



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.02.17.13-TDI

RELAÇÃO ENTRE A OCORRÊNCIA DO CONTRA ELETROJATO EQUATORIAL E O APARECIMENTO DE OSCILAÇÕES DE PEQUENA ESCALA NA REGIÃO E

Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica
Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos
De Nardin, e Paulo Prado Batista, aprovada em 02 de junho de 2011.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A7C7NH>

INPE
São José dos Campos
2011

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 INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

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

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

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

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

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

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)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.02.17.13-TDI

RELAÇÃO ENTRE A OCORRÊNCIA DO CONTRA ELETROJATO EQUATORIAL E O APARECIMENTO DE OSCILAÇÕES DE PEQUENA ESCALA NA REGIÃO E

Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica
Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos
De Nardin, e Paulo Prado Batista, aprovada em 02 de junho de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A7C7NH>>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Almeida, Pedro Daniel Santos Carvalho de.
Al64r Relação entre a ocorrência do contra eletrojato equatorial e o aparecimento de oscilações de pequena escala na região E / Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida. – São José dos Campos : INPE, 2011.

xvi+164 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.02.17.13-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Paulo Prado Batista.

1. Contra eletrojato. 2. Ionosfera. 3. Ondas de gravidade. I.Título.

CDU 550.388.2 (812.1)

Copyright © 2011 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 © 2011 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 Mestre em


Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente
Solar-Terrestre

Dr. Odim Mendes Júnior



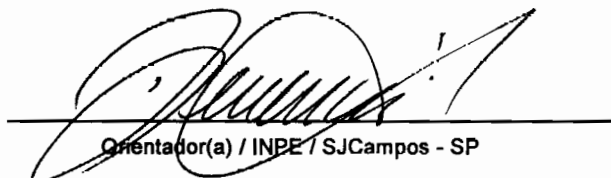
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Delano Gobbi




Vice-Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Clezlo Marcos De Nardin



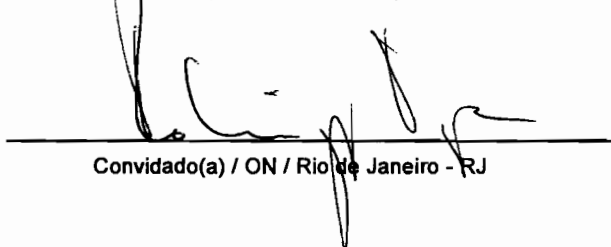
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Paulo Prado Batista



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Andrés Reinaldo Rodriguez Papa



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

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida

São José dos Campos, 02 de junho de 2011

AGRADECIMENTOS

Inicio estes agradecimentos com todo o amor e carinho à minha família. Principalmente ao meu irmão **Breno** e minha mãe **Doralice**. Agradeço de forma muito especial à **Leticia**, uma pessoa que admiro muito. Muito obrigado pelo amor, compreensão, incentivo, e por estarem sempre do meu lado.

Meu agradecimento especial aos **Drs. Clezio Marcos De Nardin e Paulo Prado Batista** pelas valiosas orientações, ensinamentos, discussões e apoio para a realização deste trabalho de Dissertação.

Aos membros que gentilmente fizeram parte das bancas examinadoras da Proposta e Dissertação meu agradecimento pela avaliação realizada e pelas sugestões.

De forma especial agradeço a todos os colegas da divisão e ao grupo de pesquisa o apoio, sugestões e participações diretas e indiretas. Cada um de uma forma contribuiu para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)** o suporte financeiro através do projeto número **132668/2008-4** e ao **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCT)** a oportunidade de estudo e a utilização de suas instalações.

