (b)

Figura 1.1 - Distribuição vertical da densidade eletrônica na atmosfera terrestre e as camadas ionosféricas para a atividade solar máxima e mínima.
Fonte: Pillat (2006)

O estudo dessa região da atmosfera pode ser realizado utilizando equipamentos em solo, tais como: ionossondas, radares de espalhamento coerente e incoerente, GPS e equipamentos ópticos. Um dos equipamentos mais utilizados para estudar a ionosfera é um sistema de radar chamado ionossonda.

Os sinais transmitidos pela ionossonda são refletidos quando a frequência transmitida for igual à frequência angular do plasma (ω), dado por:

$$\omega = \sqrt{n_e e^2 / m_e \epsilon_0}, \tag{1.2}$$

onde, n_e é o número de elétrons, e é a carga do elétron, m_e é a massa do elétron e ϵ_0 é a permissividade do meio, assumida como sendo a do vácuo. A partir da medida do tempo decorrido entre a transmissão e a recepção do sinal e assumindo-se que a onda se propaga com a velocidade da luz no vácuo calcula-se a altura onde ocorre à reflexão.

Atualmente existem vários tipos de ionossonda utilizados no estudo da ionosfera. Neste trabalho são mostrados três destes tipos:

- Digissonda^{TM} - fabricada pela "University of Massachusetts Lowell's Center for Atmospheric Research" (UMLCAR). O seu hardware é robusto e como consequência seu custo é maior. Acompanhando a Digissonda^{TM} existe um software "Automatic Real-Time Ionogram Scaler with True-height" (ARTIST) que realiza a visualização e extração de informações do ionograma. Esta Digissonda^{TM} é melhor detalhada na Seção 2.1;

- "Canadian Advanced Digital Ionosonde" (CADI) - fabricada pela "Canadian Network for Space Research". Possui um hardware simples concentrando o processamento em um microcomputador anexo. Esta ionossonda vem acompanhada do software chamado "cadirun" que permite apenas visualizar o ionograma. Esta ionossonda é melhor detalhada na Seção 2.3; e

- "Advanced Ionospheric Sounder - Istituto Nazionali di Geofisica e Vulcanologia"(AIS-INGV) - fabricada pelo "Istituto Nazionali di Geofisica e Vulcanologia" (INGV). Acompanhando essa ionossonda existe um software denominado Autoscala que permite extrair automaticamente as principais características ionosféricas de ionogramas. Esta ionossonda é melhor

detalhada na Seção 2.2.

A ionossonda utilizada neste trabalho é a CADI, a qual pertence ao Laboratório de Física e Astronomia da "Universidade do Vale do Paraíba" (UNIVAP). Atualmente, o laboratório opera três ionossondas digitais, sendo que as ionossondas foram estrategicamente posicionadas quase alinhadas ao longo do meridiano magnético: São José dos Campos (SP), operando desde 2000, Palmas (TO) e Manaus (AM), ambas operando desde 2002. A CADI possibilita realizar observações em dois modos diferentes:

a) O primeiro modo varre 180 frequências no intervalo de 1 a 20 MHz, sendo que a coleta destes dados ocorre em um intervalo de tempo de 300 segundos (Figura 1.2). O arquivo gerado desta forma é chamado MD4 (CANADIAN..., 1997).

b) O segundo modo varre apenas 6 frequências diferentes, a saber: 3, 4, 5, 6, 7, 8 MHz. Sendo que a coleta destes dados ocorre em um intervalo de tempo de 100 segundos (Figura 1.3). O arquivo gerado desta forma é chamado MD3. Este segundo modo de varredura apesar da baixa resolução em frequência apresenta uma melhor resolução temporal o que permite o acúmulo de dados por frequência individual para intervalos de tempo longo (CANADIAN..., 1997).

Um ionograma é obtido através da plotagem do espectro de frequência versus altura calculada da ionosfera.

Os dados adquiridos por esta ionossonda são armazenados em arquivos com uma estrutura de forma tal a poder identificar o ano, mês e dia em que foi realizada a aquisição, e assim pode-se construir facilmente um banco de dados. A estrutura do nome dos arquivos obtidos é: amhhhh.MDt onde a = ano, m=mês, hhhh (hora e minutos) e t = tipo (3 ou 4). As extensões MD4 e MD3 são designadas para as varreduras completas e varreduras com alta resolução temporal, respectivamente. No final de um dia completo de observação são armazenados 24 arquivos do tipo MD4 e 24 do tipo MD3, sendo cada arquivo relativo a uma hora completa de observação. Desta forma cada arquivo do tipo MD4 agrupa 12 ionogramas completos com 180 frequências e o arquivo do tipo MD3 agrupa 36 ionogramas com apenas 6 frequências. Portanto em um mês (30 dias) são obtidos 1440 arquivos, ou seja, 8640 ionogramas completos. Ressalta-se aqui o volume de dados a serem analisados.

Figura 1.2 - Exemplo de um ionograma completo, arquivo tipo MD4, gerado pelo programa do Fabricante da CADI.(Imagem não editável).

Figura 1.3 - Exemplo de um ionograma com 6 frequências, arquivo tipo MD3, gerado pelo programa do Fabricante da CADI.(Imagem não editável).

A ionossonda CADI vem acompanhada por uma ferramenta que permite visualizar os ionogramas de maneira individual e o seu manuseio é realizado através de linha de comandos. Para realizar uma análise da ionosfera é preciso analisar um conjunto de ionogramas, conforme os apresentados nas Figuras 1.2 e 1.3. A dificuldade está no fato que são necessários vários ionogramas utilizados nessa análise. Além do que os ionogramas contêm um número grande de pontos. O estudo da dinâmica da ionosfera é realizado através da extração de alguns parâmetros que contêm a física do fenômeno. Devido à dificuldade de extração dos parâmetros ionosféricos o Laboratório de Física e Astronomia da UNIVAP desenvolveu um programa que torna mais simples a manipulação dos ionogramas e a extração dos parâmetros ionosféricos. Esta ferramenta computacional foi denominada "Univap Digital Ionosonde Data Analysis" (UDIDA) (PILLAT, 2006; PILLAT; FAGUNDES, 2004). Esta ferramenta é melhor detalhada na Seção 2.3.1.

Neste trabalho é abordada a ferramenta de redução de dados do UDIDA, pois através desta ferramenta é possível extrair os parâmetros ionosféricos que caracterizam a ionosfera. Estes parâmetros ionosféricos são: altura mínima do traço da camada F (h'F), a frequência crítica na camada F (foF2) e altura do pico de densidade eletrônica na camada F (hpF2).

1.2 Linha do tempo para extração automática de parâmetros ionosféricos do ionograma

Com o advento das ionossondas digitais é possível obter ionogramas com uma resolução temporal significativa, entre 1 a 5 minutos. Portanto, a utilização de técnicas computacionais para visualizar, filtrar ruídos e extrair parâmetros ionosféricos do traço característico dos ionogramas, tornou-se uma ferramenta indispensável nessa área de pesquisa. Na realidade, a extração desses parâmetros automaticamente é importante para manipularmos uma grande quantidade de ionogramas.

Reinisch e Huang (1982), Huang e Reinisch (1982), Reinisch e Huang (1983) é uma sequência importante de três artigos, onde mostram-se como utilizar o processo automático de extração de parâmetros nos ionogramas digitais. Reinisch e Huang (1982) apresentaram um algoritmo automático para identificar os traços ordinários (O) e extraordinários (X) dos ionogramas digitais. Huang e Reinisch (1982) compararam técnicas de cálculo da altura real da ionosfera, utilizando os traços O e X que foram previamente identificados em ionogramas obtidos através de satélites. Reinisch e Huang (1983) utilizaram a técnica desenvolvida anteriormente para dados de satélite e aplicaram para ionossondas instaladas em solo. Nessa investigação foi possível

identificar automaticamente a região E, e as camadas E-esporádica (Es), F1 e F2. Estes artigos foram os precursores de outros trabalhos para desenvolver técnicas computacionais de inteligência artificial na extração automática de parâmetros dos ionogramas.

Galkin et al. (1996) implementou uma rede neural artificial do tipo Hopfield para reconhecimento dos traços O e X do ionograma e mostrou que esta técnica pode melhorar a extração automática dos parâmetros ionosféricos e perfil real de densidade eletrônica durante períodos geomagneticamente perturbados. Tsai e Berkey (2000) implementaram lógica nebulosa para remover os ruídos no ionograma e em seguida extrair os parâmetros ionosféricos para as Digissondas^{TM} DGS-256 localizados em médias latitudes. Os ionogramas foram convertidos em imagens na escala de cinza. Essas escalas de cinza são os parâmetros de entrada para o sistema nebuloso e utilizando a abordagem de alfa-cut obtendo subconjuntos crisp (TSOUKALAS; UHRIG, 1997). Também foi utilizado o método de λ-connected para segmentar a região E, e as camadas Es, F1 e F2 no ionograma (CHEN; ADJEI, 2009). Na defuzificação para extrair os valores dos parâmetros críticos foi utilizado o método do centro de áreas (COA), em que o centro de saída é o centro de gravidade da função de distribuição de possibilidade da ação de controle (TSOUKALAS; UHRIG, 1997). Berkey e Sikdar (2005) utilizaram a mesma técnica de (TSAI; BERKEY, 2000) para identificar a camada Es. A camada Es pode se formar a qualquer momento. Ela ocorre normalmente na altitude entre 90 e 120 km (dentro da região E) e pode se distribuir por uma grande área ou ser confinada a uma pequena região. Pezzopane et al. (2007a) publicaram uma ferramenta desenvolvida pelo Istituto Nazionali di Geofisica e Vulcanologia, baseada na técnica de reconhecimento de imagem. Esta ferramenta mostrou um bom desempenho comparado com o sistema da Digissonda, conforme apresentado em (PEZZOPANE et al., 2007a; BULLETT et al., 2010).

1.3 Objetivo

No caso do UDIDA a extração dos parâmetros ionosféricos é manual e dependente da interpretação do analista, o que pode gerar erros de interpretação e julgamento. Visando uma padronização neste processo surgiu a ideia de implementar paradigmas baseados em Inteligência Computacional (IC) para automatizar a extração dos parâmetros ionosféricos dos ionogramas gerados pela ionossonda CADI. Um processo análogo é realizado nas Digissondas^{TM} pelo programa ARTIST. O ARTIST não consegue analisar os dados obtidos pela ionossondas do tipo CADI. O objetivo deste trabalho consiste em propor e implementar um modelo baseado em paradigmas de

IC. Estes para a sistematização do processo de análise de dados com o propósito de elevar a capacidade de extração dos parâmetros ionosféricos a partir dos ionogramas. Este modelo deverá incorporar os aspectos cognitivos dos especialistas humanos.

O benefício operacional pretendido consiste em reduzir a interferência humana no processo de análise dos dados, minimizando a dependência do conhecimento, no adestramento e na experiência do analista na extração dos parâmetros ionosféricos dos ionogramas.

A implementação do modelo de apoio à decisão foi estruturada em duas etapas. A primeira etapa elimina uma grande parte dos ruídos e separa os traços da região E e F do ionograma, utilizando relação nebulosa. Na primeira etapa: a) São eliminados os ruídos do tipo 1 e tipo 2. b) Separa-se os ecos da região E e F. c) Identificam-se as regiões do ionograma com maior concentração de ecos oriundos do traço da região F. d) Agrupa as regiões próxima dessa região com maior concentração de pontos utilizando relação nebulosa. A segunda etapa envolve o ajuste polinomial de Gauss (SPERANDIO et al., 2006) sobre o traço da região F e a extração dos parâmetros foF2, h'F e hpF2. Esta abordagem agrega as heurísticas empregadas pelos especialistas para apoiar a classificação e a identificação dos parâmetros ionosféricos.

1.4 Motivações

As motivações para a realização deste estudo abrangeram diversas vertentes podendo ser resumidas nos seguintes pontos:

a) Possibilitar o mapeamento do comportamento da ionosfera em tempo real como prevenção de ações errôneas devido a informações modificadas pela ionosfera nos sinais transmitidos pelo satélite. Por exemplo, o sinal de um GPS utilizado no controle de um avião, onde o GPS informa que o avião está a 50 m do chão, mas na realidade ele está a 70 m. Como resultado o piloto teria menos pista para parar o avião, já que o avião só chegaria na pista mais a frente. Este é apenas um exemplo da influência da ionosfera nos sinais que passam por ela. Por isso é importante a extração dos parâmetros ionosféricos para ter um mapeamento melhor do que acontece com a ionosfera brasileira. No futuro se pretende incorporar esta análise para auxílio na operação com GPS.

b) Estudo da problemática associada aos modelos de apoio à decisão para o processo de classificação dos dados existentes e à compreensão dos parâ-

metros ionosféricos.

c) Utilização do conhecimento adquirido no ponto anterior para dotar um sistema nebuloso especialista que apoie a decisão de classificação, incluindo as heurísticas utilizadas pelos analistas mais experientes.

d) E exploração dos dados coletados e filtrados dos ionogramas, conjugadas com as heurísticas empregadas pelos analistas, de modo a subsidiar a classificação e identificação dos parâmetros, além de sugerir algumas ações a serem tomadas pelo analista.

1.5 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é a concepção e desenvolvimento de um modelo para o processo de classificação e identificação de parâmetros ionosféricos dos ionogramas, considerando os aspectos cognitivos, visando à subsidiar o apoio à decisão. Este modelo apresenta todas as condições para ser implementado em sistemas que utilizam a ionossonda do tipo CADI. Os passos efetuados e que permitiram concretizar estas contribuições são os seguintes:

a) Elaboração de um algoritmo para o problema de associação de dados baseado na lógica nebulosa;

b) Implementação do modelo de apoio à decisão para o processo de classificação dos ionogramas considerando os aspectos cognitivos;

c) Implementação de um "decisor" nebuloso cuja finalidade é atribuir um grau de pertinência ou de crença aos dados medidos pelas ionossondas. Nesta situação a lógica nebulosa não é utilizada na sua forma mais tradicional, isto é, na implementação de um controlador e, sim em um contexto de decisão;

d) Construção de uma tabela de regras nebulosas para apoiar a classificação e identificação dos parâmetros ionosféricos nos ionogramas, de modo a contribuir para as fases de decisão e de atuação do modelo de apoio à decisão; e

e) Aplicação do modelo de apoio à decisão proposto para o processo de extração dos parâmetros ionosféricos considerando os dados obtidos em São José dos Campos.

1.6 Organização da Tese

Esta tese está estruturada da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentada uma descrição sobre a ionossonda utilizada nesse trabalho com sua ferramenta de extração manual do parâmetros ionosféricos e duas ionossondas que possuem software de extração automática dos parâmetros ionosféricos de ionogramas.

O Capítulo 3 consiste na revisão dos conceitos básicos da lógica nebulosa visando facilitar o entendimento da notação utilizada no desenvolvimento da tese. Também são apresentados os conceitos de relação nebulosa.

O Capítulo 4 aborda uma revisão sobre as ferramentas que realizam a extração automática dos parâmetros ionosféricos.

O Capítulo 5 apresenta o modelo de apoio a decisão considerando os aspectos cognitivos e as especificidades dos traços ionosféricos.

O Capítulo 6 apresenta a validação do modelo de apoio a decisão comparando os parâmetros extraídos manualmente com os parâmetros extraídos pelo modelo.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 IONOSSONDA DIGITAL

Segundo Hargreaves (1995) desde o século 19 já se cogitava a existência de camadas eletrificadas na alta atmosfera. Marconi, em 1901, transmitiu sinais que partiram da Cornuália (Inglaterra) para Terra Nova (Canadá). Independentemente um do outro, Kennelly e Heaviside sugeriram a existência de uma camada refletora ionizada, a qual havia possibilitado a transmissão e recepção dos sinais de Marconi, apesar da curvatura da Terra. Mais tarde, em 1924, o método de sondagem ionosférica por pulsos foi utilizado por Breit e Tuve.

O uso de ionossonda no estudo da ionosfera difundiu-se rapidamente devido ao baixo custo de manutenção e boa aplicabilidade tanto como instrumento de pesquisa como de monitoração das condições ionosféricas. Com o avanço da tecnologia as ionossondas se tornaram ionossondas digitais melhorando o armazenamento das observações. Neste trabalho são apresentadas as características de três ionossondas digitais: a Digissonda^{TM}, AIS-INGV e a CADI. A Digissonda^{TM} utiliza o programa ARTIST para extração automática dos parâmetros ionosféricos. A AIS utiliza o programa Autoscala para extração automática dos parâmetros ionosféricos. A CADI é a ionossonda utilizada neste estudo e não possui uma ferramenta tão avançada para extração dos parâmetros ionosféricos. Grupos brasileiros como o laboratório de física e astronomia da UNIVAP e o grupo IONO do INPE, possuem este tipo de ionossonda para estudos ionosféricos.

O estudo da ionosfera é importante devido à influência que ela exerce na transmissão de sinais que se propagam por ela, ou seja, os sinais enviados e recebidos pelos satélites. A ionosfera sofre forte influência das atividades solares ao ocorrer uma explosão solar, a matéria é lançada para o espaço e ao chegar à atmosfera terrestre provoca diversas reações químicas na ionosfera e assim surgem às irregularidades ionosféricas (SCHUNK; NAGY, 2000). Devido a estas irregularidades ionosféricas um sinal pode ser atrasado ou bloqueado. Um exemplo da tecnologia que pode ser afetada pelas irregularidades ionosféricas é o GPS. Quando existem estas irregularidades ionosféricas o sinal do GPS pode ser alterado passando informações erradas, ou mesmo, nenhuma informação, para seus receptores no solo. Isto pode ser um problema quando o GPS é utilizado, por exemplo, para posicionamento de uma plataforma de petróleo em alto mar, pois uma mudança brusca de posicionamento da plataforma pode romper dutos. Quando ocorrem estas irregularidades ionosféricas os equipamentos de posicionamento são desligados para evitar este tipo de acidente. O estudo do comportamento da ionosfera pode ajudar e reduzir estes desligamentos através da

compreensão mais detalhada das irregularidades ionosféricas.

2.1 Digissonda

Este trabalho é baseado nos dados obtidos pela ionossonda CADI. No entanto, é importante do ponto de vista metodológico descrever algumas características da Digissonda^{TM}.

A Digissonda^{TM} trata-se de uma ionossonda digital desenvolvida pela "University of Massachusetts Lowell, Center for Atmospheric Research" (UMLCAR). Atualmente existem dois modelos de Digissonda^{TM} operando: DGS256 e a "Digisonde Portable Sounder" (DPS). A DPS é uma versão compacta da DGS256.

A DGS256 é constituída por um chassi o qual contém o sintetizador de frequência, o transceptor, o analisador espectral, unidades de tempo curto, o computador controlador e o computador de saída. Estes itens não foram identificados pelo autor no trabalho original (BERTONI, 1998). O controlador de processamento é o cérebro do sistema da Digissonda^{TM}. Na Figura 2.1 é mostrada a DGS256 de São Luís do Maranhão, de propriedade do INPE. A maior parte das informações sobre detalhes da DGS256 podem ser encontradas em (BULLETT, 1994).

Figura 2.1 - Fotografia da Digissonda^{TM} DGS256, de São Luiz do Maranhão.
Fonte: Bertoni (1998)

O computador de entrada controla integralmente a operação do processador, fazendo a varredura da cronometragem, gravando a data e programando as operações. O computador de entrada inicia todos os ionogramas e medidas de deriva. Este,

especifica, primeiramente, informações sobre frequência de sondagem, frequência de repetição de pulso, sequência de antenas receptoras, parâmetros de integração espectral e número de pulsos. Depois, inicia uma medição. Os circuitos de processamento de sinal e cronometragem então realizam a sondagem indicada e transferem os dados para o computador de saída. Essa sequência é repetida para cada frequência no ionograma.

Do computador de saída, depois de cada integração coerente, o espectro digital multi-canal de fase e amplitude é transferido para o processamento pelo "Automatic Real-Time Ionogram Scaler with True-height" (ARTIST), o qual é uma coleção de programas que rodam em computador pessoal. O espectro do Processador é, então, analisado e arquivado em mídias digitais.

A primeira função do ARTIST é produzir parâmetros de ionograma reduzidos a partir da potência de sinal versus dados de altura e frequência do ionograma - parâmetros reduzidos de frequência (foF2, foF1, foE, foEs etc.), de altura (h'F, h'E, h'Es etc.), fatores de propagação oblíqua (MUF, M3000) bem como a curva h'(f) de altura virtual versus frequência (BERTONI, 1998).

Segundo Bertoni (1998) a equipe da Linha de Pesquisa IONO do INPE vem percebendo que, apesar de o conjunto dos dados de ionogramas serem bons, e estarem sendo bem aproveitados para vários estudos, quase sempre necessitam da intervenção manual corretiva, durante o pós-processamento, efetuado por um software de editoração dos arquivos de dados gerados pelo ARTIST. Este software chama-se ARTIST "Data Editing and Printing" (ADEP). Ele permite editar a curva de altura virtual x frequência de sondagem, traçada pelo ARTIST.

A DGS256 trabalha em diferentes modos, a saber, de ionograma, de deriva e de frequência fixa. No modo de ionograma é feita a varredura de frequência, em geral de 1 a 20MHz, com incrementos que podem variar entre 5, 10, 25, 50, 100 ou 200kHz.

O objetivo do projeto da DPS, Figura 2.2, foi desenvolver sondas ionosféricas que podem automaticamente coletar e analisar medidas ionosféricas em locais remotos com a finalidade de selecionar frequências de funcionamento ideal para a comunicação obliquamente ou caminhos de propagação de radar. Foi desenvolvido um software com o propósito de controlar a Digissonda^{TM} em tempo real. Portanto a DPS executa todas as funções da DGS256 em um pacote menor e de baixa potência.

Na Figura 2.3 são ilustrados os locais onde as Digissondas^{TM} estão instaladas. Ob-

serve que a Digissonda^{TM} é um equipamento bastante utilizado pelo mundo.

Figura 2.2 - Digissonde Portable Sounder (DPS).
Fonte: Reinisch (2009)

Figura 2.3 - Observatórios com Digissondas^{TM}.
Fonte: Reinisch (2009)

O problema é que o ARTIST só processa dados obtidos pela Digissonda^{TM}, portanto não pode ser aplicado aos dados obtidos pela ionossonda CADI e a ideia desse trabalho é desenvolver e implementar uma metodologia semelhante ao do ARTIST para a ionossonda digital CADI, utilizando uma abordagem de lógica nebulosa para realizar este processo como será apresentado no Capítulo 5.

2.2 "Advanced Ionospheric Sounder - Istituto Nazionali di Geofisica e Vulcanologia" (AIS-INGV)

A "Advanced Ionospheric Sounder - Istituto Nazionali di Geofisica e Vulcanologia" (AIS-INGV) trata-se de uma nova ionossonda digital, desenvolvida pelo "Laboratório di Geofísica Ambientale" (LGA) do "Istituto Nazionale di Geofísica e Vulcanologia" (INGV). Essa ionossonda é importante para esse estudo, pois ela possui características similares a Digissonda. Esta ionossonda também possui um software de extração automática dos parâmetros ionosféricos dos ionogramas obtidos por essa ionossonda, denominado Autoscala.

A AIS-INGV é constituída por um chassi que é visível no centro da Figura 2.4 as placas incluídas nesse chassi são: "Analog Digital Converter" (ADC), "Switching Filters Boards" (SWF), "Receiver Board" (RCV), "Frequency Synthesis Board" (FSY), "Code and Timing Board" (CTM), "Synthetic Echo Board" (SYE), "Power Supply Board" (PWS). Além desse chassi também é necessário um computador e duas antenas (transmissão e recepção) (ZUCCHERETTI et al., 2003; AROKIASAMY et al., 2002).

Figura 2.4 - Sistema AIS-INGV.
Fonte: Arokiasamy et al. (2002)

O fluxo dos dados dessa ionossonda é apresentada na Figura 2.5, conforme estrutura planejada em Tucumán (PEZZOPANE et al., 2007b).

A ionossonda é completamente programável e a aquisição de dados, controle, armazenamento e processamento on-line são suportados por um PC (AROKIASAMY et al.,

2002; ZUCCHERETTI et al., 2003). O produto do processo de sondagem é um ionograma *raw* que é arquivado para ser processado pelo Autoscala operando em outro PC. As características ionosféricas dadas automaticamente como saída pelo Autoscala são foF2, MUF(3000)F2, M(3000)F2, fxI, foF1, ftEs e h'Es (PEZZOPANE et al., 2007b). O Autoscala é baseado sobre uma técnica de reconhecimento de imagem, ele não usa informações sobre polarização, e pode então ser aplicado para qualquer tipo de sistema de antena.

Figura 2.5 - Fluxo dos dados da AIS-INGV e Autoscala.
Fonte: Pezzopane et al. (2007b)

Atualmente o Autoscala é aplicado sobre ionogramas gravados pela AIS-INGV (PEZZOPANE et al., 2007a; SCOTTO, 2001; BULLETT et al., 2010). Portanto, para que o Autoscala processe dados de outras ionossondas é necessário que os dados sejam transformados para um formato reconhecido pelo programa. Como a ideia desse trabalho é desenvolver e implementar um sistema que realize a extração automática dos parâmetros ionosféricos dos ionogramas obtidos pela ionossonda CADI. Esse sistema serve como referência para validar o desenvolvimento desse novo modelo proposto por esse trabalho, onde também não são utilizadas informações sobre a polarização dos ecos e como consequência pode ser aplicado a ionogramas obtidos por diferentes arranjo de antenas. A grande diferença entre o modelo proposto e o Autoscala é o método utilizado para trabalhar com os dados, enquanto no Autoscala são utilizadas

técnicas de reconhecimento de imagens, no modelo proposto são utilizadas técnicas nebulosas no auxílio da extração dos parâmetros ionosféricos de ionogramas.

2.3 "Canadian Advanced Digital Ionosonde" (CADI)

A "Canadian Advanced Digital Ionosonde" (CADI) trata-se de uma ionossonda digital avançada, desenvolvida pela Rede Canadense de Pesquisa Espacial. Esta pode ser empregada tanto para monitoramento ionosférico rotineiro, como para pesquisa científica, e seu sistema de sondagem integra técnicas de codificação de fase e, também, eletrônica de estado sólido.

Com o sistema da CADI podem-se determinar vários parâmetros, como o atraso do eco refletido (altitude) versus frequência, fase e amplitude do eco, ângulo de chegada e polarização do eco (MACDOUGALL et al., 1995; CANADIAN..., 1997). A ionossonda digital CADI consiste dos seguintes elementos funcionais básicos:

a) O cartão de Síntese Digital Direta (SDD) que gera os sinais de RF.

b) O transmissor que fornece a amplificação de potência dos sinais de RF.

c) O sistema de antenas para transmitir e receber os sinais.

d) Os cartões receptores que amplificam e demodulam os sinais refletidos.

e) Um microcomputador do tipo PC para processar o programa da CADI e controlar o processo de transmissão / recepção, enquanto exibe e armazena os dados de sondagem.

O transmissor (Figura 2.6) é a única parte do sistema básico que fica externo ao microcomputador, acomodado em um pequeno chassi com o tamanho aproximado de um "desktop" padrão. Este produz 600 W de potência de pico do pulso emitido numa faixa que se estende de 1 a 20 MHz, em um período de 40ms, possibilitando uma resolução básica de 6 km (MACDOUGALL et al., 1995; CANADIAN..., 1997).

Para transmissão e recepção é utilizada uma antena com configuração do tipo duplo delta, onde um delta é requerido para a transmissão, e utiliza um mastro de aproximadamente 20 m, cujo tamanho da antena garante um desempenho satisfatório do sistema em frequências abaixo de 2 MHz (MACDOUGALL et al., 1995). O outro delta é utilizado como um simples sistema de recepção. O transmissor e o receptor são conectados aos sistemas de antenas por meio de cabos coaxiais, o que exige o uso de

dispositivos de balanceamento de correntes, como os “baluns”, impedindo qualquer tipo de irradiação de energia por tal condutor e, consequentemente, uma deformação no diagrama de irradiação da antena. A Figura 2.7 exibe a antena de transmissão e recepção da CADI.

Figura 2.6 - Sistema de transmissão da ionossonda digital CADI.

Figura 2.7 - Antena de transmissão e recepção da CADI instalada em São José dos Campos.

O programa da CADI armazena os dados em arquivos do tipo MD3 e MD4 e esses arquivos podem ser analisados através do programa da CADI que vem junto com o equipamento que opera no MS-DOS ou através da ferramenta computacional “Univap Digital Ionosonde Data Analysis” (UDIDA). O UDIDA será apresentado com maiores detalhes na Seção 2.3.1.

A CADI é uma concorrente da Digissonda^{TM} que está se espalhando pelo mundo devido ao seu menor custo e ao fato de produzir resultados semelhantes para as camadas E e F.

2.3.1 UDIDA

O programa UDIDA foi desenvolvido no Laboratório de Física e Astronomia da UNIVAP. Sua finalidade é auxiliar na manipulação e análise dos dados obtidos pelas ionossonda do tipo CADI pertencentes ao laboratório. O programa UDIDA é constituído por várias funcionalidades tornando-o uma ferramenta computacional versátil (PILLAT, 2006). Algumas destas funcionalidades mais importantes são:

- Redução de dados: onde são selecionados os parâmetros ionosféricos;
- Iso frequência: onde é possível visualizar e analisar a variação diurna da altura virtual para as frequências pré-selecionadas. Esta ferramenta mostra um gráfico da variação da altura virtual em função da hora; e
- Ondas de gravidade: onde é possível analisar a variação temporal da densidade eletrônica na ionosfera durante um mês, possibilitando a análise de ondas de gravidade.

Neste trabalho é abordada apenas a ferramenta de redução de dados, pois através desta ferramenta é possível extrair os parâmetros ionosféricos que caracterizam a ionosfera. Estes parâmetros ionosféricos são: altura mínima do traço da camada F (h'F), a frequência crítica na camada F (foF2) e altura do pico de densidade eletrônica na camada F (hpF2). Estes parâmetros são importantes no estudo da dinâmica da ionosfera sob várias condições geomagnéticas, pois suas variações temporais fornecem este tipo de informação. O UDIDA foi utilizado para estudar a ionosfera durante períodos geomagneticamente perturbados (BECKER-GUEDES et al., 2004; LIMA et al., 2004; SAHAI et al., 2003; SAHAI et al., 2005; FAGUNDES et al., 2008), estudos de propagação de ondas planetárias e ondas de gravidade (FAGUNDES et al., 2005; FAGUNDES et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2009) e utilização dos parâmetros ionosféricos para analisar o comportamento da ionosfera (MUELLA et al., 2008; CARDOSO et al., 2011; JESUS et al., 2011; SAHAI et al., 2011; BERTONI et al., 2011).

Atualmente a extração dos parâmetros ionosféricos é realizada através do programa UDIDA de forma totalmente manual. Isto torna a análise dependente do analista que o realiza. Os passos que devem ser seguidos pelo analista são os seguintes:

1) Seleciona-se o observatório, dia e o tipo de arquivo da observação. Deve-se utilizar o arquivo do tipo MD4, através da interface ilustrada na Figura 2.8.

2) A Figura 2.9 ilustra a interface gráfica utilizada para selecionar o arquivo que corresponde a um conjunto de pontos coletados durante uma hora.

3) Seleciona-se no menu a opção "Redução de Dados" e depois a opção "F", para reduzir a camada F.

4) A Figura 2.10 ilustra a interface gráfica onde ficam armazenados os dados selecionados no ionograma. Estes dados são selecionados pressionando o botão esquerdo do mouse no ionograma. Conforme o usuário pressiona o botão esquerdo do mouse um campo é preenchido. O processo é bem simples, mas é necessário selecionar os parâmetros ionosféricos em cada ionograma, sendo que um ionograma completo é gerado a cada 300s, portanto são obtidos por dia 288 ionogramas.

Figura 2.8 - Interface gráfica utilizada para selecionar o observatório, data e tipo de arquivo que deve ser carregado para redução de dados.

Uma das ferramentas muito utilizada no processo de redução de dados é "Ver Redução" (Figura 2.10). Esta ferramenta permite visualizar a qualquer momento os dados reduzidos na forma de um gráfico. Este procedimento é muito útil para fazer correções na redução durante o próprio processo de redução. A Figura 2.11 apresenta os dados reduzidos do dia 28 de agosto de 2000 em São José dos Campos.

Figura 2.9 - Exemplo de um ionograma obtido pela ionossonda digital do tipo CADI em 02 de outubro de 2000, São José dos Campos, e visualizado através do programa "Univap Digital Ionosonde Data Analysis"(UDIDA).

Figura 2.10 - Interface gráfica utilizada para selecionar os parâmetros no ionograma.

Figura 2.11 - Interface gráfica utilizada para visualizar os dados selecionados no ionograma.

2.4 Conclusões

Esta revisão das ionossondas digitais permitiu uma familiarização sobre essa ferramenta utilizada no estudo da ionosfera terrestre.

Nesse capítulo foram apresentadas três ionossondas onde duas possuem uma ferramenta específica de extração dos parâmetros ionosféricos: Digissonda^{TM} com o ARTIST; AIS-INGV com o Autoscala. Possibilitando realizar uma comparação com a ionossonda utilizada nesse trabalho, a CADI, que não possui uma ferramenta específica para realizar este processo. A escolha destas três ionossondas foi devido as características de suas ferramentas de extração dos parâmetros ionosféricos, sendo que: o ARTIST utiliza paradigmas de inteligência computacional, redes neurais e lógica nebulosa; e o Autoscala é baseado na técnica de reconhecimento de imagem.

O próximo capítulo aborda os conceitos de lógica nebulosa, relação nebulosa e sistema de inferência.

3 LÓGICA NEBULOSA

3.1 Introdução

Observando que muitos conceitos no mundo real não podem ser bem representados usando limites claramente definidos, Zadeh (1965) desenvolveu a teoria dos conjuntos nebulosos (Fuzzy Sets) para tratar do aspecto vago da informação. O fundamento matemático dessa teoria pode ser tratado como uma generalização da teoria dos conjuntos clássica. Essa teoria generaliza os conceitos da teoria clássica de conjuntos para o tratamento da imprecisão da informação na área de controle e na área de decisão, buscando traduzir em termos formais a informação imprecisa que ocorre de maneira natural na representação dos fenômenos da natureza, descritos por seres humanos. A familiaridade com as notações e operações do conjunto nebuloso é útil no estudo dos princípios e aplicações da lógica nebulosa (TSOUKALAS; UHRIG, 1997).

Tecnicamente, fuzzy representa imprecisão ou incerteza baseada na intuição humana e não nas interpretações clássicas e subjetivistas da teoria de probabilidades.

A lógica nebulosa consiste em aproximar a decisão computacional da decisão humana, tornando as máquinas mais capacitadas para o trabalho. Isso é realizado de forma que a decisão de uma máquina não dependa apenas de informações binárias do tipo "sim" ou "não" ou de valores "concretos", mas de maneira que também possa decidir com base em valores "abstratos" do tipo "um pouco mais", "talvez sim" e em outras tantas variáveis que representem os tratamentos de informações fornecidas pelo homem.

As informações coletadas pelas ionossondas podem estar contidas em dois tipos de dados: dados numéricos recebidos das medições do radar e dados linguistíscos obtidos de analistas, pesquisadores e outras fontes. Em situações do mundo real, os dados numéricos podem ser ruidosos, inconsistentes e incertos e as informações linguíticas podem ser imprecisas ou vagas. Tanto a informação imprecisa quanto a informação com incerteza probabilística estão presentes nos sistemas operacionais. Em um sistema como a ionossonda a incerteza pode ser gerada por outros sinais transmitidos na faixa de frequência medida, radio amador, ou por falha/inacurácia no equipamento na coleta dos dados.

As variáveis linguísticas são expressões que caracterizam grandezas físicas e cujo valor é especificado por proposições da linguagem natural em detrimento de um valor numérico. Expressões como "erro em distância pequeno" e "erro em frequência

grande" são designadas como valores linguísticos das grandezas físicas "Erro em distância" e "Erro em frequência", respectivamente. Um valor linguístico é um conjunto nebuloso. Todos os valores linguísticos especificam uma variável linguística. Considerando uma variável linguística X = "Erro em distância". Então é possível definir os valores linguísticos (conjuntos fuzzy) "erro em distância negativo grande (NG)", "erro em distância negativo pequeno (NP)", "erro em distância nulo (Z)","erro em distância positivo pequeno (PP)" e "erro em distância positivo grande (PG)" caracterizados pelas funções de pertinência $\mu_{NG}(x)$, $\mu_{NP}(x)$, $\mu_{Z}(x)$, $\mu_{PP}(x)$ e $\mu_{PG}(x)$. A Figura 3.1 apresenta as funções de pertinência que caracterizam a variável linguística "Erro em distância" e os valores linguísticos que a especificam (SANDRI; CORREA, 1999).

Assim, a lógica nebulosa proporciona uma estrutura matemática para a modelagem de sistemas definidos de maneira imprecisa, sistemas "pouco conhecidos" e sistemas difíceis de modelar por técnicas convencionais.

Figura 3.1 - Variável linguística "Erro em distância".

3.2 Conceitos Básicos

Conjuntos clássicos são coleções claramente definidas de elementos distintos (números, símbolos, objetos, etc), e por esta razão eles são chamados de conjunto crisp[1]. Todos os elementos do conjunto sob consideração de uma dada situação pertence Tsoukalas e Uhrig (1997) a um invariável ou mais frequentemente chamado uni-

[1]Crisp significa sem ambiguidade

verso de discurso. O fato de elementos do conjunto A pertencer ou não pertencer ao conjunto crisp A pode ser formalmente indicado pela função característica de A, definida como:

$$X_A = \begin{Bmatrix} 1, iff\ x \in A \\ 0, iff\ x \notin A \end{Bmatrix}, \tag{3.1}$$

onde os símbolos $\in$ e $\notin$ definem que "x" é e não é um membro de A, respectivamente, e "iff" é uma abreviação para "se e somente se". O par de números $\{0, 1\}$ é chamado de conjunto de avaliação.(TSOUKALAS; UHRIG, 1997)

A notação da equação 3.1 é lida como: existe uma função $X_A(x)$ mapeando todo elemento do conjunto X (seu universo de discurso) para o conjunto $\{0, 1\}$. Ela enfatiza que a função característica é um mecanismo do conjunto X para o conjunto de avaliação $\{0, 1\}$.