RESUMO

A Dissertação de Mestrado apresenta evidências da correlação entre as oscilações de pequena escala, compatíveis com ondas de gravidade, e do aparecimento de contra eletrojato equatorial (CEJ). Para identificar as condições de CEJ foram utilizados os dados de velocidade das irregularidades do tipo 2 mostradas nos dados do radar RESCO, o qual está instalado em São Luís, no Maranhão (2,33° S; 44,27° O), próximo ao equador magnético. Baseado no sistema de detecção da velocidade Doppler do radar RESCO, observamos o comportamento das irregularidades de plasma com relação ao seu sentido de movimento, a fim de identificar o comportamento do Eletrojato Equatorial (EEJ) e das suas inversões (eventos de CEJ). Para isso, foram utilizados os espectrogramas gerados pelo radar. Em adição, utilizamos o mapa RTI (*Range Time Intensity*) para extrair parâmetros do EEJ, como por exemplo, a altura média do centro das irregularidades (EJC) e a variação da espessura do conjunto de irregularidades (EJT). Aplicando a análise de transformada de ondeleta à série temporal do EJC e EJT conseguimos ainda observar oscilações de pequena escala temporal na região da ionosfera equatorial sondadas pelo RESCO. Com esta técnica foi possível observar algumas periodicidades predominantes no momento em que houve o evento de CEJ e/ou nos momentos que antecedem este evento. Estendendo esta análise para todos os casos selecionados, conseguimos estabelecer um estudo estatístico relacionado à climatologia dos dias em que ocorre o evento de CEJ. Dos dias selecionados, três foram escolhidos e analisados criteriosamente. Nestes estudos de casos, claramente percebemos que o aparecimento de ondas de pequena escala e o evento de CEJ podem estar correlacionados. Como resultado, foi desenvolvida uma metodologia inédita de identificação de CEJ associada com oscilações na altura da região E, e a partir destes estudos e análises realizadas com base nesta metodologia, identificamos: (a) a condição magnética mais provável para se observar CEJ; (b) os horários e estação do ano mais prováveis; e (c) quais oscilações predominantes ocorrem simultaneamente com eventos de CEJ.

RELATION BETWEEN THE OCCURRENCE OF COUNTER EQUATORIAL ELECTROJET AND SMALL SCALE OSCILLATIONS IN THE E REGION

ABSTRACT

This Master Degree Dissertation presents an evidence of correlation between the small scale oscillations, like gravity waves, and the appearance of counter equatorial electrojet (CEJ). To identify CEJ conditions we have used speed data of type 2 irregularities observed by RESCO radar, which is installed at São Luís, Maranhão (2.33° S, 44.27° W), near the magnetic dip equator. Based on the Doppler speed detection system of the RESCO radar we could observe the plasma irregularities behavior regarding to their direction in order to identify the Equatorial Electrojet (EEJ) behavior and its inversions (CEJ events). This identification is made with the help of spectrograms generated by RESCO. Additionally, we used the RTI (Range Time Intensity) map in order to extract extra EEJ parameters like the center of the EEJ backscattering region (EJC) and the thickness of the EEJ backscattering region (EJT). Applying Wavelet transform analysis to the EJT and EJC parameters time series, we could also observe small-scale fluctuations in the equatorial ionospheric region sounded by the RESCO. Using this technique, we verified the presence of some predominant frequencies at the same time of the CEJ occurrence and/or just before the event. Extending this analysis to all selected cases, we established a statistical study related to the climatology whenever CEJ event occurs. Among the analyzed events, we selected three cases for a detailed analysis. In these case studies, we could clearly see that the appearance of small-scale waves and the CEJ event can be related. Finally, we have developed a new methodology for identifying CEJ associated with fluctuations in E region, and from the studies and analysis and based on the present methodology we could identify: (a) the more probable magnetic condition to observe CEJ; (b) the time of the day and season more probable to observe it; and (c) what the predominant oscillations that occur at the same time of CEJ events are.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Perfil de temperatura com indicação de divisão da atmosfera neutra.....	4
Fig. 2.2 – Ilustração dos três principais tipos de ondas que podem ocorrer na atmosfera terrestre.....	5
Fig. 2.3 - Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal σ_0 , Pedersen σ_1 e Hall σ_2 com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) = 1011 S/m (SI).	14
Fig. 2.4 - Formação do Sistema Sq de correntes, baseado na Teoria do Dínamo Atmosférico. No esquema são mostrados os ventos neutros \vec{U} no sentido dos pólos no lado iluminado pelo Sol, as correntes de altas latitudes $\vec{J} = \underline{\sigma} \cdot (\vec{U} \times \vec{B} - \nabla\Phi)$ que polarizam os terminadores e o eletrojato equatorial $\vec{J} = \underline{\sigma} \cdot \vec{E}$	16
Fig. 2.5 - Espectros de irregularidades tipo 1, à esquerda, e irregularidades tipo 2, à direita, dos dados do Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz, no dia 24 de janeiro de 2001, às 14 horas, para a altura de 105,2 km, medidas no Observatório Espacial de São Luís do Maranhão/INPE - MCT.	17
Fig. 2.6 - Representação simplificada do mecanismo de instabilidade de deriva de gradiente no eletrojato equatorial diurno.....	19
Fig 2.7 – Conjunto de gráficos mostrando a ocorrência do aparecimento do CEJ em relação ao número de manchas solares.....	24
Fig 2.8 – Perfil de altura da densidade de corrente em relação às latitudes magnéticas.....	25
Fig. 3.1 – Fotografia do Observatório Espacial de São Luís do Maranhão do INPE/MCT, onde pode ser visto o conjunto de antenas do Radar de Espalhamento Coerente - RESCO.....	30
Fig. 3.2 – Diagrama em blocos mostrando esquema de transmissão do radar usando 8 transmissores com divisores de potência e deslocadores de fase de baixa potência do Sistema Radar RESCO.	31
Fig.3.3 – Diagrama em blocos mostrando esquema de recepção para o radar ionosférico, utilizando o sistema de chaves T/R para comutação entre os sistemas de transmissão e recepção do Sistema Radar RESCO.....	32
Fig.3.4 – Diagrama temporal contendo os pulsos de sinais transmitidos e as janelas de amostragem do eco recebido pelo radar RESCO.	33
Fig.3.5 – Exemplo de variação das componentes em fase e em quadratura dos pulsos recebidos e do espectro de potência obtido através da análise espectral de Fourier.....	34
Fig.3.6 – Exemplo de espectrograma obtido pelo agrupamento de todos os espectros referentes à altura de 101,5 km (gate 10), obtidos pelo radar RESCO.	35
Fig.3.7 – Exemplo de Mapa RTI (Range Time Intensity) obtido pelo radar RESCO mostrando o aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia.	36
Fig.3.8 – Exemplo de variação das componentes em fase e em quadratura dos pulsos recebidos e do espectro de potência obtido através da análise espectral de Fourier.....	39
Fig. 3.9 - Estrutura funcional do magnetômetro tipo “Fluxgate”.....	38
Fig. 3.10 - Elementos do vetor magnético	39
Fig. 3.11 – Tabela de dados convertidos para ASCII das estações de São Luís e Eusébio.	40
Fig. 4.1 – Mapa RTI (Range Time Intensity) obtido pelo radar RESCO no dia 15 de fevereiro de 2006. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.	42