Na teoria clássica dos conjuntos existe um sentido restrito para os membros do conjunto; isto é, um elemento pertence ou não pertence a um conjunto. Em 1965, Zadeh introduz os conjuntos nebulosos, que tem um sentido mais flexível de membros. Nos conjuntos nebulosos muitos graus de pertencimentos são permitidos. O grau de pertencimento do conjunto é indicado por um número entre 0 e 1, isto é, um número no intervalo [0,1]. O ponto de partida para os conjuntos nebulosos é simplesmente generalizar o conjunto de avaliação de um par de números $\{0, 1\}$ para todos os números encontrados em [0,1]. Ampliando o conjunto de avaliação a natureza da função característica é alterada, portanto agora ela é chamada de função de pertencimento (*membership function*) e definida como μ_A(x). Com isto, não foi criado um conjunto crisp maior, mas no lugar foi gerado um conjunto nebuloso. Dentre o intervalo [0,1] existe uma infinidade de números e infinitos graus de pertencimento são possíveis. Portanto na equação 3.1 foi dito que uma função de pertencimento mapeia todos os elementos do universo de discurso X para um intervalo [0,1] que pode ser definida formalmente como

$$\mu_A(X) :\longrightarrow [0, 1]. \tag{3.2}$$

A equação 3.2 é uma generalização do mapeamento mostrado na equação 3.1. Funções de pertencimento são ainda uma ferramenta matemática simples e versátil para indicar flexibilidade de pertencimento para um conjunto, sendo também utilizada para modelar e quantificar o significado dos símbolos. Uma dúvida comum nas pessoas iniciantes no estudo de conjunto nebuloso é "Como a função de pertencimento é encontrada?". Função de pertencimento representa uma noção individual (subjetiva) de uma classe vaga, por exemplo, objetos em uma sala que funcionam como cadei-

ras, pessoas altas, desempenho aceitável, contribuição pequena para estabilidade do sistema, pouca melhoria, benefício grande, etc. Na concepção e operação de controles ou ferramentas que tomam decisão automática, por exemplo, a modelagem com noções é uma tarefa muito importante. A função de pertencimento pode também ser determinada na base estatística dos dados ou através de apoio de redes neurais (TSOUKALAS; UHRIG, 1997). Existem dois caminhos comuns utilizados para denotar conjunto nebuloso. Se X é um universo de discurso e "x" é um elemento de X, então um conjunto nebuloso A definido sobre X pode ser escrito como uma coleção de pares ordenados

$$A = \{(x, \mu_A(x))\}, x \in X, \tag{3.3}$$

onde para cada par (x,μ_A(x)) é chamado de singleton[2] e tem primeiro x, seguido por seu pertencimento em A, μ_A(x). No conjunto crisp um singleton é simplesmente o elemento x por ele mesmo. Em conjunto nebuloso um singleton são dois objetos x e μ_A(x). Por exemplo, o conjunto dos números pequenos inteiros, A, definido (subjetivamente) sobre o universo de discurso dos inteiros positivos pode ser dada pela coleção de singletons

A=$\{(1, 1.0), (2, 1.0), (3, 0.75), (4, 0.5), (5, 0.3), (6, 0.3), (7, 0.1), (8, 0.1)\}$.

Então o quarto singleton da lista é o número quatro pertence para A com grau de pertencimento 0.5. Um singleton é também escrito como μ_A(x)/x, isto é, primeiro colocando o pertencimento seguido pelo marcador "/" separando do "x". Singleton cujo seu pertencimento para um conjunto nebuloso é zero pode ser omitido. O conjunto suporte do conjunto nebuloso A é o conjunto de seus elementos que tem outra função de pertencimento que exclui o pertencimento zero.

Uma alternativa de notação, usada com mais frequência que a equação 3.3, explicitamente indica um nebuloso como a união de todos $\mu_A(x)/x$ singletons, isto é,

$$A = \sum_{x_i \in X} \mu_A(x_i)/x_i. \tag{3.4}$$

O sinal de somatório na equação 3.4 indica a união de todos os singletons (a operação união na teoria de conjunto é semelhante a "adição"). A equação 3.4 é utilizada para casos onde o universo de discurso é discreto. Nesta notação alternativa o conjunto

[2]Singleton é a estrutura de um número nebuloso, primeiro o valor de x, seguido por seu pertencimento no universo de discurso

de pequenos inteiros acima deve ser escrito como

$$A = \begin{array}{c}(\mu_A(1))/1 + (\mu_A(2))/2 + (\mu_A(3))/3 + (\mu_A(4))/4 + (\mu_A(5))/5 + (\mu_A(6))/6 + (\mu_A(7))/7 + \\ (\mu_A(8))/8 = 1.0/1 + 1.0/2 + 0.75/3 + 0.5/4 + 0.3/5 + 0.3/6 + 0.1/7 + 0.1/8\end{array}.$$

Para um universo de discurso contínuo, a equação 3.4 é escrita como

$$A = \int_x \mu_A(x)/x. \tag{3.5}$$

Onde o sinal de integral na equação 3.5 indica a união de todos os singletons $\mu_A(x)/x$. Consideramos, por exemplo, o conjunto nebuloso dos pequenos inteiros definidos (subjetivamente) sobre o conjunto dos números reais não negativos através de uma função de pertencimento $\mu_B(x)$ dada por

$$\mu_B(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{4}\right)^3}. \tag{3.6}$$

Usando a forma da equação 3.5 o conjunto nebuloso B é escrito como

$$B = \int_{x \geq 0} \mu_B(x)/x = \int_{x \geq 0} \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{4}\right)^3}/x. \tag{3.7}$$

A função de pertencimento do conjunto nebuloso B é mostrada na Figura 3.2. Um gráfico semelhante a este é chamado de diagrama de Zadeh.

Figura 3.2 - Diagrama de Zadeh para o conjunto nebuloso B = números pequenos.

Pode-se obter a representação aproximada de um conjunto nebuloso A através de conjuntos crisp em A. Estes subconjuntos, denotados por A_α e denominados de cortes de nível ou cortes-α, são definidos como:

$$A_\alpha = \{x \in X | \mu_A(x) \geq \alpha\}. \tag{3.8}$$

onde α é o parâmetro na faixa de $0 < \alpha \leq 1$, barra vertical | é uma abreviação para "tal que'.

Considere o exemplo dos conjuntos dos pequenos inteiros descritos anteriormente. O corte-0.5 resulta no conjunto crisp $A_{0.5} = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ ilustrada na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Conjunto nebuloso A e seu corte-0.5

3.3 Relação Nebulosa

Em abordagem nebulosa, as relações possuem a potência computacional e a importância que as funções possuem em abordagens convencionais. Relações nebulosas podem ser comparadas com os conjuntos nebulosos definidos sobre um universo de discurso. Como o nome indica, uma relação implica na presença de uma associação entre elementros de diferentes conjuntos. Se um grau de associação é 0 ou 1, é caracterizada uma relação crisp. Se o grau de associação está entre 0 e 1 é caracterizada uma relação nebulosa. Nesta Seção é apresentada uma revisão sobre relação crisp e vários caminhos para representá-las. Em seguida, serão apresentadas as relações nebulosas e as propriedades utilizadas para classificá-las.

Sobre qual base são associados vários elementos em uma relação? A associação pode ser por uma propriedade comum, uma qualidade, uma referência, uma condição, ou uma regra, satisfeita por seus pares de elementos (por exemplo, objetos, números, palavras, variáveis, etc). Por exemplo, o estado "é maior que" ou "é um componente de" indica uma associação entre dois elementos. A ordem dos elementos é importante. Por exemplo, se a relação "é um componente de" mantem o par de elementos (tubo em U, gerador de vapor), isto é, se o estado "tubo em U é um componente de gerador de vapor" é verdade, a relação pode não ser mais verdadeiro quando os elementos são trocados. A relação "gerador de vapor é um componente de tubo em U" não é verdade. Então, isto é um importante ponto para observar: na relação, a ordem é importante.

Uma relação como "é um componente de" pode também ser expressada por regras IF/THEN. É possível dizer "se um objeto é um tubo em U, então ele é um componente de um gerador de vapor". Qualquer ambiguidade como em qual grau um objeto é conhecido como um tubo em U ou um gerador de vapor, ou qualquer ambiguidade quanto ao grau de verdade em uma associação, resulta em uma relação nebulosa.

Quando dois elementos pertencem a uma relação R, eles são referidos como um par ordenado definido como (a,b) $\in$ R, ou aRb, com elemento a sendo distinguido como o primeiro elemento e b como o segundo. Com dois elementos na associação a relação é chamada de relação binária. Com três elementos é conhecida como relação ternária, e quando são associados n elementos a relação é chamada de relação enária. Uma associação de n elementos em uma relação enária é chamada de n-tupla. Uma relação é um conjunto de n-tuplas ordenadas. A palavra chave aqui é 'conjunto'. Relações são formadas a partir de conjuntos de elementos, e elas são conjuntos (KANDASAMY; SMARANDACHE, 2004).

Relações crisp são definidas sobre o produto cartesiano ou produto de dois ou mais conjuntos. O produto Cartesiano $X \times Y$ de dois conjuntos X e Y é o conjunto de todo par ordenado (x,y) com x em X e y em Y. O produto $X \times X$ é frequentemente abreviado por X^2, o produto de $X^2 \times X$ como X^3, assim por diante.

Foi definido que a ordem dos conjuntos é importante em relações. Mas relações podem ser pensadas como o processo de associação na matemática chamada de mapeamento. Funções são mapeamento também. Relações, entretanto, são um tipo mais geral de mapeamento. O desempenho de uma função é chamada de muitos-para-um, ou seja, muitos elementos estão associados a um (e somente um) elemento,

mas não vice-versa. Por exemplo, o mapeamento é realizado entre x's e y's no plano $X \times Y$. Deve-se ter mais que um x mapeado para o mesmo y, e não ao contrário. A relação, no entanto, constrói mapas de muitos-para-muitos. Muitos x's podem ser associados com um único y e vice-versa. Muitos y's podem, também, ser associados a um único x.

Nas relações nebulosas são considerados pares de elementos, e mais geralmente n-tuplas, que estão relacionados a um grau. Assim como a questão de saber se algum elemento pertence a um conjunto pode ser considerada uma questão de grau, se alguns elementos estão associados também pode ser uma questão de grau. Por exemplo, suponha o seguinte problema de diagnóstico envolvendo dados de vibração com um conjunto de falhas F=$\{f_1, ..., f_n\}$ associados a um conjunto de sintomas S =$\{s_1, ..., s_m\}$. Primeiro estabeleça como os sintomas se relacionam com as falhas, ou seja, estabeleça a relação de F para S. Um destes sintomas, s_i, pode ser 'vibração excessiva'. Conhecendo que a vibração da máquina depende da interpretação dos dados de vibração. Se o conceito "vibração excessiva" foi definido puramente, isto é, ele pode ser facilmente determinado se a máquina vibra e pode associar um sintoma s_i com uma falha f_j, temos uma relação crisp de F para S. Na realidade, pode ser bastante difícil de definir impecavelmente tais associações e, portanto, todas as falhas F =$\{f_1, ..., f_n\}$ com todos os sintomas S =$\{s_1, ..., s_m\}$, podem ser associados a um grau, resultando em uma relação nebulosa de F para S. O que é importante neste caso é produzir esses graus. Tendo estabelecido a relação nebulosa de F para S, subsequentemente é possível usá-la para identificar o mais alto grau de associação dada por um sintoma s_i e assim conectá-lo as falhas f_k, f_j e assim por diante (KAUFMANN; SWANSON, 1975 apud TSOUKALAS; UHRIG, 1997).

Relações nebulosas são conjuntos nebulosos definidos sobre produtos Cartesianos. Enquanto o conjunto nebuloso é definido sobre um único universo de discurso (por exemplo, X), relações nebulosas são definidas sobre o universo de discurso com mais dimensões (por exemplo $X \times X$ ou $X \times Y \times Z$). Um produto Cartesiano é um universo de discurso com mais dimensões. Suponha que uma relação binária R definida por $X \times Y$. Com qualquer conjunto nebuloso, é possível listar todos seus pares da relação, explicitamente, pela equação;

$$R = \{((x, y), \mu_R(x, y)))\}, \tag{3.9}$$

onde todo par individual (x,y) pertence ao produto Cartesiano $X \times Y$. Alternativa-

mente, a notação utilizada na equação 3.4 para formar a união de todos singletons μ_R(x,y),(x,y) de $X \times Y$. Para um produto Cartesiano Discreto é definida como

$$R = \sum_{(x_i,y_i) \in XxY} \mu_R(x_i, y_i)/(x_i, y_i), \tag{3.10}$$

enquanto para o produto cartesiano continuo temos:

$$R = \int_{XxY} \mu_R(x_i, y_i)/(x_i, y_i). \tag{3.11}$$

Neste trabalho é utilizada a relação nebulosa para identificar e refinar a área de pesquisa dos parâmetros ionosféricos no ionograma, a maneira que ela será aplicada é apresentada com maiores detalhes no Capítulo 4. Antes é apresentado o processo de um sistema de inferência nebulosa.

3.4 Sistema de Inferência Nebulosa

Conceitos nebulosos expressos em universos distintos podem apresentar relações entre si. Assim, os conjuntos nebuloso "altura próxima da camada" e "frequência próxima da camada" apresentam uma estreita relação com o conjunto nebulosos "alta possibilidade de associação". Sejam X1, X2,. . ., Xn universos de discurso distintos. Uma relação nebulosa R em $X1 \times X2 \times ... \times Xn$ é definida pelo mapeamento: $\mu_R : X_1 \times X_2 \times ... \times X_n \rightarrow$ [0, 1].

Os operadores de implicação I : [0, 1] X [0, 1] $\rightarrow$ [0, 1] são usados para modelar regras de inferência do tipo Se <premissa> Então <conclusão>. Considerando as pertinências de A e B dadas por μ_A e μ_B, a relação A $\rightarrow$ B é expressa como:

$$\mu_A \rightarrow B(x, y) = I(\mu_A(x), \mu_B(y)). \tag{3.12}$$

Um sistema de inferência fuzzy pode ser representado por uma estrutura sistêmica (Figura 3.4). Este sistema consiste em três componentes conceituais: uma interface de fuzificação, uma base de conhecimento composta por uma base de regras e uma base de dados, e uma interface de defuzificação.

Denomina-se de método de fuzificação à determinação da relação entre as variáveis de entrada e os valores linguísticos. O grau de pertinência da variável de entrada é

determinado para cada valor linguístico da correspondente variável linguística.

Figura 3.4 - Estrutura Sistêmica de Inferência Nebulosa.

A base de regras contém o conhecimento empírico referente à operação de um processo específico. O conhecimento é representado por regras linguísticas. A definição textual de uma base de regras é efetuada da seguinte forma:

R1: IF Condição P1 THEN Conclusão C1

R2: IF Condição P2 THEN Conclusão C2

R3: IF Condição P3 THEN Conclusão C3

$\vdots \quad \vdots \qquad\qquad \vdots$

Rn: IF Condição Pn THEN Conclusão Cn

onde, a condição pode consistir de uma combinação de estados linguísticos.

Os sistemas especialistas seguem rigorosamente tais regras e por isso são processos de inferência ou de raciocínio lógico (Logical reasoning Systems). O processo de inferência consiste de três princípios básicos: o princípio da conjunção, o princípio da projeção e o princípio do englobamento semântico. Estes princípios serão descritos a seguir:

- O princípio da conjunção é utilizado para unir peças de conhecimento.
- O princípio da projeção é utilizado para particularizar uma distribuição genérica em um subconjunto do universo do discurso. Considerando uma distribuição de possibilidade $\pi_r(x, y)$ permite inferir $\pi_s(y) = Sup_x\ \pi_r(x, y)$.

Geralmente na projeção são usados os operadores MIN ou PROD.

- O princípio de englobamento semântico: pode-se inferir que $\pi_q(x) \geq \pi_p(x)$.

A abordagem básica consiste na solução do problema de inferência conhecido como *generalized modus ponens*. Considere o seguinte exemplo:

IF eco está em uma FREQUÊNCIA baixa e ALTURA baixa THEN Extrair parâmetro h'F.

Algumas incertezas podem ser observadas na regra descrita acima. A evidência relatada pode não ser verdadeira, pois FREQUÊNCIA baixa e ALTURA baixa podem ser classificados erroneamente; o classificador que associa a dimensão do eco pode estar com informações incorretas. Estas fontes de incerteza caracterizam a importância do processo de inferência considerando as evidências para o processo decisório.

A regra descrita visa definir um nível de crença entre o valor de 0 e 1 que relacione os ecos encontrados no ionograma com a região da ionosfera que ele pertence. Dependendo da combinação de operadores nos passos individuais, estratégias diferentes de inferência podem ser realizadas. As mais conhecidas são as denominadas MAX-MIN e MAX-PROD, as quais usam o operador MAX na acumulação das projeções e o operador MIN ou PROD na projeção.

O processo de defuzificação corresponde à extração de um valor numérico representativo, normalmente real, a partir de um conjunto nebuloso. Muitos métodos foram e são propostos na literatura, não existindo, contudo, uma base científica para qualquer um deles, isto é, nenhum método derivou de um princípio como a maximização da informação nebulosa; consequentemente, o processo de defuzificação é uma arte relativa da ciência.

Um dos critérios estabelecidos para a escolha do método de defuzificação é a simplicidade computacional, principalmente em aplicações de lógica nebulosa em engenharia. Os principais métodos de defuzificação utilizados são: Centro de Gravidade (Center of Gravity-CoG), Máximo Mais à Esquerda (Left Most Maximum-LM), Máximo Mais à Direita (Right Most Maximum-RM), Média dos Máximos (Mean of Maximum-MoM), Centro de Área (Center of Area-CoA) ou Bissetor de Área (Bissector of Area-BoA) e Centro dos Máximos (Center of Maximum-CoM) ou Centro de Gravidade para Singletons (Center of Gravity for Singleton-COGS).

3.5 Conclusões

Esta revisão dos conceitos básicos de lógica nebulosa permitiu uma familiarização com os termos e notação que serão utilizadas no desenvolvimento da tese.

A lógica nebulosa por ser robusta, por tratar informações quantitativas e qualitativas e por possuir a facilidade de se adaptar a diferentes informações de entrada, se ajusta muito bem para sistemas de extração dos parâmetros ionosféricos dos ionogramas, visto que, o ionograma possui diferentes características devido a vários fatores.

Uma das principais potencialidades da lógica nebulosa é que a sua base de conhecimento consiste de uma base de dados e de uma base de regras, de maneira a caracterizar a estratégia de decisão. Na base de dados ficam armazenadas as definições das funções de pertencimento dos termos nebulosos. A base de regras é formada por estrutura do tipo IF-THEN-ELSE que é utilizada para estabelecer a associação.

O próximo capítulo apresenta trabalhos que utilizam paradigmas de inteligência computacional relacionados com a análise de ionogramas e apresenta o modelo proposto pelo autor considerando as especificidades do processo de extração dos parâmetros ionosféricos dos ionogramas.

4 ESTADO DA ARTE

Nesse Capítulo são apresentadas algumas aplicações que utilizam paradigmas de inteligência computacional (IC) em aplicações voltada a extração dos parâmetros ionosféricos. Além desses trabalhos também foi detectado uma ferramenta desenvolvida pelo "Istitulo Nationale di Geofísica Vulcanologia" (INGV) que utiliza técnicas de reconhecimento de imagens e apresentou bons resultados.

Atualmente existem vários paradigmas de Inteligência Computacional (IC) para solucionar problemas de todos os tipos, como por exemplo: Redes Neurais, Sistemas Especialistas, Agentes, Lógica Nebulosa, Raciocínio Baseado em Casos, Algoritmos Genéticos, Tutores Inteligentes, entre outros (HAYKIN, 2009; BITTENCOURT, 2006). Neste trabalho são apresentados apenas dois: rede neural e lógica nebulosa. A escolha destes dois paradigmas se deve ao fato dos mesmos terem sido os únicos aplicados à análise de dados ionosféricos e terem obtido bons resultados (CANDER, 1998; GALKIN et al., 1996; GALKIN; REINISCH, 2008; HAGENBUCHNER; FULCHER, 1997; TSAI; BERKEY, 2000; BERKEY; SIKDAR, 2005).