Fig. 4.2 – Espectrograma obtido pelo radar RESCO no dia 15 de fevereiro de 2006, representando o gate 10 – 101,25 km.	43
Fig. 4.3 – Espectrograma obtido pelo radar RESCO no dia 16 de maio de 2008, representando o gate 09 – 101,25 km.	44
Fig. 4.4 – Variação da perturbação magnética de acordo com o Índice Dst em função das horas do dia, medido a cada hora.	45
Fig. 4.5 – Mapa RTI (Range Time Intensity) obtido pelo radar RESCO no dia 19 de dezembro de 2007. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.	45
Fig. 4.6 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO no dia 19 de dezembro de 2007. Cada painel representa uma altura cobrindo um total de 88 até 111 km de altura.	47
Fig. 4.7 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJC, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da altura do centro médio das irregularidades retro-espalhadas.	49
Fig. 4.8 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJT, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da espessura das irregularidades retro-espalhadas.	50
Fig. 5.1 – Histograma que mostra a ocorrência de eventos de CEJ em função da faixa de intensidade de perturbação magnética.	57
Fig. 5.2 – Conjunto de Histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início de operação do radar RESCO; (b) estatística da hora de término de operação do radar RESCO; e (c) estatística do período de duração do funcionamento do radar RESCO.	58
Fig. 5.3 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do aparecimento das irregularidades no mapa RTI; (b) estatística da hora de término do aparecimento das irregularidades no mapa RTI; e (c) estatística da altura do centro da irregularidade no mapa RTI.	59
Fig. 5.4 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do aparecimento das irregularidades nos Espectrogramas; (b) estatística da hora de término do aparecimento das irregularidades nos Espectrogramas; e (c) estatística do tempo de duração das irregularidades nos Espectrogramas.	61
Fig. 5.5 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da altura inicial do aparecimento das irregularidades nos Espectrogramas; (b) estatística da altura final do aparecimento das irregularidades nos Espectrogramas; e (c) estatística da faixa vertical de duração das irregularidades nos Espectrogramas.	62
Fig. 5.6 – Histograma mostrando a estatística de aparecimento do CEJ em relação à distribuição anual (vermelho), em relação ao número de dias que o radar operou (cinza).	63
Fig. 5.7 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do CEJ; e (b) estatística da duração do CEJ (período final - inicial).	64
Fig. 5.8 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da faixa de altura em que CEJ aparece no espectrograma; e (b) estatística da variação vertical do CEJ mostrado no espectrograma.	65
Fig. 5.9 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do aparecimento das oscilações da ondeleta_EJC; (b) estatística da hora de término do aparecimento das oscilações da ondeleta_EJC; (c) estatística do tempo de duração das oscilações da ondeleta_EJC; e (d) estatística da periodicidade das oscilações da ondeleta_EJC.	67
Fig. 5.10 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do aparecimento das oscilações da ondeleta_EJT; (b) estatística da hora de término do aparecimento das oscilações da ondeleta_EJT; (c) estatística do tempo de duração das oscilações da ondeleta_EJT; e (d) estatística da periodicidade das oscilações da ondeleta_EJT.	68