4.1 Redes Neurais

As redes neurais são aplicadas em diversas áreas tais como: reconhecimento de padrões, aproximação de funções, classificação de imagens, etc (HAYKIN, 2009; GURNEY, 1997; LIN; LEE, 1996; HAGAN et al., 1996; FAUSETT, 1994; SIMPSON, 1990). Como o foco deste trabalho envolve análise de dados ionosféricos, a seguir são mostradas algumas aplicações de redes neurais sobre dados ionosféricos.

Cander (1998) utilizou uma arquitetura modular de rede neural, composta por 12 redes estáticas do tipo "feedforward", com múltiplas camadas, uma para cada mês do ano. Uma rede neural modular é uma rede neural composta por uma série de redes neurais independentes analisadas por um interpretador. Cada rede neural é ativada conforme a entrada da rede realizando tarefas separadas. O interpretador tem as saídas de cada rede e os processa para obter uma saída para rede como um todo (FAUSETT, 1994). As redes neurais estáticas são aquelas cujas saídas dependem somente do valor atual das entradas e não de valores passados posteriormente, ou seja, não possui realimentação (HUAMANI, 2003). Nas redes com conexões do tipo "feedforward", todos os sinais se propagam através das camadas para "frente". Não há conexões laterais ou como o sinal retroceder. Este tipo de rede também possui a capacidade de generalização, ou seja, é capaz de classificar corretamente um padrão complexo mesmo quando este não pertence ao conjunto de treinamento da rede

(ENDER, 2002). Neste tipo de rede os seus pesos são atualizados a cada iteração e este é o ponto que permite que esta rede se adapte aos sinais de entrada. A Figura 4.1, retirada do trabalho original, ilustra a implementação de uma rede neural com arquitetura modular em duas aplicações diferentes: i) modelando uma estação com três parâmetros de entrada: hora, mês e atividade solar, e ii) modelando sobre a Europa com dois parâmetros adicionais na entrada: latitude e longitude geográfica. A rede neural tem como saída o valor médio mensal para o parâmetro crítico foF2. Os resultados apresentados por Cander (1998) são bons comparados aos dados coletados em período calmo no ano de 1990, conforme mostrado na Figura 4.2, retirada do trabalho original.

Figura 4.1 - Arquitetura da rede neural utilizada para a determinação do valor médio mensal do parâmetro crítico foF2.
Fonte: Cander (1998)

Outro trabalho que utiliza redes neurais envolve, o programa ARTIST, um dos programas mais utilizados na determinação dos parâmetros ionosféricos. Segundo Bertoni (1998), os parâmetros reduzidos pelo ARTIST em sua maioria precisam ser ajustados manualmente, devido a falhas na identificação do perfil e também na extração da frequência crítica foF2. O estudo realizado por Bertoni (1998) utilizou

o ARTIST 4, atualmente na versão 5. Os desenvolvedores do ARTIST não deixam muito claro qual foi a metodologia utilizada na determinação dos parâmetros críticos, mas segundo Galkin e Reinisch (2008), o ARTIST utiliza o "Autoscaling Confidence Level" (ACL), através do qual é realizada a extração dos parâmetros ionosféricos no ionograma: h'F, hpF2, foF2. Infelizmente, o sistema ACL é proprietário e não existe informações sobre o sistema publicados na literatura. O trabalho de Galkin et al. (1996) utiliza uma rede Hopfield para determinar o ângulo de inclinação do perfil da ionosfera.

Figura 4.2 - Comparação do foF2 calculado pela rede neural com os dados observados em Poitiers (França) durante todos os meses de 1990. A variação do índice da atividade Solar R12 também é mostrado.
Fonte: Adaptada de Cander (1998)

Uma rede Hopfield é uma rede neural recorrente. Neste tipo de rede a presença de realimentação da informação permite a criação de representações internas e dispositivos de memória capazes de processar e armazenar informações temporais e sinais sequenciais (HAYKIN, 2009). A Figura 4.3 ilustra a arquitetura de uma rede neural recorrente. A rede Hopfield opera como um mapa que divide uma região X em subregiões. A função de ativação é do tipo "Hard-limit", ou seja, a saída possui apenas o valor 1 ou -1.

Figura 4.3 - Grafo arquitetural de uma rede de Hopfield consistindo de N=4 neurônios. Fonte: Haykin (2009)

Na Figura 4.4 é possível visualizar os parâmetros ionosféricos extraídos na tabela no canto esquerdo da figura. Outra informação importante são os dois perfis traçados pelo programa ARTIST no ionograma. A linha que está abaixo do perfil da ionosfera é o calculo da altura real do perfil da ionosfera, considerando a velocidade de propagação da onda diferente para cada camada. O segundo traço sobre o perfil da ionosfera é o perfil que foi utilizado para extrair os parâmetros ionosféricos. Observe-se que o traço segue o perfil externo da ionosfera. Este é um dos problemas que acontecem na extração dos parâmetros segundo Bertoni (1998), onde o parâmetro foF2 é calculado no traço externo do perfil, quando deveria utilizar o traço interno, ordinário, do perfil.

Um outro trabalho interessante é o de Hagenbuchner e Fulcher (1997) onde foi utilizada uma rede neural multicamada utilizando o algoritmo de retropropagação do erro no treinamento para identificar o perfil da camada F em um ionograma com vários sinais de interferência, conforme ilustrado na Figura 4.5, retirado do trabalho original. A arquitetura utilizada possuía 110 parâmetros na camada de entrada, 7 neurônios na camada oculta e 100 neurônios na camada de saída.

Na Figura 4.5 é ilustrado o ionograma utilizado como teste no trabalho de Hagenbuchner e Fulcher (1997). A figura à esquerda mostra o ionograma original com fortes frequências espúrias interferindo na identificação do perfil da ionosfera, enquanto a figura à direita representa o ionograma original após uma suavização realizada pela rede e destacando o perfil da camada F.

Figura 4.4 - Exemplo da utilização do programa ARTIST sobre ionogramas obtidos pela Digissonda^{TM} de Jicamarca em 12 de maio de 2009, onde as linhas pretas indicam o traço calculado pelo ARTIST e a tabela ao lado do ionograma são os parâmetros ionosféricos determinados.

Figura 4.5 - Comparação entre um ionograma original e um ionograma com a camada F destacada. Imagem não editável.
Fonte: Hagenbuchner e Fulcher (1997)

O algoritmo de retro-propagação é um algoritmo de treinamento supervisionado baseado no método do gradiente. O nome retro-propagação deve-se ao fato do sinal

de erro ser retro-propagado camada por camada através da rede atualizando a matriz de pesos da rede (Figura 4.6) (HAYKIN, 2009).

Figura 4.6 - Exemplo da estrutura de uma rede supervisionada multicamada usando o algoritmo de retro-propagação. O sinal de erro são as linhas tracejadas. Fonte: Adaptada de FRÖHLICH (1998)

4.2 Lógica nebulosa

A lógica nebulosa é aplicada em diversas áreas, tais como: controle de sistemas, aproximação de funções, classificação de imagens, etc (TSOUKALAS; UHRIG, 1997; DRIANKOV et al., 1996; TANAKA; NIIMURA, 1997; RUSPINI et al., 1998; ZADEH, 1965; ZADEH, 1999). A seguir são apresentadas algumas aplicações de lógica nebulosa sobre dados ionosféricos.

Tsai e Berkey (2000) implementaram um sistema utilizando a lógica nebulosa para remover as interferências no ionograma e em seguida extrair os parâmetros ionosféricos para as Digissondas^{TM} DGS-256 em observatórios localizados em médias latitudes. Os ionogramas foram convertidos em imagens na escala de cinza. Estes valores servem como entrada para o sistema nebuloso e são divididos através do processo de corte de nível, conhecido como alfa-cut. Este processo apenas divide a região nebulosa em sub-regiões, conforme Figura 4.7. A Figura 4.7 ilustra um exemplo do

método alfa-cut, onde o universo de discurso representa a quantidade de chamadas para suporte de uma empresa durante um mês relacionado com o pertencimento. Na defuzificação para extrair os valores dos parâmetros ionosféricos foi utilizado o método do centro de áreas (COA), em que o centro de saída é o centro de gravidade da função de distribuição de possibilidade da ação de controle (TSOUKALAS; UHRIG, 1997). O resultado do trabalho de Tsai e Berkey é ilustrado na Figura 4.8, onde foi traçada uma curva sobre o perfil da camada F e identificados os parâmetros ionosféricos ilustrados no canto inferior da figura.

Figura 4.7 - Exemplo do alfa-cut de um conjunto nebuloso, onde o universo de discurso representa a quantidade de suporte.
Fonte: Adaptada de Tsoukalas e Uhrig (1997)

Berkey e Sikdar (2005) utilizaram lógica nebulosa para identificar a camada E-esporádica (Es). A camada Es pode se formar a qualquer momento. Ela ocorre normalmente na altitude entre 90 e 120 km (dentro da região E) e pode se distribuir por uma grande área ou ser confinada a uma pequena região. É difícil saber onde e quanto tempo irá persistir (SCHUNK; NAGY, 2000; TASCIONE, 1988). O trabalho de Berkey e Sikdar (2005) apresentou um bom resultado na identificação da camada Es utilizando técnicas de lógica nebulosa na mesma estrutura utilizada no trabalho de Tsai e Berkey (2000). A Figura 4.9 ilustra os resultados do trabalho de Berkey e Sikdar (2005). A resolução da figura está baixa no artigo original, mas é possível visualizar que foi encontrada a camada Es na última imagem. Este estudo é importante, pois a camada E-esporádica degrada a análise da região F, pois quando a camada Es está presente os ecos da Es obstruem os ecos da base da camada F e portanto não é possível caracterizar corretamente o perfil da camada F.

Figura 4.8 - O resultado da identificação do traço e extração dos parâmetros ionosféricos automática.
Fonte: Tsai e Berkey (2000)

4.3 Reconhecimento de imagens

Um trabalho que também merece atenção é o realizado no "Istituto National di Geofisica e Vulcanologia" (INGV), onde foi desenvolvido uma nova ferramenta chamada Autoscala para analisar os ionogramas obtidos pela ionossonda desenvolvida pelo próprio instituto, denominada "Advanced Ionosonde Sounder - Istituto National di Geofisica e Vulcanologia" (AIS-INGV). O Autoscala utiliza técnicas de reconhecimento de imagens para identificar os traços ionosféricos e extrair suas características.(PEZZOPANE et al., 2007b; PEZZOPANE et al., 2007a; SCOTTO, 2001)

Pezzopane et al. (2007a) apresentaram uma ideia geral do processo de extração dos parâmetros ionosféricos pelo programa Autoscala. Inicialmente o ionograma é considerado como uma matriz de pontos e depois o ionograma é comparado com duas curvas empíricas T_1 para buscar o traço ordinário e T_2 para buscar o traço extraordinário descritas abaixo:

Figura 4.9 - Identificação da camada Es utilizando lógica nebulosa. O ionograma do canto esquerdo superior é o ionograma original, depois é a identificação da região E, em seguida é encontrada a curvatura e finalmente a identificação da Es. Fonte: Berkey e Sikdar (2005)

$$T_1 = \begin{cases} f_1 = a_{ord} - k \\ h'_1 = int\left\{H_{ord} + A_{ord} tan\left[\frac{\pi}{2}.\frac{\delta x - k}{\delta x}\right]\right\} \quad e \\ 0 \leq k \leq \delta x \end{cases} \tag{4.1}$$

$$T_2 = \begin{cases} f_2 = a_{ext} - k \\ h'_2 = int\left\{H_{ext} + A_{ext} tan\left[\frac{\pi}{2}.\frac{\delta x - k}{\delta x}\right]\right\} \quad , \\ 0 \leq k \leq \delta x \end{cases} \tag{4.2}$$

onde H_{ord} e H_{ext} são números inteiros variando de 1 até (m-30), m representa o número de linhas (altura), e correspondem aos valores da assíntota horizontal para T_1 e T_2. a_{ord} e a_{ext} são números inteiros variando de 1 até n, n representa o número de colunas (frequências), com a condição $a_{ord} < a_{ext}$ na assíntota vertical. A_{ord} e A_{ext} são dois coeficientes decimais. δx é um número inteiro que varia de 6 até

30 representando o intervalo de frequência, expressado em pixels. k é um número inteiro variando de 1 até δx. Para cada T_1 e T_2 é realizada uma correlação com os dados observados no ionograma quando é encontrada a maior correlação esta curva é armazenada e extraídos os parâmetros ionosféricos.

4.4 Conclusões

Esta apresentação das aplicações voltada a extração dos parâmetros ionosféricos, utilizando paradigmas de inteligência computacional, permitiu uma visão geral sobre o problema e como a sociedade científica da área está procurando uma solução para este problema. Neste levantamento foi possível identificar que foram utilizados três paradigmas: redes neurais, lógica nebulosa e reconhecimento de imagens. Sendo que, dos três, apenas dois mostraram aplicação direta na extração dos parâmetros ionosféricos, lógica nebulosa (TSAI; BERKEY, 2000) e reconhecimento de imagens (PEZZOPANE et al., 2007a).

5 METODOLOGIA DO MODELO PROPOSTO

Neste trabalho é desenvolvido um modelo de apoio à decisão no processo de extração dos parâmetros ionosféricos a partir de ionogramas. Este modelo foi estruturado em duas partes: A primeira parte propõe uma abordagem de lógica nebulosa, relação nebulosa, para o problema de associação de dados, classificando os dados conforme a camada da ionosfera que ele pertence e identificando o traço ionosférico da região F. O objetivo desta parte é aprimorar as fases de observação e de orientação do modelo pela otimização do processamento dos dados de modo que o modelo processe de forma isolada cada região ionosférica. A segunda parte propõe o emprego do ajuste de curva polinomial utilizando o método de eliminação de Gauss para resolver o sistema linear de funções e determinar os parâmetros para ajustar uma curva sobre o traço ionosférico e utilizá-la como guia na extração dos parâmetros ionosféricos. Esta abordagem agrega as heurísticas empregadas pelos especialistas para apoiar a classificação e a identificação dos parâmetros ionosféricos.

5.1 Conceitos Básicos

Para que seja possível a implementação da extração automática dos parâmetros ionosféricos é necessário analisar os dados obtidos pela ionossonda e definir os passos que são realizados manualmente, como visto na Seção 2.3.1. Após este processo foram identificados alguns passos intermediários antes da extração dos parâmetros ionosféricos de maneira automática. Basicamente, são necessários os seguintes passos:

- Tratar o ionograma como uma figura;
- Remoção dos ruídos;
- Identificar a região onde está contido o perfil da ionosfera;
- Extração dos parâmetros ionosféricos.

A Figura 5.1 ilustra um exemplo de ionograma obtido pela ionossonda digital sem nenhum tratamento e com os seguintes parâmetros ionosféricos identificados:

- h'F: base da camada F, ou seja, o ponto onde é identificada a estrutura inferior do perfil da ionosfera na camada F.
- foF2 - frequência crítica da camada F, ou seja, a frequência que indica a região da ionosfera com maior densidade eletrônica. A frequência do plasma

(f) está relacionada à densidade eletrônica (N), como descrita pela equação 5.1.

$$N = 1,24 \times 10^4 [f]^2. \tag{5.1}$$

- hpF2 - altura do pico da camada F, ou seja, é o ponto em altura que indica a região com maior densidade eletrônica da ionosfera. Localizada utilizando o parâmetro foF2 na fórmula de (PIGGOTT; RAWER, 1972), fp=foF2*0,834.

No ionograma ilustrado na Figura 5.1 é possível observar as interferências junto com a reflexão da ionosfera, regiões marcadas com círculos vermelhos. Estas interferências em determinados casos dificultam a identificação dos parâmetros ionosféricos. As interferências são as linhas verticais que identificam uma frequência relacionada a algum efeito externo, como por exemplo, a frequência transmitida por rádio amador. Através do processo de redução mostrado no seção 2.3.1, um usuário experiente consegue normalmente remover estas interferências visualizando somente o perfil da ionosfera.

Figura 5.1 - Exemplo de ionograma obtido em São José dos Campos em 03 de dezembro de 2000, com as interferências e os parâmetros ionosféricos indicados.

A Figura 5.2 ilustra a variação do perfil da ionosfera durante o dia 03 de dezembro de 2000 sobre São José dos Campos. Também foram identificados os parâmetros ionosféricos (h'F, hpF2 e foF2). Observe que a ionosfera sofre influência forte do Sol e portanto, esta figura pode ser dividida em duas partes:

- as figuras “a” e “b” representam a ionosfera no período noturno. O perfil nestas figuras parece uma reta. Isto acontece devido a alta recombinação iônica que ocorre neste período; e

- as figuras “c” e “d” representam a ionosfera no período diurno. O perfil nestas figuras é bem inclinado devido ao processo de foto-ionização que ocorre com a presença do Sol.

Figura 5.2 - Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 03 de dezembro de 2000: a) período noturno 00:00 UT; b) período noturno 06:00 UT; c) período matutino 12:00 UT; d) período matutino 18:00 UT.

A Figura 5.2 (a, b, c, d) mostra também a variação do perfil da ionosfera sobre a região de São José dos Campos para um dia, mas este perfil também varia conforme a atividade solar, sazonalidade, localização, entre outros fatores.

A Figura 5.3 ilustra a variação dos parâmetros ionosféricos obtidos durante 03 de dezembro de 2000 em São José dos Campos. A extração destes parâmetros foi realizada manualmente por um analista utilizando a ferramenta computacional UDIDA. Na Figura 5.3(a) é ilustrada a variação do parâmetro ionosférico foF2 durante o dia. Observe que a densidade eletrônica diminui drasticamente durante a noite. Com a ação do Sol por volta das 09:00 no tempo universal (UT) a densidade eletrônica

aumenta de uma forma linear até um pico de densidade por volta das 16:00 UT. Na Figura 5.3(b) é possível visualizar as variações da altura da base da camada F (h'F) e a altura do pico de densidade eletrônica da camada F (hpF2), onde o h'F é mais constante durante o dia, se mantendo por volta dos 250 km, enquanto o hpF2 tem variações com a presença ou ausência do Sol, variando sua altura de 350 km durante a noite para alturas entre 500 e 600 km durante o dia.

(a) (b)

Figura 5.3 - Exemplo da visualização da variação dos parâmetros ionosféricos (h'F, hpF2 e foF2) para o dia 03 de dezembro de 2000 em São José dos Campos. A região cinza da imagem representa o período noturno.

É possível observar que a ionosfera não possui um comportamento linear e contêm vários agentes influenciando seu comportamento, o mais influente é o Sol. Com isso, a dificuldade de identificar o formato do perfil da ionosfera. Devido a essa dificuldade foi necessário tratar o ionograma antes de realizar a identificação do perfil da ionosfera. Os métodos utilizados para realizar esta análise são descritos nas próximas seções.

5.2 Remoção dos ruídos

No ionograma (Figura 5.4) é possível observar os traços da região E e F, ruídos tipo 1 (retângulo vermelho), ruídos tipo 2 (círculo vermelhas) e segunda reflexão (elipse vermelha). A primeira parte do tratamento do ionograma na identificação do perfil da ionosfera é a remoção dos ruídos. Os dados obtidos pela ionossonda vêm com algumas frequências espúrias, chamadas neste trabalho como ruído tipo 1, que podem ser provocadas, por exemplo, por rádio amador. Estas frequências espúrias dificultam a identificação dos parâmetros ionosféricos. Para auxiliar na solução desse

problema o ionograma foi subdividido em regiões iguais de 0,1 MHz em frequência por 50 km em altura, resultando em uma matriz de 200 x 20, ou seja, 4.000 sub-regiões, conforme pode ser observado na Figura 5.5.

Figura 5.4 - Exemplo de um ionograma obtido pela ionossonda digital do tipo CADI em 02 de outubro de 2000, São José dos Campos, e visualizado através do programa UDIDA. Com os parâmetros ionosféricos, os ruídos e segunda reflexão identificados.

Figura 5.5 - Exemplo de ionograma obtido em 01 de outubro de 2000 às 00:00 UT em São José dos Campos ionograma subdivido em retângulos homogêneos.

Na filtragem apresentada em Pillat et al. (2008) foi identificado que o perfil da ionosfera pode apresentar-se muito inclinado e com isto ser considerado uma frequência espúria. Para solucionar este problema foi alterado o limite do espalhamento em altura de 350 km para 500 km. Com este limite a frequência não foi descartada, mas

alguns ruídos com menor distribuição em altura também não foram descartados, conforme é ilustrado na Figura 5.6. Estes ruídos são conhecidos como ruídos tipo 2.

Figura 5.6 - Comparação entre o ionograma original (a), ionograma utilizando a metodologia antiga (b) e ionograma utilizando a nova metodologia que aumenta o limite de espalhamento (c).

Na Figura 5.6 é possível observar que a metodologia antiga (b) eliminava parte do perfil da ionosfera, quando o mesmo é muito inclinado. Enquanto na nova metodologia (c) o perfil da ionosfera é conservado, mas também mantém algumas frequências espúrias que o método antigo removia. Portanto, como na metodologia antiga existia o risco de eliminar partes importantes do perfil da ionosfera influenciando a extração dos parâmetros ionosféricos do perfil da ionosfera, a metodologia de remoção das frequências espúrias foi substituída. Devido a esta mudança foi necessário implementar novos passos para eliminar os ruídos tipo 2 do ionograma antes de iniciar o processo de busca da região onde se encontra o perfil da ionosfera.

Após a eliminação do ruído tipo 1 foi implementada uma nova filtragem para o programa analisar o ionograma de uma forma mais próxima que é realizada pelo especialista humano. Esse processo é denominado nas etapas sugeridas anteriormente em **tratar o ionograma como uma figura**. O objetivo desta implementação foi eliminar os pontos sobrepostos, pois a ionossonda pode coletar mais de um eco na mesma frequência e altura, informação não visualizada pelo o analista humano. A concentração de pontos neste modelo é um item crucial na análise do ionograma. O perfil da ionosfera possui uma maior concentração de pontos comparado com as outras regiões do ionograma, sendo este um fator para destacá-lo no ionograma. Este processo não traz nenhuma modificação visual no ionograma.

Entre os processos de remover os ruídos tipo 1 e tipo 2 identificou-se que os ecos com baixa amplitude, ou seja, amplitude menor do que 10 dB (pontos em azul no ionograma) influenciavam na identificação do perfil da ionosfera e estavam espalhados por todo o ionograma. Após a análise sobre diversos ionogramas observou-se que esta influência não era considerável, pois quando os mesmos pertenciam ao perfil da ionosfera estavam próximos de outros ecos com amplitude maior. Portanto, eles foram descartados. Para reduzir o número de ecos que a primeira filtragem deixou, foi inserida uma opção para o analista filtrar os ecos espalhados em altura, onde o ionograma é subdividido em 0,01 MHz em frequência por 20 km em altura, resultando em uma matriz de 2000 x 50, ou seja, 100.000 sub-regiões. Esta escala em frequência é a precisão fornecida pela ionossonda CADI. Neste processo é analisado se em uma mesma frequência a distribuição de ecos em altura é maior que 150 km, caso esta condição seja verdadeira estas sub-regiões são eliminadas do ionograma. Por que esta filtragem é opcional? Porque quando ocorre irregularidades na ionosfera uma das assinaturas destas irregularidades no ionograma é o espalhamento dos ecos em altura. Quando esta filtragem é realizada o perfil da ionosfera pode ser excluído. Um detalhe importante é que quando ocorrem as irregularidades ionosféricas

os parâmetros ionosféricos geralmente não são identificados pelo analista humano.

No processo para eliminar os ruídos tipo 2 em Pillat et al. (2008) foi implementada uma técnica simples, onde o ionograma foi subdividido em sub-regiões de 1,0 MHz em frequência por 30 km em altura. Analisando, para cada sub-região, a concentração de pontos, se esta sub-região contiver menos de 5 pontos esta sub-região é considerada ruído e descartada. Mas, foi analisado que esta técnica poderia excluir as bordas do perfil da ionosfera, assim comprometendo a extração dos parâmetros ionosféricos. Portanto, este processo de filtragem foi alterado. Modificando o tamanho das regiões para 0,5 MHz em frequências por 50 km em altura (800 sub-regiões). Esta filtragem é ativada caso o ionograma possua um total de ecos observados maior ou igual a 1200 ecos, com isto eliminando as regiões que possuam menos de 3 ecos.

Figura 5.7 - Exemplo do ionograma obtido em 08 de março de 2004 as 08:00 UT em São José dos Campos, com as sub-regiões definidas de forma homogênea.

A Figura 5.7 ilustra o ionograma subdividido em retângulos homogêneos de 0,5 MHz em frequência por 50 km em altura. Observe que neste tipo de divisão existem vários retângulos vazios que são incluídos na análise, deste modo aumentando o tempo de processamento. Este processo será otimizado com a definição do grupo de retângulos que serão utilizados na definição da localização do perfil da ionosfera, que será mostrada na próxima seção.

5.3 Identificação do grupo de retângulo com maior concentração de pontos

Utilizando as regiões definidas na seção anterior é realizada uma busca sobre as cinco regiões com maior concentração de pontos. A identificação das cinco regiões com maior concentração de pontos aumenta a área de atuação do método buscando coletar todas as possíveis regiões no ionograma que podem conter o perfil da ionosfera. A identificação destas cinco regiões necessitou passar por alguns testes, pois as vezes ocorre que as regiões com maior concentração de pontos não esteja relacionada com o perfil da ionosfera. Assim se acaba selecionando a região da segunda reflexão, ou quando o ionograma possui uma baixa concentração de pontos selecionam-se regiões que contenham algum tipo de ruído. Para identificar a validade da região selecionada, são realizados os testes abaixo.

- No caso da segunda reflexão, compara-se a posição em altura da região selecionada com as outras regiões (regiões comparadas). Caso a posição da região selecionada possua uma diferença maior ou igual a 150 km a região selecionada é descartada. De outra forma, caso a posição da região comparada seja maior ou igual a 150 km, a região comparada é descartada.

- Analogamente no caso de ruídos compara-se a posição em frequência da região selecionada com as outras regiões (regiões comparadas). Caso a posição da região selecionada possua uma diferença maior ou igual a 3,5 MHz a região selecionada é descartada. De outra forma, caso a posição da região comparada seja maior ou igual a 3,5 MHz, a região comparada é descartada.

Quando ocorre uma das situações acima as cinco regiões com maior concentração de pontos são recalculadas. Esse processo se repete até que as cinco regiões estiverem próximas ou quando não for mais possível identificar as cinco regiões com maior concentração de ponto, pois elas foram eliminadas na busca. A Figura 5.8 mostra o resultado desta busca com as cinco regiões identificadas na seguinte ordem: a região com a maior concentração de pontos é destacada em vermelho, a segunda em verde, a terceira em azul, a quarta em cian e a quinta em preto. As outras regiões identificadas no ionograma em amarelo são as regiões que passaram pelos filtros de ruído e serão analisadas em processos posteriores para possível agrupamento com a região do perfil da ionosfera. Vale ressaltar que as regiões que foram descartadas no

processo de busca das regiões com maior concentração de pontos retornam as regiões válidas para identificar a região do perfil da ionosfera. Esta seleção é apresentada na próxima seção.

Figura 5.8 - Ionograma com a identificação das cinco regiões com maior concentração de pontos (vermelho, verde, azul, ciã e preto) e as demais regiões válidas, em amarelo.

5.4 Identificação da região que contem o perfil da ionosfera

Após a definição das regiões que podem conter o perfil da ionosfera são criadas duas árvores para definir quais são as regiões vizinhas de cada região. Antes da definição destas árvores os dados são segmentados por região ionosférica, região E e região F. Esta separação é realizada de maneira pontual, pois segundo Schunk e Nagy (2000) e Tascione (1988) a região E está situada aproximadamente entre 100 e 200 km, portanto todos os retângulos que estão abaixo de 200 km pertencem a região E e todos os retângulos que estão acima de 200 km pertencem a região F. Com a definição das regiões ionosféricas foi possível construir as árvores de vizinhança das regiões do ionograma. A primeira árvore é construída sobre as regiões que estão situadas uma frequência superior, 0,5 MHz, a região selecionada e são identificados os vizinhos em altura deslocados uma altura para cima, 50 km, ou na mesma altura da região selecionada. Esta árvore vai armazenar os vizinhos de regiões maiores que a região selecionada em frequência construindo os caminhos possíveis a partir de cada nó da árvore. O resultado desta árvore é ilustrada na Figura 5.9(a). A segunda

árvore é construída do lado inverso da primeira, sendo que é analisado se existem regiões situadas em uma frequência inferior, 0,5 MHz, a região selecionada e são identificados os seus vizinhos deslocados em altura uma altura para baixo, 50 km, e na mesma altura. O resultado desta árvore é ilustrada na Figura 5.9(b). Com estas duas árvores é possível identificar todos os vizinhos de uma região. Onde a primeira árvore analisa o caminho incrementando a frequência e a altura, enquanto a segunda árvore analisa o caminho inverso.

arv - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

1	0	0
2	0	0
3	7	4
4	0	5
5	8	6
6	9	0
7	0	0
8	14	9
9	15	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	18	0
14	0	15
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	23	21
21	24	0
22	0	0
23	0	24
24	28	25
25	29	0
26	0	0
27	0	0
28	30	29
29	31	0
30	33	31
31	0	0
32	0	0
33	0	0
34	0	0
35	0	0
36	0	0
37	0	0
38	0	0
39	0	0
40	0	0
41	0	0

(a)

arv1 - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	3	0
5	4	0
6	5	0
7	0	3
8	0	5
9	8	6
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	8
15	14	9
16	0	0
17	0	0
18	0	13
19	0	0
20	0	0
21	20	0
22	0	0
23	0	20
24	23	21
25	24	0
26	0	0
27	0	0
28	0	24
29	28	25
30	0	28
31	30	29
32	0	0
33	0	30
34	0	0
35	0	0
36	0	0
37	0	0
38	0	0
39	0	0
40	0	0
41	0	0

(b)

Figura 5.9 - Árvores de vizinhança construídas para o ionograma obtido em 08 março de 2004 em São José dos Campos ilustrada na Figura 5.8. a) Apresenta a árvore de vizinhança superior e sua estrutura da região selecionada, sendo que as colunas significam: região selecionada, vizinho da direita na próxima altura, e vizinho da direita na mesma altura, respectivamente. b) Apresenta a árvore de vizinhança inferior e sua estrutura da região selecionada, sendo que as colunas significam: região selecionada, vizinho da esquerda na mesma altura, e vizinho da esquerda em uma altura inferior, respectivamente.

Na Figura 5.9 os valores representam a identificação de cada região, retângulo, no ionograma. Caso o valor seja igual a zero significa que nenhuma região foi selecionada. Nestas figuras também é possível observar que algumas regiões estão isoladas no ionograma, ou seja, possivelmente são ruídos espalhados pelo ionograma. Para

identificar se estas regiões são ruídos ou fazem parte do perfil da ionosfera foi criado inicialmente a ligação entre as regiões, ou nós, da árvore. O primeiro caminho criado identifica os nós no sentido crescente em frequência para cada região. Este caminho é importante para verificar a concentração de pontos partindo de cada região. Conforme é ilustrado na Figura 5.10.

cam - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

3 (1,5-200)	300	007 (2-250)	004 (2-200)	005 (2,5-200)	008 (3-250
4 (2-200)	231	005 (2,5-200)	008 (3-250)	014 (3,5-300)	015 (4-300
5 (2,5-200)	179	008 (3-250)	014 (3,5-300)	015 (4-300)	009 (3,5-2
6 (3-200)	56	009 (3,5-250)	015 (4-300)		
8 (3-250)	72	014 (3,5-300)	015 (4-300)	009 (3,5-250)	015 (4-300
9 (3,5-250)	6	015 (4-300)			
13 (1,5-300)	7	018 (2-350)			
14 (3,5-300)	6	015 (4-300)			
20 (1,5-400)	178	023 (2-450)	024 (2,5-450)	028 (3-500)	030 (3,5-5
21 (2-400)	109	024 (2,5-450)	028 (3-500)	030 (3,5-550)	033 (4-600
23 (2-450)	109	024 (2,5-450)	028 (3-500)	030 (3,5-550)	033 (4-600
24 (2,5-450)	72	028 (3-500)	030 (3,5-550)	033 (4-600)	031 (4-550
25 (3-450)	13	029 (3,5-500)	031 (4-550)		
28 (3-500)	38	030 (3,5-550)	033 (4-600)	031 (4-550)	029 (3,5-5
29 (3,5-500)	5	031 (4-550)			
30 (3,5-550)	11	033 (4-600)	031 (4-550)		

Figura 5.10 - Exemplo do arquivo de caminho construído a partir da árvore apresentada na Figura 5.9(a). As colunas representam respectivamente os seguintes itens: região selecionada, ou início do caminho, com a sua frequência e altura inicial; quantidade de pontos do caminho; e as regiões que pertencem ao caminho, com as suas respectivas frequências e alturas iniciais.

A partir deste ponto é realizada a criação dos caminhos para as cinco regiões que possuem maior concentração de pontos, com este processo é possível agrupar as regiões que podem conter o perfil da ionosfera, conforme é ilustrado na Figura 5.11

Na Figura 5.11 é possível observar que na busca não foram selecionadas todas as regiões do perfil da ionosfera não capturando o início e o final do perfil. Para solucionar casos similares a este foi realizado um novo levantamento sobre as regiões próximas desta região identificada, analisando os limites em frequência da região e procurando regiões localizadas até 2,5 MHz em frequência e 250 km em altura maiores que o limite da região e agrupando estes novos retângulos a região selecionada. Este processo se repete até que os limites da região selecionada não fosse alterado. O resultado é apresentado na Figura 5.12

Na Figura 5.12 é observado que todas as regiões que podem fazer parte do perfil da ionosfera foram identificadas. Também importante ressaltar que não foram selecionados pontos localizados muito fora desta região. Mas, a eficiência deste processo não é para todos os formatos de ionograma e necessita de diversos ajustes como é

mostrada nos exemplos ilustrados na figura 5.13.

Figura 5.11 - Ionograma obtido em 08 de março de 2004 às 09:05 UT em São José dos Campos, com as regiões definidas como válidas para a busca do perfil da ionosfera

Figura 5.12 - Ionograma obtido em 08 de março de 2004 às 09:05 UT em São José dos Campos, com as regiões definidas como válidas para a busca do perfil da ionosfera, aumentando a área de busca

Na Figura 5.13 são apresentados os casos onde o método dos caminhos falha na busca da região onde está contido o perfil da ionosfera. Nas Figuras 5.13(a),5.13(b) e 5.13(d) o método agrupa a segunda reflexão com o perfil da ionosfera. Enquanto na Figura 5.13(c) a parte inferior do perfil não é agrupado a região. Para resolver este problema foi aplicada a relação nebulosa que será apresentada na próxima seção.

Figura 5.13 - Exemplos de ionogramas obtidos em São José dos Campos onde o método dos caminhos agrupam regiões incorretas para identificar o perfil da ionosfera.

5.5 Justificativa da aplicação da Relação Nebulosa

Até o momento foram aplicadas algumas técnicas para identificação do perfil da ionosfera, mas foi identificado que em alguns casos a metodologia utilizada não estava cobrindo a região do perfil da ionosfera. Para auxiliar na solução desta etapa foi aplicada a relação nebulosa, descrita no Capítulo 3. A inspiração da aplicação de relação nebulosa para identificar a região onde está situado o perfil da ionosfera surgiu do exemplo apresentado por Tsoukalas e Uhrig (1997), onde a relação nebulosa foi utilizada para criar uma região nebulosa em torno de uma função. O perfil da ionosfera possui características similares de uma função. Na Figura 5.14 é apresentado o exemplo de Tsoukalas e Uhrig (1997) e uma simulação manual da região nebulosa em torno do perfil da ionosfera.

A aplicação de relação nebulosa na identificação do perfil da ionosfera foi apresentada em (PILLAT; GUIMARÃES, 2010). Contudo, na ocasião os conjuntos nebulosos

utilizados na relação nebulosa eram estáticos, possuindo apenas dois conjuntos de regras diferentes um para os ionogramas que sofrem a influência do Sol (dia) e outro para os ionogramas que não sofrem a influência do Sol (noite). Note que a relação utilizando conjuntos estáticos não cobre o perfil da ionosfera. Este perfil fica fora da região definida no conjunto nebuloso, conforme é ilustrado na Figura 5.15. Esse problema ocorre, pois a ionosfera tem um comportamento dinâmico e depende muito da atividade solar. Para melhorar o desempenho da relação nebulosa foi implementado um método onde os conjuntos nebulosos são definidos conforme a distribuição dos pontos no ionograma. A metodologia deste processo de ajuste dos conjuntos nebulosos para serem aplicados na relação nebulosa é apresentada na próxima seção.

Figura 5.14 - Exemplo de utilização da relação nebulosa. a) Ilustra regiões nebulosas definidas para pontos da função. b) Ilustra região nebulosa definida sob a função da Figura 5.14a. c) Ilustração de como seria a relação nebulosa aplicada em um ionograma.

Figura 5.15 - Exemplo utilizando os conjuntos nebulosos estáticos definidos em (PILLAT; GUIMARÃES, 2010).

5.5.1 Ajuste dos conjuntos nebulosos

Nesta seção são apresentadas as definições para construção dos conjuntos nebulosos que são utilizados na relação nebulosa que define a área de atuação do modelo na extração dos parâmetros ionosféricos. Foi observado que os conjuntos nebulosos necessários para criar a relação nebulosa são dois: um conjunto para representar as informações da frequência; e outro para representar as informações da altura. Na classificação destes conjuntos nebulosos é utilizado a função triangular, devido a sua facilidade na implementação. Para cada conjunto nebuloso foram definidas três regiões, ou seja, o universo de discurso dos conjuntos nebulosos é dividido em três regiões que representam as áreas onde estão situados os parâmetros ionosféricos que o modelo se propõe a extrair. Portanto, cada triângulo pode ser descrito como:

- T1 - triângulo que representa a área onde se situa o limite inferior de altura do perfil da ionosfera na camada F, denominado h'F.
- T2 - triângulo que representa a área onde se situa a altura do pico de densidade eletrônica do perfil ionosférico, denominado hpF2.
- T3 - triângulo que representa a área onde se situa a frequência relativa ao pico de densidade eletrônica, denominado foF2.