Fig. 5.11 – Variação da perturbação magnética para o dia 16 de dezembro de 2008 de acordo com o Índice Dst em função das horas do dia, medido a cada 3 horas.....	71
Fig. 5.12 – Mapa RTI (Range Time Intensity) obtido pelo radar RESCO no dia 16 de dezembro de 2008. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.....	72
Fig. 5.13 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO no dia 16 de dezembro de 2008. Cada painel representa uma altura cobrindo um total de 90 até 111 km de altura.	73
Fig. 5.14 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJC, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da altura do centro médio das irregularidades retro-espalhadas.....	74
Fig. 5.15 –Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJT, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da espessura das irregularidades retro-espalhadas.....	75
Fig. 5.16 – Variação da perturbação magnética de acordo com o Índice Dst em função das horas do dia, para o dia 19 de dezembro de 2007.	77
Fig. 5.17 – Mapa RTI (Range Time Intensity) obtido pelo radar RESCO no dia 19 de dezembro de 2007. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.....	78
Fig. 5.18 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO no dia 19 de dezembro de 2007. Cada painel representa uma altura cobrindo um total de 88 até 111 km de altura.	79
Fig. 5.19 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJC, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da altura do centro médio das irregularidades retro-espalhadas.....	81
Fig. 5.20 –Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJT, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da espessura das irregularidades retro-espalhadas.....	82
Fig. 5.21 – Variação da perturbação magnética de acordo com o Índice Dst em função das horas do dia. 83	
Fig. 5.22 – Mapa RTI (Range Time Intensity) obtido pelo radar RESCO no dia 11 de outubro de 2008. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.....	84
Fig. 5.23 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO no dia 11 de outubro de 2008. Cada painel representa uma altura cobrindo um total de 96 até 111 km de altura.	85
Fig. 5.24 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJC, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da altura do centro médio das irregularidades retro-espalhadas.....	86
Fig. 5.25 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJT, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da espessura das irregularidades retro-espalhadas.....	87
Fig. 5.26 – Grupo de gráficos que apresentam características dos parâmetros retirados do mapa RTI, obtidos por radar RESCO, separados em período magneticamente calmo (a) e perturbado (b).	88
Fig. 5.27 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO do dia 21 de janeiro de 2002. Cada painel representa a variação da velocidade Doppler das irregularidades retro-espalhadas para determinadas alturas.	90

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
CAPÍTULO 2 - DÍNAMO IONOSFÉRICO, ELETROJATO EQUATORIAL, SUAS IRREGULARIDADES DE PLASMA E CONTRA ELETROJATO EQUATORIAL.....	3
2.1. Atmosfera Neutra _____	3
2.1.1. Onda de Gravidade	6
2.1.2. As Equações das Ondas de Gravidade.....	7
2.2. A Região E Ionosférica _____	12
2.3. Condutividade Ionosférica _____	13
2.3.1. Dínamo Ionosférico e Eletrojato Equatorial	15
2.4. Características das Irregularidades do Eletrojato Equatorial _____	16
2.4.1. Instabilidade de Dois-Feixes Modificada e Ecos do Tipo 1	17
2.4.2. Instabilidade de Deriva de Gradiente e Ecos do Tipo 2	18
2.4.3. Ventos Neutros e Velocidades de Fase das Instabilidades no EEJ	20
2.4.4. Revisão Teórica sobre Contra Eletrojato Equatorial (CEJ).....	22
CAPÍTULO 3 - INSTRUMENTAÇÃO.....	27
3.1. Radar de ESpalhamento COerente (RESCO) _____	27
3.1.1. Freqüência de Operação	27
3.1.2. Sistema Pulsado	28
3.1.3. Largura do Pulso	28
3.1.4. Freqüência de Repetição de Pulso	29
3.1.5. Potência do Transmissor	29
3.1.6. Descrição do Sistema (RESCO)	29
3.1.6.1. Sistema de Antenas	30
3.1.6.2. Sistema Transmissor	30
3.1.6.3. Sistema Receptor	31
3.1.6.4. Sistema de Controle e Armazenamento dos Dados.....	32
3.1.6.5. Análise Espectral, Espectrograma e Mapa RTI.....	34
3.2. Sistemas de Magnetômetros _____	37
3.2.1. Magnetômetro tipo “Fluxgate”	37
3.2.2. Pré-Processamento Básico dos dados de Magnetômetro.....	39
CAPÍTULO 4 – PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	41