Um problema encontrado é a definição dos limites de cada triângulo, pois como o perfil da ionosfera possui formatos variados, devido a influência que a ionosfera sofre da atividade solar, sazonalidade, localização de observação, etc. Para solucionar este problema foi implementado um método adaptativo para cada ionograma dependendo da distribuição da região encontrada no método dos caminhos descritos anteriormente, que será chamada como região R. Então para definir os limites de cada triângulo no conjunto nebuloso é utilizado a seguinte metodologia:

T1 em altura: é atribuído o limite inferior da região R como limite médio do triângulo, com o valor máximo de pertencimento (um), o valor mínimo do triângulo é definido do limite inferior da região R menos 100 km, com pertencimento zero, e o valor máximo do triângulo é definido do limite inferior da região R mais 150 km, com pertencimento zero. Neste triângulo caso o valor do limite inferior da região R for igual a 150 km o valor mínimo do triângulo é dada do valor do limite inferior da região R menos 20 km. As coordenadas do triângulo são: (limite inferior da região R - 100,0), (limite inferior da região R,1), (limite inferior da região R + 100,0).

T1 em frequência: é atribuído o limite inferior da região R como limite médio do triângulo, com o valor máximo de pertencimento, o limite mínimo do triângulo é definido do limite inferior da região R menos o **valor médio de frequência** (valor médio de frequência é a média simples entre o limite superior e inferior em frequência da região R), com valor de pertencimento zero, e o limite máximo do triângulo é definido do limite inferior da região R mais 1,5 vezes o valor médio de frequência, com valor de pertencimento zero. As coordenadas do triângulo são: (limite inferior da região R - valor médio de frequência, 0),(limite inferior da região R, 1), (limite inferior da região R + (1,5 * valor médio de frequência), 0).

O triângulo T1 mantêm seu tamanho no conjunto nebuloso definido para altura a mudança que ele sofre neste caso é só o deslocamento sobre o universo de discurso. Enquanto no conjunto nebuloso definido para a frequência o triângulo pode variar o seu formato, visto que a base de sua construção está sobre o valor médio de frequência. A implementação destas variáveis supriram o problema na definição da base do perfil da ionosfera da camada F, conforme é ilustrado na Figura 5.16.

Na definição dos limites dos triângulos T2 e T3 em altura e frequência são utilizadas as seguintes variáveis:

Variável	Descrição
diffreq	Distribuição em frequência
difalt	distribuição em altura
freqmin	frequência mínima
freqmax	frequência máxima
valorm	valor médio em altura
mvalor	valor médio em frequência
passo	passo em altura

T2 em altura: para definir os limites do triângulo T2 em altura foram criadas algumas regras que dependem da distribuição em frequência e altura da região R, abaixo um exemplo das regras criadas:

SE (diffreq > 4 E (freqmin < 4 E (difalt >= 150 E difalt < 300))) ENTÃO
O limite médio do triângulo é o valorm, com pertencimento um, o limite mínimo do triângulo é o valorm - passo, com pertencimento zero, e o limite máximo do triângulo é o valorm + 20, com pertencimento zero.
FIM SE

Para aplicar uma variação nas dimensões deste triângulo foram criadas dezesseis regras semelhantes a apresentada acima. A diferença consiste nas expressões relacionais utilizadas na condição SE. Neste exemplo, a regra é ativada caso a distribuição em frequência (diffreq), seja maior que 2,0 MHz, a frequência mínima (freqmin), seja menor que 2,0 MHz, e a distribuição em altura (difalt), esteja entre 150 e 300 km. Construindo, desta forma, um triângulo com as seguintes coordenadas: (valormpasso, 0), (valorm, 1), (valorm+20, 0).

T2 em frequência: para definir os limites do triângulo T2 em frequência foram criadas algumas regras que dependem da distribuição em frequência e altura da região R, abaixo um exemplo das regras criadas:

SE (diffreq < 4 E (freqmin < 4 E (difalt >= 150 E difalt < 300))) ENTÃO O limite médio do triângulo é o freqmin - (freqmin/6), com pertencimento máximo, o limite mínimo do triângulo é o freqmin - mvalor, com pertencimento zero, e o limite máximo do triângulo é o freqmin + mvalor, com pertencimento zero. FIM SE

Para aplicar uma variação nas dimensões deste triângulo foram criadas dezessete regras semelhante a apresentada acima. A diferença consiste nas expressões relacionais utilizadas na condição SE. Neste exemplo, as condições para ativar a regra são as mesmas definidas para o exemplo apresentado na definição dos limites para T2 em altura. Construindo, desta forma, um triângulo com as seguintes coordenadas: (freqmin-mvalor, 0), (freqmin-(freqmin/6), 1), (freqmin+mvalor, 0).

Para este triângulo foram definidas trinta e três regras para auxiliar na construção da região nebulosa identificando a região onde se encontra o parâmetro ionosférico, hpF2. O triângulo T2 sofre influência em todos os seus limites tanto em altura como em frequência. Esta oscilação é para a relação nebulosa se adaptar aos diversos formatos do perfil da ionosfera. Este triângulo tem a função de identificar o parâmetro relacionado a altura do pico da camada F, hpF2, que tem forte influência do parâmetro ionosférico foF2 (frequência crítica da camada F). A Figura 5.16 ilustra a relação nebulosa aplicada no ionograma.

Para o triângulo T3 o valor médio de altura, valorm, é incrementado em 50 km, ou seja, o valorm é deslocado em altura para se adequar a última região.

T3 em altura: para definir os limites do triângulo T3 em altura foram criadas algumas regras que dependem da distribuição em frequência e altura da região R, abaixo um exemplo das regras criadas:

SE (diffreq < 4 E (freqmin < 4 E (difalt >= 150 E difalt < 300))) ENTÃO O limite médio do triângulo é o valorm, com pertencimento máximo, o limite minímo do triângulo é o valorm - passo, com pertencimento zero, e o limite máximo do triângulo é o valorm + 150, com pertencimento zero. FIM SE

Para aplicar uma variação nas dimensões deste triângulo foram criadas dezesete regras semelhante a apresentada acima. A diferença consiste nas expressões relacionais utilizadas na condição SE. Neste exemplo, a regra é ativada caso a diffreq, distribuição em frequência, for maior que 2,0 MHz, a freqmin, frequência mínima, for menor que 2,0 MHz, e a difalt, distribuição em altura, estiver entre 150 e 300 km. Construindo, desta forma, um triângulo com as seguintes coordenadas: (valorm-passo, 0), (valorm, 1), (valorm+150, 0).

T3 em frequência: para definir os limites do triângulo T3 em frequência foram criadas algumas regras que dependem da distribuição em frequência e altura da região R, abaixo um exemplo das regras criadas:

SE (diffreq <4 E (freqmin < 4 E (difalt >= 150 E difalt < 300))) ENTÃO O limite médio do triângulo é o freqmax - (freqmax/4), com pertencimento máximo, o limite mínimo do triângulo é o freqmax - mvalor, com pertencimento zero e o limite máximo do triângulo é o freqmax + (1,8 * mvalor), com pertencimento zero. FIM SE

Para aplicar uma variação nas dimensões deste triângulo foram criadas dezoito regras semelhante a apresentada acima. A diferença consiste nas expressões relacionais utilizadas na condição SE. Neste exemplo, as condições para ativar a regra são as mesmas definidas para o exemplo apresentado na definição dos limites para T3 em altura. Construindo, desta forma, um triângulo com as seguintes coordenadas: (freqmax - mvalor, 0), (freqmax - (freqmax/4), 1), (freqmax+(1,8 * mvalor), 0).

Para este triângulo foram definidas trinta e cinco regras para auxiliar na construção da região nebulosa identificando a região onde se encontra o parâmetro ionosférico, foF2. O triângulo T3 sofre influência no limite mínimo e no limite máximo para frequência e com relação a altura sofre influência apenas no limite máximo para altura. Esta oscilação auxilia a relação nebulosa a se adaptar aos diversos formatos do perfil da ionosfera. A Figura 5.16 ilustra a relação nebulosa aplicada no ionograma.

A aplicação desses conjuntos nebulosos sobre as regiões identificadas no ionograma nos retorna os valores de pertencimento para os retângulos pertencentes a região R

do ionograma. Como o retângulo é uma área de pontos foi definido o ponto médio em altura e frequência para cada retângulo, este ponto é calculado utilizando a média simples ((limite superior - limite inferior) /2) + limite inferior). A partir deste ponto médio foi calculado o valor de pertencimento do retângulo.

Figura 5.16 - Exemplo dos conjuntos nebulosos aplicados no ionograma obtido em 02 de outubro de 2000 às 10:00 UT com as regiões nebulosas definidas, retângulos em amarelo, e os conjuntos nebulosos calculados para altura e frequência.

A relação nebulosa entra com o intuito de eliminar os retângulos que estão na região R indevidamente. Esta eliminação é realizada da seguinte forma, são mantidos na região R os retângulos que possuírem o valor de pertencimento em altura e em frequência maior ou igual a 0,5. As Figuras 5.17 e 5.18 mostram alguns exemplos do desempenho da relação nebulosa na identificação da área onde está situado o perfil da ionosfera.

Na Figura 5.17 é ilustrado um exemplo de aplicação da relação nebulosa, região amarela, onde são identificadas as regiões que farão parte da região R, pontos em vermelho. Observe que com a relação nebulosa foram removidas as segundas reflexões das figuras 5.17(a),5.17(b) e 5.17(d). Enquanto na Figura 5.17(c) foi incluído o início do perfil da ionosfera. Esses são alguns resultados da aplicação da relação nebulosa

em ionogramas obtidos em São José dos Campos.

Figura 5.17 - Exemplos de ionogramas obtidos em São José dos Campos com a aplicação da relação nebulosa na identificação do perfil da ionosfera, ilustrando a importância da relação nebulosa neste processo de identificação do perfil da ionosfera comparada com o método dos caminhos ilustrado na Figura 5.13.

A Figura 5.18 ilustra o comportamento da aplicação desse novo método para o mesmo conjunto de dados apresentados na Figura 5.15 quando os conjuntos nebulosos utilizados eram estáticos.

Na Figura 5.18 é possível observar que a nova metodologia se adapta para os diferentes perfis da ionosfera, mas mesmo esta nova metodologia não conseguiu se adaptar ao caso quando o perfil da ionosfera da camada F está subdividido em duas regiões bem distantes como é o caso do perfil ilustrado na Figura 5.18(b), para trabalhar com este tipo de perfil deve ser implementado um sistema de reconhecimento diferente utilizando heurísticas diferentes da aplicada neste modelo, portanto para este modelo inicial este tipo de perfil não será tratado, mas fica como trabalho futuro a implementação de mais uma heurística para identificar este tipo de perfil.

Uma observação importante é que a modificação deste modelo é realizada de maneira bem simples podendo incluir, editar ou excluir as regras para ajustar o modelo a uma estação específica. A comparação dos resultados obtidos por esse modelo com

os dados extraídos manualmente serão apresentados no Capítulo 6.

Figura 5.18 - Exemplos de ionogramas obtidos em São José dos Campos com a aplicação da relação nebulosa na identificação do perfil da ionosfera, ilustrando o ganho na identificação utilizando relação nebulosa comparada com a Figura 5.15.

Nesta seção foi apresentada a metodologia que destaca o perfil da ionosfera utilizando um paradigma de inteligência artificial chamado lógica nebulosa, mais especificamente relação nebulosa, para definir os retângulos que possuem as características mais próximas de conter o perfil da ionosfera. É possível notar que este método se adéqua a uma grande variedade de formas do perfil da ionosfera, mas mesmo este método utilizando uma heurística adaptativa não consegue cobrir todos os formatos. Este problema pode ser solucionado com a implementação de novas regras para absorver estes perfis diferentes. Outra solução para este caso é o pós processamento dos parâmetros ionosféricos extraídos observando se não houve uma mudança brusca entre os parâmetros ionosféricos extraídos de um ionograma para o próximo ionograma. Esta análise geralmente é realizada pelo analista humano e pode ser implementada em um trabalho futuro. A próxima seção aborda a extração dos parâmetros ionosféricos utilizando uma curva característica sobre o ionograma.

5.6 Preparar os dados para extração dos parâmetros ionosféricos

A extração dos parâmetros ionosféricos é realizada utilizando apenas a região com maior concentração de pontos encontrada pelos métodos descritos anteriormente. O processo a partir deste ponto volta a ser em cima dos ecos e não sobre os retângulos que contêm os ecos. Para realizar a extração dos dados neste primeiro método é utilizado o ajuste polinomial na orientação do sistema no processo de extração dos parâmetros. Este processo de extração dos parâmetros precisa ser realizado por parâmetro, ou seja, é necessário definir as características do parâmetro a ser extraído. A seguir são apresentadas as regras definidas para cada parâmetro ionosférico.

Os primeiros parâmetros que são passados para o cálculo do polinômio são os limites de altura e frequência da região R, assim definindo os limites do polinômio. Para analisar a região onde está o parâmetro ionosférico h'F que representa a altura da base do perfil da camada F, foi realizado o seguinte passo: todos os pontos inferiores ao limite inferior em frequência da região nebulosa definida pelos triângulos T2 em altura e frequência, passam por uma filtragem onde apenas é selecionado o ponto com menor altura por frequência. Os outros pontos não são alterados nesta etapa.

A extração do parâmetro foF2 que representa a frequência crítica (máxima) onde a densidade eletrônica é maior, é extraída utilizando os últimos pontos da região R. Para este parâmetro em alguns casos o analista humano necessita extrapolar o ponto observado pela ionossonda. Esta extrapolação é necessária devido a limitação do equipamento. O grau de extrapolação segue a orientação de (PIGGOTT; RAWER, 1972). Devido a este problema, para calcular este parâmetro mais próximo do valor real do mesmo é preciso realizar a extrapolação do foF2, que representa o pico de densidade eletrônica, para realizar esta extrapolação no modelo da mesma forma que o analista humano. Foram realizados alguns testes utilizando os limites da região R resultando nas seguintes regras:

- se a distribuição em frequência da região R for maior que 10 MHz e a distribuição em altura for menor que 200 km a extrapolação em frequência deve ser de 3 MHz, pois neste caso provavelmente a curvatura do perfil da ionosfera não foi captado pela ionossonda sendo necessário uma extrapolação maior para simular a curvatura do perfil.

- se a distribuição em frequência estiver entre 7 e 10 MHz e a distribuição em altura for menor que 200 km a extrapolação em frequência deve ser de 2 MHz, pois neste caso provavelmente foi capturado apenas o início da

curvatura do perfil da ionosfera sendo necessário a extrapolação do final desta curvatura.

- qualquer outro caso de distribuição de frequência e altura a extrapolação em frequência deve ser de 0,2 MHz, pois este perfil provavelmente já está inclinado e o ajuste deve ser mínimo.

Para o parâmetro hpF2 não foi realizado nenhum tratamento especial sobre os pontos selecionado para o cálculo do polinômio. Também foi identificado que um polinômio de quarta ordem se ajusta aos diferentes formatos do perfil da ionosfera. O polinômio foi definido utilizando o método de eliminação de Gauss sobre o sistema de funções obtido pelo método dos mínimos quadrados. Estes métodos são descritos na próxima seção.

5.6.1 Cálculo do polinômio utilizado na extração dos parâmetros ionosféricos do ionograma

O problema de ajuste de curvas no caso em que temos uma tabela de pontos $(x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2)), ..., (x_m, f(x_m))$, com $x_1, x_2, ..., x_m$, pertencentes a um intervalo [a, b], consiste em: "escolhidas" n funções $g_1(x), g_2(x), ..., g_n(x)$, contínuas em [a, b], obter n constantes $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n$ tais que a função $\varphi(x) = \alpha_1 g_1 + \alpha_2 g_2 + \alpha_n g_n$ se aproxime ao máximo de f(x). Este método é conhecido com um método matemático linear porque os coeficientes a determinar $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n$, aparecem linearmente, embora as funções $g_1(x), g_2(x), ..., g_n(x)$ possam ser funções não lineares de x (SPERANDIO et al., 2006).

A escolha das funções pode ser realizada observando o gráfico dos pontos tabelados ou baseando-se em fundamentos teóricos do experimento que nos forneceu a tabela. No caso deste trabalho foi utilizada a técnica de analisar os pontos do gráfico.

Dada uma tabela de pontos $(x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2)), ..., (x_m, f(x_m))$, deve-se, em primeiro lugar, colocar estes pontos num gráfico cartesiano. O gráfico resultante é chamado de diagrama de dispersão. Através deste diagrama pode-se visualizar a curva que melhor se ajusta aos dados (GOMES-RUGGIERO; LOPES, 1996). No presente trabalho o diagrama de dispersão é o ionograma.

Um caso especial de ajuste de curvas ocorre quando o diagrama de dispersão não apresenta características lineares. Nestas situações pode-se realizar o ajuste polino-

mial utilizando as seguintes funções $g_i(x)$:

$$g_0(x) = 1 \tag{5.2}$$
$$g_1(x) = x \tag{5.3}$$
$$g_2(x) = x^2 \tag{5.4}$$
$$g_3(x) = x^3 \tag{5.5}$$
$$\vdots \tag{5.6}$$
$$g_m(x) = x^m \tag{5.7}$$

deste modo, tem-se a seguinte equação:

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + ... + \alpha_m x^m, \tag{5.8}$$

ou seja, f(x) é um polinômio de grau m. Do estudo de interpolação polinomial sabe-se que estes polinômios são apropriados para aproximar funções de maneira satisfatória. Para o ajuste polinomial de curvas o sistema fica igual a:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \cdots & \sum x_i^m \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \cdots & \sum x_i^{m+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \cdots & \sum x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^m & \sum x_i^{m+1} & \sum x_i^{m+2} & \cdots & \sum x_i^{2m} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i x_i \\ \sum y_i x_i^2 \\ \vdots \\ \sum y_i x_i^m \end{bmatrix} . \tag{5.9}$$

O ajuste polinomial é um caso particular do método dos mínimos quadrados. Este método consiste em escolher os α_j's, coeficientes calculados, de tal forma que a soma dos quadrados dos desvios seja mínima. É claro que se a soma $\sum_{k=1}^{m} d_k^2 = \sum_{k=1}^{m} (f(x_k) - \varphi(x_k))^2$ é mínima, teremos que cada parcela $[f(x_k) - \varphi(x_k)]^2$ é pequena, donde cada desvio $[f(x_k) - \varphi(x_k)]$ é pequeno (GOMES-RUGGIERO; LOPES, 1996).

Para a resolução deste sistema linear matricial, geralmente, utiliza-se métodos diretos, entre eles se destacam os métodos de eliminação que evitam o cálculo direto da matriz inversa e além disto não apresentam problemas com o tempo de execução. O método utilizado neste trabalho é o método de eliminação de Gauss que consiste em transformar o sistema linear original num sistema linear equivalente com matriz

dos coeficientes triangular superior, pois estes são de resolução imediata. Os passos para esta resolução se encontram descritos em Gomes-Ruggiero e Lopes (1996).

Utilizando este método sobre os dados selecionados no ionograma foi possível obter os parâmetros do polinômio, ajustando uma curva sobre o perfil da ionosfera. A curva que melhor se adequou aos diferentes formatos do perfil da ionosfera necessitou de um polinômio de quarta ordem. O modelo utiliza esta curva como referência para extrair os parâmetros ionosféricos h'F, foF2 e hpF2. Esta extração dos parâmetros ionosféricos é apresentada na próxima seção.

5.6.2 Extração dos parâmetros ionosféricos utilizando o polinômio

Utilizando a curva definida pelos métodos dos mínimos quadrados e eliminação de Gauss, o modelo extrai os parâmetros ionosféricos, h'F, foF2 e hpF2, utilizando as seguintes regras:

- h'F - é utilizado o ponto médio entre o primeiro e o segundo ponto do polinômio para calcular a altura da base da camada F.

- foF2 - é utilizado o último ponto válido do polinômio. Por que não o último ponto? Porque o polinômio em alguns casos quando é utilizada a extrapolação a curva não é continuada. Portanto, o último ponto é considerado válido se a altura dele for menor que 1000 km e contenha um valor em altura pelo menos 10 km superior ao ponto anterior.

- hpF2 - é utilizado o ponto que representa o parâmetro ionosférico foF2, extraído no passo anterior, na fórmula de (PIGGOTT; RAWER, 1972), onde fp = foF2 * 0,834, após o cálculo da fp (frequência de plasma) esta frequência é utilizada como referência na busca do ponto mais próximo desta frequência na curva. Este ponto é utilizado para determinar o valor onde a curva corta na altura a fp assim extraindo o parâmetro ionosférico hpF2.

Este modelo foi aplicado aos dados obtidos em São José dos Campos em diversos períodos, aproximadamente 50 mil ionogramas foram analisados entre 2000 e 2009. A comparação entre parâmetros extraídos manualmente e automaticamente apresentou bons resultados. Na Figura 5.19 são ilustrados alguns resultados dos parâmetros extraídos pelo modelo para o dia 24 de agosto de 2001 sobre os ionogramas obtidos em São José dos Campos.

Figura 5.19 - Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 24 de agosto de 2001 com a curva do polinômio traçada sobre o traço da camada F e os parâmetros ionosféricos identificados por cruz.

Figura 5.20 - Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 08 de julho de 2003 com a curva do polinômio traçada sobre o traço da camada F e os parâmetros ionosféricos identificados por cruz.

Na Figura 5.20 é apresentada uma animação para ilustrar o desempenho do modelo de extração automática de parâmetros ionosféricos. Esta animação representa a extração de parâmetros ionosféricos ocorrida em São José dos Campos no dia 24 de agosto de 2001.

O modelo também foi aplicado aos dados obtidos em Palmas em diversos períodos, aproximadamente 10 mil ionogramas foram analisados entre 2002 e 2007. A comparação entre parâmetros extraídos manualmente e automaticamente apresentou bons resultados. Na Figura 5.21 são ilustrados alguns resultados dos parâmetros extraídos pelo modelo para o dia 08 de julho de 2003 sobre os ionogramas obtidos em Palmas.

Figura 5.21 - Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 08 de julho de 2003 com a curva do polinômio traçada sobre o traço da camada F e os parâmetros ionosféricos identificados por cruz.

Figura 5.22 - Ionogramas obtidos em São José dos Campos no dia 08 de julho de 2003 com a curva do polinômio traçada sobre o traço da camada F e os parâmetros ionosféricos identificados por cruz.

Na Figura 5.22 é apresentada uma animação para ilustrar o desempenho do modelo de extração automática de parâmetros ionosféricos. Esta animação representa a extração de parâmetros ionosféricos ocorrida em Palmas no dia 08 de julho de 2003.

5.7 Conclusões

A apresentação de um modelo original e inovador desenvolvido neste trabalho utilizando relação nebulosa. Onde foram apresentadas todas as etapas desde a visualização do ionograma até a extração dos parâmetros ionosféricos h'F, foF2 e hpF2 que foi realizada utilizando uma curva calculada, sobre os ecos selecionados pela relação nebulosa, utilizando o método dos mínimos quadrados e o método de eliminação de Gauss.

No próximo capítulo são apresentadas algumas comparações dos parâmetros extraídos automaticamente com os parâmetros extraídos manualmente por um analista humano.

6 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO E OS OBTIDOS MANUALMENTE POR UM ANALISTA

Neste Capítulo são comparados os parâmetros ionosféricos, foF2, h'F e hpF2, extraídos automaticamente pelo modelo com os parâmetros extraídos manualmente. A comparação é realizada pela ferramenta denominada "Comparar redução de dados", disponível no UDIDA. A principal funcionalidade desta ferramenta é comparar as interpretações de dois analistas sobre um mesmo período. Esta ferramenta auxilia na identificação de arbitrariedades no aprendizado do analista. Este processo é realizado através da interface ilustrada na Figura 6.1

Figura 6.1 - Ferramenta utilizada para comparar os dados extraídos entre dois analistas

Na Figura 6.1 é mostrada a ferramenta de comparação entre dados reduzidos. Nesta interface existem as seguintes opções:

- Os quadros com os títulos "Caminho 1" e "Caminho 2" possuem as opções para selecionar o caminho e o tipo de arquivo que deseja procurar. Quando um arquivo é selecionado no quadro "Caminho 1" automaticamente o pro-

grama pesquisa o arquivo do mesmo período no quadro “Caminho 2”. Após selecionar os arquivos de cada quadro, os mesmos são carregados e visualizados na forma de gráfico. O nome do analista é visualizado na parte inferior de cada quadro, conforme apresentado na Figura 6.1. Observação: para este trabalho foi realizada uma modificação no processo de busca, pois os arquivos gerados pelo modelo possuem a letra “a” no final do nome do arquivo. Desta forma, quando é selecionado um arquivo no primeiro quadro o programa busca o arquivo com o mesmo nome, mas com a letra “a” no final do nome. Por exemplo: Se o arquivo selecionado no primeiro quadro for “2001H24F.sjc” o programa buscará o arquivo com o nome “2001H24Fa.sjc”.

- O quadro “Comparar” possui as opções para escolher o parâmetro ionosférico que será visualizado, foF2, h’F, ou hpF2, ou a diferença entre os dois analistas para cada parâmetro, foF2-Dif, h’F-Dif, ou hpF2-Dif.

- O quadro “Histogramas” possui as opções para visualizar a distribuição das diferenças entre as duas extrações para cada parâmetro ionosférico, foF2, h’F e hpF2.

- O botão “Salvar Dif” é utilizado para gravar um arquivo texto com a distribuição das diferenças entre as duas extrações de todos os parâmetros ionosféricos.

- O botão “Salvar Movel” é utilizado para gravar um arquivo com todos os parâmetros ionosféricos ajustados por uma média móvel.

- A caixa “Movel” é utilizada para calcular a média móvel sobre o parâmetro ionosférico selecionado no segundo quadro “Caminho 2”.

- A caixa “Limpar” é utilizada para remover os pontos que estão deslocados no gráfico. Por exemplo, às 00:30 é extraída a frequência 7,5 MHz, às 00:35 é extraída a frequência 12 MHz e às 00:40 é extraída a frequência 8 MHz. Neste exemplo a frequência 12 MHz é excluída dos dados.

Esta ferramenta auxilia na comparação do desempenho do modelo com relação ao analista humano. Para analisar o desempenho do modelo sobre a extração dos parâmetros ionosféricos foram selecionados períodos que um analista experiente na área de redução de dados realizou a extração dos parâmetros.

6.1 Comparação da extração dos parâmetros ionosféricos de maneira manual versus automática em ionogramas obtidos em São José dos Campos

Nesta seção são apresentados alguns resultados do modelo sobre os ionogramas obtidos em São José dos Campos. O primeiro resultado mostra a comparação entre os parâmetros extraídos manualmente (linha azul) versus os extraídos automaticamente (linha vermelha), e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros ionosféricos, obtidos em São José dos Campos no dia 24 de agosto de 2001, conforme ilustrado na Figura 6.2.

Figura 6.2 - Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 24 de agosto de 2001 em São José dos Campos.

A Figura 6.2(a) mostra a comparação para o parâmetro foF2. Note-se que a comparação é muito boa, exceto durante o período diurno, quando os ionogramas apresentam uma degradação significativa. A Figura 6.2(b) mostra o resultado para o parâmetro h'F, é possível observar que o método automático fica muito próximo dos resultados obtidos manualmente durante todo o dia. A Figura 6.2(c) mostra o resultado para o parâmetro hpF2. Observe-se que para esse parâmetro o método automático se mantêm próximo ao parâmetro extraído manualmente praticamente durante todo o dia, exceto no período das 07:00 as 09:00 "Universal Time" (UT), devido a erros na identificação do parâmetro foF2. A comparação entre a média diária dos parâmetros foF2, h'F e hpF2 extraídos manualmente (foF2=7.8, h'F=228 e hpF2=293) e automaticamente (foF2=7.5, h'F=239 e hpF2=298) são boas.

A Figura 6.2(d) mostra que a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para o parâmetro foF2 fica entre -2 MHz e 5 MHz, com uma concentração maior entre -0,5 MHz e 0,5 MHz (aproximadamente 70%), os dados que estão fora deste intervalo é devido aos ionogramas com baixa qualidade. A Figura 6.2(e) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automática do parâmetro h'F. A maior porcentagem da diferença deste parâmetros está entre -50 km e 10 km (90%). A Figura 6.2(f) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automático para o parâmetro hpF2, observe que a concentração da diferença para esse parâmetro situa-se entre -50 km e 50 km (95%), essa oscilação é devido a extrapolação no final do traço da região F para identificar o parâmetro foF2.

O segundo resultado mostra a comparação entre os parâmetros extraídos manualmente (linha azul) versus os extraídos automaticamente (linha vermelha), e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros ionosféricos, obtidos em São José dos Campos no dia 08 de junho de 2003, conforme ilustrado na Figura 6.3.

A Figura 6.3(a) mostra a comparação para o parâmetro foF2, note que a comparação é muito boa. A Figura 6.3(b) mostra o resultado para o parâmetro h'F, é possível observar que o método automático fica muito próximo dos resultados obtidos manualmente durante todo o dia. A Figura 6.3(c) mostra o resultado para o parâmetro hpF2, observe que para esse parâmetro o método automático se mantêm próximo ao parâmetro extraído manualmente durante todo o dia. A comparação entre a média diária dos parâmetros foF2, h'F e hpF2 extraídos manualmente (foF2=7,2, h'F=221 e hpF2=294) e automaticamente (foF2=7,0, h'F=223 e hpF2=296) são boas.

A Figura 6.3(d) mostra que a distribuição da diferença entre a extração manual e

automática para o parâmetro foF2 fica entre -2 MHz e 2 MHz, com uma concentração maior entre -0,5 MHz e 0,5 MHz (aproximadamente 85%). A Figura 6.3(e) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automática do parâmetro h'F. A maior porcentagem da diferença deste parâmetro está entre -20 km e 20 km (79%). A Figura 6.3(f) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automático para o parâmetro hpF2, observe que a concentração da diferença para esse parâmetro situa-se entre -50 km e 50 km (97%).

Figura 6.3 - Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 08 de junho de 2003 em São José dos Campos.

O terceiro resultado mostra a comparação entre os parâmetros extraídos manual-

mente (linha azul) versus os extraídos automaticamente (linha vermelha), e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros ionosféricos, obtidos em São José dos Campos no dia 03 de janeiro de 2004, conforme ilustrado na Figura 6.4.

Figura 6.4 - Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 03 de janeiro de 2004 em São José dos Campos.

A Figura 6.4(a) mostra a comparação para o parâmetro foF2, note que a comparação é muito boa, exceto durante o período do entardecer, devido a presença da camada Es. A Figura 6.4(b) mostra o resultado para o parâmetro h'F, é possível observar que o método automático fica muito próximo dos resultados obtidos ma-

nualmente durante praticamente todo o dia, exceto durante o período das 13:00 às 19:00, onde a camada F1 e F2 estão bem separadas, nestes casos o analista humano também tem dificuldade de identificar este parâmetro. A Figura 6.4(c) mostra o resultado para o parâmetro hpF2, observe que para esse parâmetro o método automático se mantêm próximo ao parâmetro extraído manualmente durante todo o dia. A comparação entre a média diária dos parâmetros foF2, h'F e hpF2 extraídos manualmente (foF2=9,1, h'F=233 e hpF2=359) e automaticamente (foF2=8,9, h'F=236 e hpF2=350) são boas.

A Figura 6.4(d) mostra que a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para o parâmetro foF2 fica entre -5 MHz e 5 MHz, com uma concentração maior entre -0,5 MHz e 1,0 MHz (79%), os dados que estão fora desta faixa ocorre devido a presença da camada Es. A Figura 6.4(e) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automática do parâmetro h'F. A maior porcentagem da diferença deste parâmetro está entre -10 km e 50 km (87%). A Figura 6.4(f) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automático para o parâmetro hpF2, observe que a concentração de erro para esse parâmetro situa-se entre -20 km e 50 km (92%).

Analisando estes três casos é possível visualizar que o modelo possui um bom desempenho sobre os ionogramas obtidos em São José dos Campos. Com algumas exceções, como por exemplo, quando ocorre alguma irregularidade, ou com a presença da camada Es, ou problemas na obtenção dos ecos pela ionossonda. Outro ponto importante que diferencia a interpretação do modelo comparado com o analista humano é a extrapolação, pois no modelo sempre é utilizado o mesmo método independente do dia ou localidade, enquanto o analista humano depende de sua experiência e treinamento. Este processo realizado pelo analista humano pode gerar resultados diferentes entre dois analistas, por exemplo, um analista treinado em São José dos Campos pode interpretar diferente os ionogramas de um analista treinado em Palmas. Outro ponto importante é que o sistema é consistente, ou seja, independe do dia que o modelo seja utilizado a interpretação é sempre a mesma. Enquanto no caso do analista humano podem ocorrer diversas interpretações ao mesmo conjunto de dados, devido a algumas influências externas, como por exemplo, excesso de trabalho. Na Figura 6.5 são ilustradas as médias diárias de cada parâmetro ionosférico, extraído de forma manual (linha azul) ou de forma automática (linha vermelha), sobre os ionogramas obtidos São José dos Campos durante o mês de janeiro de 2004. Observe que a média entre os dois métodos ficaram muito próximas durante todo o período do mês. As discrepâncias que ocorrem nesta comparação na maioria das

vezes é devido ao modelo extrair os parâmetros ionosféricos para todos os ionogramas, mesmo nos ionogramas que possuem irregularidades, e o analista humano não extraí-lo, como ocorre na Figura 6.4(b).

Figura 6.5 - Comparação entre a média dos parâmetros ionosféricos foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente, do mês de janeiro de 2004, em São José dos Campos.

6.2 Comparação da extração dos parâmetros ionosféricos de maneira manual versus automática em ionogramas obtidos em Palmas

Nesta seção são apresentados alguns resultados do modelo sobre os ionogramas obtidos em Palmas. O primeiro resultado mostra a comparação entre os parâmetros extraídos manualmente (linha azul) versus os extraídos automaticamente (linha vermelha), e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros ionosféricos, obtidos em Palmas no dia 16 de agosto de 2003, conforme ilustrado na Figura 6.6.

A Figura 6.6(a) mostra a comparação para o parâmetro foF2, note que a comparação é muito boa até por volta das 13:00 UT, após este horário até às 21:00 UT o parâmetro foi subestimado, este problema ocorreu devido a presença da camada Es. A Figura 6.6(b) mostra o resultado para o parâmetro h'F, para este parâmetro em alguns períodos, das 7:00 às 9:00 UT, o traço da camada F não está presente, e das 13:00 às 17:00, a camada Es confunde o modelo na obtenção do parâmetro. A Figura 6.6(c) mostra o resultado para o parâmetro hpF2, observe que para esse parâmetro o método automático se mantêm próximo ao parâmetro extraído manualmente praticamente durante todo o dia, exceto no período das 13:00 as 18:00 UT, devido a erros na identificação do parâmetro foF2. A comparação entre a média diária dos parâmetros foF2, h'F e hpF2 extraídos manualmente (foF2=7.6, h'F=223 e hpF2=359) e automaticamente (foF2=7.1, h'F=230 e hpF2=331) são boas.

A Figura 6.6(d) mostra que a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para o parâmetro foF2 fica entre -2 MHz e 5 MHz, com uma concentração maior entre -0,5 MHz e 1,0 MHz (84%), os dados que estão fora deste intervalo é devido a presença da camada Es. A Figura 6.6(e) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automática do parâmetro h'F. A maior porcentagem da diferença deste parâmetros está entre -50 km e 50 km (76%). A Figura 6.6(f) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automático para o parâmetro hpF2, observe que a concentração da diferença para esse parâmetro situa-se entre -50 km e 50 km (80%), essa oscilação é devido a extrapolação no final do traço da região F para identificar o parâmetro foF2.

O segundo resultado mostra a comparação entre os parâmetros extraídos manualmente (linha azul) versus os extraídos automaticamente (linha vermelha), e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros ionosféricos, obtidos em Palmas no dia 26 de março de 2004, conforme ilustrado na Figura 6.7.

Figura 6.6 - Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 16 de agosto de 2003 em Palmas.

A Figura 6.7(a) mostra a comparação para o parâmetro foF2, note que a comparação é boa entre as 04:00 e 11:00 UT, fora deste intervalo o modelo sofre com o espalhamento na camada F e ruídos que são observados por todo o ionograma. A Figura 6.7(b) mostra o resultado para o parâmetro h'F, é possível observar que o método automático fica muito próximo dos resultados obtidos manualmente praticamente durante todo o dia, exceto durante o período entre 12:00 e 19:00, devido a presença da camada F1 em alguns ionogramas. A Figura 6.7(c) mostra o resultado para o parâmetro hpF2, observe que para esse parâmetro possui o mesmo comportamento do parâmetro foF2. A comparação entre a média diária dos parâmetros foF2, h'F e

hpF2 extraídos manualmente (foF2=9,3, h'F=228 e hpF2=375) e automaticamente (foF2=8,5, h'F=247 e hpF2=351) são razoáveis, levando em considerações que os ionogramas cobrem uma período de perturbação ionosférica.

Figura 6.7 - Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente e a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para os parâmetros foF2 (d), h'F (e) e hpF2 (f) do dia 26 de março de 2004 em Palmas.

A Figura 6.7(d) mostra que a distribuição da diferença entre a extração manual e automática para o parâmetro foF2 fica entre -1 MHz e 5 MHz, com uma concentração maior entre -0,2 MHz e 2,0 MHz (84%). A Figura 6.7(e) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automática do parâmetro h'F. A maior porcentagem da diferença deste parâmetro está entre -50 km e 50 km (84%). A Figura

6.7(f) mostra a distribuição da diferença entre a extração manual e automático para o parâmetro hpF2, observe que a concentração da diferença para esse parâmetro situa-se entre 10 km e 100 km (74%).

Os resultados apresentados para Palmas foram menos eficientes do que os apresentados em São José dos Campos. Esta diferença ocorre, devido aos dias que foram extraídos os parâmetros ionosféricos na estação de Palmas, ocorrerem durante atividade solar. Desta forma, são observadas irregularidades ionosféricas nos ionogramas, como a presença da camada Es, dificultando a extração dos parâmetros ionosféricos.

6.3 Conclusões

Neste Capítulo foram comparados alguns resultados do modelo com os parâmetros ionosféricos extraídos manualmente por um analista experiente. Foi observado que o modelo produziu resultados similares aos obtidos de maneira manual nas duas estações apresentadas, São José dos Campos e Palmas. Mas, também foi detectado que o modelo em alguns casos não consegue extrair o parâmetro de forma correta, devido a alguma irregularidade no ionograma. As irregularidades que podem provocar falhas na identificação do traço são três: ionograma com baixa qualidade, presença da camada Es, e presença de irregularidades ionosféricas. Mas, quando ocorrem um destes casos o analista humano também tem dificuldades na extração dos parâmetros ionosféricos. Os benefícios operacionais obtidos com a utilização deste modelo, no contexto do processo de apoio à decisão, são significativos. Os resultados alcançados com a aplicação deste modelo atendem aos objetivos propostos de otimizar o processo de identificação dos parâmetros ionosféricos, foF2, h'F e hpF2.

7 CONCLUSÕES

O estudo da ionosfera é importante devido à influência que ela exerce na transmissão de sinais que se propagam por ela, ou seja, os sinais enviados e recebidos pelos satélites. A presença de irregularidades ionosféricas podem provocar atrasos ou bloquear os sinais que passam por ela, como foi citado o exemplo do GPS. Por este motivo é importante o estudo da dinâmica da ionosfera em tempo real, mas para analisar as informações obtidas pelos diversos equipamentos demora muito tempo. Como foi apresentado no caso das ionossondas que geram um ionograma a cada cinco minutos. A tomada de decisão para informar se existe alguma irregularidade ionosférica é lenta. Devido ao processo que é realizado para analisar a dinâmica da ionosfera, onde são extraídos alguns parâmetros ionosféricos que caracterizam o perfil da ionosfera, foF2, h'F e hpF2. Com estes três parâmetros é possível analisar a dinâmica da camada F da ionosfera. Atualmente, esta extração dos parâmetros ionosféricos é realizada de forma manual sobre os ionogramas obtidos pela ionossonda CADI.

O objetivo desta tese foi propor e implementar um modelo de apoio à decisão para o processo de extração dos parâmetros ionosféricos, h'F, foF2 e hpF2, sobre os ionogramas obtidos por ionossondas do tipo CADI. Com o propósito de elevar a capacidade de analisar a dinâmica da ionosfera em tempo real. A relevância do modelo proposto consistiu na manutenção das atividades realizadas por um analista humano. De uma forma geral, o modelo proposto visa criar uma metodologia que pode ser aplicada a qualquer ionograma obtido por uma ionossonda CADI.

A implementação do modelo de apoio à decisão foi estruturada em duas partes: A primeira parte propõe uma abordagem de lógica nebulosa, relação nebulosa, para o problema de associação de dados, classificando os dados conforme a camada da ionosfera que ele pertence e identificando o traço ionosférico da região F. O objetivo desta parte é aprimorar as fases de observação e de orientação do modelo pela otimização do processamento dos dados de modo que o modelo processe de forma isolada cada região ionosférica. A segunda parte propõe o emprego do ajuste de curva polinomial utilizando o método de eliminação de Gauss para resolver o sistema linear de funções e determinar os parâmetros para ajustar uma curva sobre o traço ionosférico e utilizá-la como guia na extração dos parâmetros ionosféricos. Esta abordagem agrega as heurísticas empregadas pelos especialistas para apoiar a classificação e a identificação dos parâmetros ionosféricos

A utilização da relação nebulosa neste trabalho auxiliou na identificação do perfil da ionosfera incorporando a heurística emprega pelos especialistas. Com este paradigma

foi possível identificar diversas formas do perfil da ionosfera, assim se aproximando da interpretação realizada por um analista humano. Também foi observado que a aplicação deste modelo em ionogramas obtidos em regiões equatoriais, Palmas, obteve bons resultados.

Os benefícios operacionais observados com os resultados obtidos na aplicação do modelo proposto, no contexto do processo de apoio à decisão, foram significativos. Reduziu-se a interferência humana no processo de extração dos parâmetros ionosféricos, minimizando a dependência do conhecimento, do treinamento e da experiência do analista. Aprimoraram-se as fases de extração dos parâmetros ionosféricos minimizando as diferenças na extração, devido a problemas causados por: falha no treinamento ou outros fatores que influenciam na interpretação do analista. Deste modo, o modelo interpretará os ionogramas da mesma forma independente de qualquer fator externo.

Este modelo possui uma característica interessante. O ionograma é uma imagem. Desta forma, este modelo pode ser adaptado e aplicado a outras ionossondas sem muitas modificações, sendo necessário transformar os dados obtidos por estas ionossondas em imagens para o modelo carregar e realizar a extração dos parâmetros ionosféricos.

7.1 Sugestões

Esta tese alcançou os objetivos pretendidos e possibilita a projeção de alguns trabalhos futuros, tais como:

- Aplicação deste modelo para identificação dos parâmetros da região E, este processo melhoraria a identificação do parâmetro h'F, podendo realizar uma combinação entre as duas regiões como é proposto por (PIGGOTT; RAWER, 1972);
- Inserir um classificador de confiança sobre os parâmetros ionosféricos extraídos;
- Inserir classificadores de irregularidades atmosféricas; e
- Aplicar este modelo em ionogramas obtidos em outros tipos de ionossondas digitais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTHES, R. A.; CAHIR, J. J.; FRASER, A. B.; PANOFSKY, H. A. **The atmosphere**. Columbus: Charles E. Merrill Publishing Company, 1981. 442 p. 1

AROKIASAMY, J. B.; BIANCHI, C.; SCIACCA, U.; TUTONE, G.; ZUCCHERETTI, E. **The new INGV digital ionosonde**: Design report. 2002. 15, 16

BECKER-GUEDES, F.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; LIMA, W. L. C.; PILLAT, V. G.; ABALDE, J. R.; BITTENCOURT, J. A. Geomagnetic storm and equatorial spread-f. **Annales Geophysicae**, v. 22, n. 9, p. 3231–3239, 2004. ISSN 0992-7689. Disponível em: <http://www.ann-geophys.net/22/3231/2004/>. 19

BERKEY, F. T.; SIKDAR, P. Studies of the temperate e-layer using a windowed fuzzy clustering technique. In: IONOSPHERIC EFFECTS SYMPOSIUM, 11., 2005, Alexandria, VA. **Proceedings...** Alexandria, VA, 2005. 7, 35, 41, 43

BERTONI, F.; SAHAI, Y.; RAULIN, J.; FAGUNDES, P.; PILLAT, V.; CASTRO, C. Gimenez de; LIMA, W. Equatorial spread-f occurrence observed at two near equatorial stations in the brazilian sector and its occurrence modulated by planetary waves. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 73, n. 4, p. 457–463, 2011. 19

BERTONI, F. C. P. **Estudos de derivas ionosfericas por meio de ionosondas digitais**. 135 p. Mestrado em Geofísica Espacial — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998–09 1998. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/09.14.13.10>. Acesso em: 26 ago. 2009. 12, 13, 36, 38

BITTENCOURT, G. **Inteligência artificial ferramentas e teorias**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006. 3.ed. 35

BITTENCOURT, J. A. **The low latitude ionosphere**: a dynamic computer model. Sao Jose dos Campos, 1996. Acesso em: 26 ago. 2009. 1

BRASSEUR, G.; SOLOMON, S. **Aeronomy of the middle atmosphere**: chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere. Dordrecht: The Netherlands: Springer, 2005. 1

BULLETT, T.; MALAGNINI, A.; PEZZOPANE, M.; SCOTTO, C. Application of autoscala to ionograms recorded by the vipir ionosonde. **Advances in Space Research**, Elsevier, v. 45, n. 9, p. 1156–1172, 2010. 7, 16

BULLETT, T. W. **Mid-latitude ionospheric plasma drift**: a comparison of digital ionosonde and incoherent scatter radar measurements at millstone hill. Doutorado em Física — Universidade de Massachussetts, Lowell, 1994. 12

CANADIAN Advanced Digital Ionosonde (CADI): User's manual. Saskatoon: SIL, 1997. 4, 17

CANDER, L. R. **Artificial neural network applications in ionospheric studies**. 1998. 757-766 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2122/1491>. Acesso em: 11 mai. 2009. 35, 36, 37

CARDOSO, F.; SAHAI, Y.; GUARNIERI, F.; FAGUNDES, P.; PILLAT, V.; SILVA, J. da. Dependence of the f-region peak electron density (fof2) on solar activity observed in the equatorial ionospheric anomaly region in the brazilian sector. **Advances in Space Research**, Elsevier, 2011. 19

CHAPMAN, S.; COWLING, T. **The matematical theory of non-uniform gases**. UK: Cambridge University Press, 1939. 1

CHEN, L.; ADJEI, O. λ-connectedness and its applications. **Journal of Scientific and Practical Computing**, v. 3, n. 1, p. 19–52, 2009. 7

DRIANKOV, D.; HELLENDOORN, H.; REINFRANK, M. **An introduction to fuzzy control**. New York: Springer Verlag, 1996. 40

ENDER, L. **Redes neurais aplicadas em estrategias de controle não linear**. 226 p. Doutorado em Engenharia Química — UNICAMP, Campinas, 2002. 36

FAGUNDES, P. R.; KLAUSNER, V.; SAHAI, Y.; PILLAT, V. G.; BECKER-GUEDES, F.; BERTONI, F. C. P.; BOLZAN, M. J. A.; ABALDE, J. R. Observations of daytime f2-layer stratification under the southern crest of the equatorial ionization anomaly region. **J. Geophys. Res.**, v. 112, n. A04302, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2006JA011888>. 19

FAGUNDES, P. R.; MUELLA, M.; BITTENCOURT, J.; SAHAI, Y.; LIMA, W.; GUARNIERI, F.; BECKER-GUEDES, F.; PILLAT, V. G.; FERREIRA, A.; LIMA, N. Nighttime ionosphere thermosphere coupling observed during an intense geomagnetic storm. **Advances in Space Research**, v. 41, p. 539–547, 2008. 19

FAGUNDES, P. R.; PILLAT, V. G.; BOLZAN, M. J. A.; SAHAI, Y.; BECKER-GUEDES, F.; ABALDE, J. R.; ARANHA, S. L. Observations of f-layer electron density profiles modulated by planetary wave type oscillations in the equatorial ionospheric anomaly region. **J. Geophys. Res.**, v. 110, n. A12302, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2005JA011115>. 19

FAUSETT, L. **Fundamentals of neural networks**: architectures, algorithms and applications. Florida Institute of Technology: Prentice Hall, 1994. P. 436. ISBN: 0-13-334186-0. 35

FRÖHLICH, J. **Neural networks with java**. 1998. Disponível em: <http://fbim.fh-regensburg.de/~saj39122/jfroehl/diplom/e-index.html>. Acesso em: 11 mai. 2009. 40

GALKIN, I. A.; REINISCH, B. W. The new artist 5 for all digisondes. **INAG-69**, 2008. Disponível em: <http://www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/web-69/2008/artist5-inag.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2009. 35, 37

GALKIN, I. A.; REINISCH, B. W.; OSOSKOV, G. A.; ZAZNOBINA, E. G.; NESHYBA, S. P. Feedback neural networks for artist ionogram processing. **Radio Sci**, v. 31(5), p. 1119–1128, 1996. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/96RS01513>. 7, 35, 37

GOMES-RUGGIERO, M.; LOPES, V. **Calculo numérico**: aspectos teóricos e computacionais. Rio de Janeiro–RJ: Editora Makron Books, 2ª. Edição, 1996. 68, 69, 70

GURNEY, K. **An introduction to neural networks**. London: UCL Press, 1997. 35

HAGAN, M.; DEMUTH, H.; BEALE, M. et al. **Neural network design**. Boston, MA: PWS, 1996. 35

HAGENBUCHNER, M.; FULCHER, J. Noise removal in ionograms by neural network. **Neural Computing & Applications**, p. 165–172, 1997. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/tk01u65j252713lm>. Acesso em: 11 mai. 2009. 35, 38, 39

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial enviroment. An introduction to geospace - the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere**. New York: Cambridge, University Press, 1995. 11

HAYKIN, S. **Neural networks**: a comprehensive foundation. Prentice Hall, 2009. (Neural networks and learning machines). ISBN 9780131471399. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=K7P36lKzI_QC&hl=pt-BR&source=gbs_similarbooks>. 35, 37, 38, 40

HUAMANI, I. R. L. **Redes neurais fuzzy aplicadas em identificação e controle de sistemas**. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UNICAMP, Campinas, 2003. 35

HUANG, X.; REINISCH, B. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms 2. true height inversion of topside ionograms with the profile-fitting method. **Radio Science**, American Geophysical Union, v. 17, n. 2, p. 837–844, 1982. 6

JESUS, R. de; SAHAI, Y.; F.L., G.; P.R., F.; ABREU, A. J. de; PILLAT, V.; LIMA, W. F-region ionospheric parameters observed in the equatorial and low latitude regions during medium solar activity in the brazilian sector and comparison with the iri-2007 model results. **Advances in Space Research**, v. 47, p. 718–728, 2011. 19

KANDASAMY, W.; SMARANDACHE, F. **Fuzzy relational maps and neutrosophic relational maps**. Seattle, Washington State: American Research Press, 2004. 29

KAUFMANN, A.; SWANSON, D. **Introduction to the theory of fuzzy subsets**. New York: Academic Press, 1975. 30

LIMA, W. L. C.; BECKER-GUEDES, F.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; ABALDE, J. R.; CROWLEY, G.; BITTENCOURT, J. A. Response of the equatorial and low-latitude ionosphere during the space weather events of april 2002. **Annales Geophysicae**, v. 22, n. 9, p. 3211–3219, 2004. ISSN 0992-7689. Disponível em: <http://www.ann-geophys.net/22/3211/2004/>. 19

LIN, C.-T.; LEE, C. S. G. **Neural fuzzy systems**: a neuro-fuzzy synergism to intelligent systems. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1996. ISBN 0-13-235169-2. 35

MACDOUGALL, J.; GRANT, I.; SHEN, X. **The Canadian advanced digital ionosonde**: design and results. UAG, 1995. Disponível em: <http://www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/uag-104/text/macdoug.html>. Acesso em: 18 dez. 2012. 17

MUELLA, M.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A.; SAHAI, Y.; LIMA, W.; BECKER-GUEDES, F.; PILLAT, V. G. Nighttime thermospheric meridional neutral winds inferred from ionospheric h'f and hpf2 data. **Advances in Space Research**, v. 41, p. 599–610, 2008. 19

OLIVEIRA, V. K. D.; FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; WRASSE, C. M.; PILLAT, V. G.; BECKER-GUEDES, F. Observations of gw/tids oscillations in the f2-layer at low latitude during high and low solar activity, geomagnetic quiet and disturbed periods. **J. Geophys. Res.**, v. 1, p. 1–10, 2009. 19

PEZZOPANE, M.; SCOTTO, C. et al. Automatic scaling of critical frequency fof2 and muf (3000) f2: A comparison between autoscala and artist 4.5 on rome data. **Radio Science-Washington-**, AGU American Geophysical Union, v. 42, n. 4, 2007. 7, 16, 42, 44

PEZZOPANE, M.; ZUCCHERETTI, E.; BIANCHI, C.; SCOTTO, C.; ZOLESI, B.; CABRERA, M.; EZQUER, R. et al. The new ionospheric station of tucumán: first results. **Annals of Geophysics**, Editrice Compositori, v. 50, 2007. 15, 16, 42

PIGGOTT, W.; RAWER, K. **URSI Handbook of ionogram interpretation and reduction, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, Report UAG-23**. 1972. 46, 67, 70, 88

PILLAT, V.; FAGUNDES, P. Udida univap digital ionosonde data analysis. In: ENCONTRO AMERICANO DE PóS-GRADUAçãO (EPG), 5., 2004, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 2004. p. 1178–1184. 6

PILLAT, V.; GUIMARÃES, L. Definição de regiões ionosféricas utilizando lógica nebulosa. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA E COMPUTAÇÃO (CNMAC), 33. **Anais...** Águas de Lindóia, SP, 2010. v. 3, p. 290–296. xv, 58, 59

PILLAT, V.; GUIMARãES, L.; SILVA, J.; FAGUNDES, P. Filtragem de dados de radar visando a aplicação de lógica nebulosa. In: WORKSHOP EM COMPUTAçãO APLICADA (WORCAP), 8., 2008, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 2008. p. 1178–1184. 49, 52

PILLAT, V. G. **Estudo da ionosfera em baixas latitudes através do modelo computacional LION e comparação com parâmetros ionosféricos observados**. 160 p. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) — UNIVAP, São José dos Campos, 2006. 2, 6, 19

REINISCH, B.; HUANG, X. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms 1. automatic o and x trace identification for topside ionograms. **Radio Science**, American Geophysical Union, v. 17, n. 2, p. 421–434, 1982. 6

_____. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms 3. processing of bottomside ionograms. **Radio Science**, American Geophysical Union, v. 18, n. 3, p. 477–492, 1983. 6

REINISCH, B. W. **University of Mass Lowell, Center for Atmospheric Research**. 2009. Disponível em: <http://ulcar.uml.edu/>. Acesso em: 03 nov. 2009. 14

RUSPINI, E.; BONISSONE, P.; PEDRYCZ, W. **Handbook of fuzzy computation**. [S.l.]: IOP Publishing Ltd, 1998. 40

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.; BECKER-GUEDES, F.; ABALDE, J.; CROWLEY, G.; PI, X.; IGARASHI, K.; AMARANTE, G.; PIMENTA, A.; BITTENCOURT, J. Longitudinal differences observed in the ionospheric f-region during the major geomagnetic storm of march 31, 2001. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 3221–3229, abr. 2003. 19

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BECKER-GUEDES, F.; BOLZAN, M. J. A.; ABALDE, J. R.; PILLAT, V. G.; JESUS, R. D.; LIMA, W. L. C.; CROWLEY, G.; SHIOKAWA, K.; MACDOUGALL, J. W.; LAN, H. T.; IGARASHI, K.; BITTENCOURT, J. A. Effects of the major geomagnetic storms of october 2003 on the equatorial and low latitude f-region in two longitudinal sectors. **J. Geophys. Res.**, v. 110, n. A12S91, 2005. 19

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; JESUS, R. de; ABREU, A. J. de; CROWLEY, G.; KIKUCHI, T.; HUANG, C.-S.; PILLAT, V. G.; GUARNIERI, F. L.; ABALDE, J. R.; BITTENCOURT, J. A. Studies of ionospheric f-region response in the latin american sector during the geomagnetic storm of 21?22 january 2005. **Ann. Geophys**, v. 29, p. 919–929, 2011. 19

SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica nebulosa. **Escola de redes neurais: Conselho Nacional de Redes Neurais**, ITA São José dos Campos, v. 5, p. 73–90, 1999. 24

SCHUNK, R. W.; NAGY, A. **Ionospheres**: physics. plasmas physics, and chemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 2, 11, 41, 54

SCOTTO, C. A method for processing ionograms based on correlation technique. **Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science**, Elsevier, v. 26, n. 5, p. 367–371, 2001. 16, 42

SIMPSON, P. K. **Artificial neural systems**: foundations, paradigms, applications, and implementations. Blue Ridge Summit, PA, USA: Windcrest/McGraw-Hill, 1990. ISBN 0-07-105355-7. 35

SPERANDIO, D.; MENDES, J. T.; SILVA, L. H. Monken e. **Cálculo numérico**: características matemáticas e computacionais dos métodos numéricos. São Paulo: Prentice Hall, 2006. 8, 68

TANAKA, K.; NIIMURA, T. **An introduction to fuzzy logic for practical applications**. Ann Arbor: Springer Verlag, 1997. 40

TASCIONE, T. F. **Introduction to the space environment**. Florida: Malabar, 1988. 1, 41, 54

TSAI, L.-C.; BERKEY, F. Ionogram analysis using fuzzy segmentation and connectedness techniques. **Radio Sci.**, v. 35, p. 1173–1186, 2000. 7, 35, 40, 41, 42, 44

TSOUKALAS, L. H.; UHRIG, R. E. **Fuzzy and neural approaches in engineering**. Nova York: John Wiley & Sons, 1997. 7, 23, 24, 25, 26, 30, 40, 41, 58

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338–353, 1965. 23, 40

_____. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. **Fuzzy Sets and System 100 Supplement**, p. 9–34, 1999. 40

ZUCCHERETTI, E.; TUTONE, G.; SCIACCA, U.; BIANCHI, C.; BASKARADAS, J. et al. The new ais-ingv digital ionosonde. **Annals of Geophysics**, INGV, v. 46, 2003. 15, 16