4.1. Identificação e Utilização dos parâmetros do EEJ	41
4.1.2. Análise dos Parâmetros do CEJ nos dados do radar RESCO	44
4.2. Análise Espectral	48
4.4. Sumário do Processamento de cada evento de CEJ	52
CAPÍTULO 5 – ESTUDO ESTATÍSTICO E ANÁLISE DE CASOS SELECIONADOS	55
5.1. Estudos Estatísticos	55
5.2. Estudo de Casos	71
5.2.1. Dia 16 de dezembro de 2008	71
5.2.2. Dia 19 de dezembro de 2007	77
5.2.3. Dia 11 de outubro de 2008	83
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A	101
Resumo das Características do dia 13/12/2007	102
Resumo das Características do dia 19/12/2007	106
Resumo das Características do dia 16/05/2008	110
Resumo das Características do dia 21/05/2008	114
Resumo das Características do dia 09/06/2008	118
Resumo das Características do dia 18/06/2008	122
Resumo das Características do dia 18/08/2008	126
Resumo das Características do dia 30/09/2008	130
Resumo das Características do dia 11/10/2008	134
Resumo das Características do dia 16/12/2008	138
Resumo das Características do dia 26/12/2008	142
Resumo das Características do dia 21/01/2009	146
Resumo das Características do dia 10/02/2009	150
Resumo das Características do dia 20/08/2009	154
Resumo das Características do dia 21/08/2009	158
APÊNDICE B	163

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é estudar as características da interação de ondas atmosféricas com a ionosfera equatorial e estudar a relação causa-efeito da existência do contra eletrojato equatorial (CEJ) com o aparecimento de oscilações de pequena escala, com período compatível a onda de gravidade (GW). Apresentamos então, no Capítulo 2, uma descrição das teorias necessárias para a compreensão das perturbações da atmosfera neutra como ondas de gravidade, para a compreensão da baixa ionosfera, do eletrojato equatorial, suas instabilidades de plasma, além de uma descrição de eventos de contra eletrojato. Para o presente estudo, utilizamos os dados de velocidade das irregularidades do tipo 2 mostradas nos dados do radar RESCO a fim de identificar o comportamento do EEJ, e das suas inversões (eventos de CEJ). Na seção do capítulo 3, temos a descrição do instrumento utilizado neste trabalho: o radar RESCO. O Capítulo 4 descreve o pré-processamento dos dados utilizados nesta dissertação e a metodologia de análise destes dados. Nesta seção discutimos identificação dos eventos de eletrojato equatorial vistos por radar coerente e descrevemos todos os parâmetros escolhidos para a análise. A partir da identificação destes parâmetros, analisamos todos os dias de dados e selecionamos os dias em que ocorrem eventos de contra eletrojato equatorial. Para os dias identificados com esses eventos, observamos o comportamento das irregularidades de plasma com relação ao seu sentido de movimento, baseado no sistema de detecção da velocidade Doppler do radar RESCO. Para isso, usamos os espectrogramas gerados pelo radar. A partir da análise do conjunto de eventos elaboramos um estudo climatológico para este tipo de evento. A análise de transformada de Ondeleta foi aplicada a série temporal dos espectrogramas obtida dos parâmetros relacionados com os espectros de potência obtidos pelo RESCO e é utilizada para determinar oscilações de pequena escala temporal compatíveis com períodos similares às ondas de gravidade na região da ionosfera equatorial. Além disso, esta técnica é utilizada para inferir quais periodicidades são predominantes. No Capítulo 5, apresentamos as análises de maneira estatística dos parâmetros observados nos resultados do processamento dos dados do RESCO e das características vistas nas análises de transformadas de ondeletas. Desta maneira conseguimos especular uma climatologia dos aparecimentos do contra eletrojato

equatorial e as periodicidades dominantes nos horários de interesse. Neste capítulo de resultados também apresentamos uma análise detalhada de três casos específicos. Destes casos, temos um deles apresentando uma condição geomagneticamente calma (com Dst positivo), um caso com condições geomagnéticas perturbadas (perturbação fraca) e o último caso apresentando um evento de contra eletrojato em uma condição de alta perturbação magnética. Por fim, no capítulo 6 apresentamos as conclusões do trabalho, contendo as nossas contribuições e os principais fatos que emergiram dos estudos estatísticos e dos estudos de casos específicos. Em seguida temos a seção de referências bibliográficas e os apêndices da dissertação de mestrado.

CAPÍTULO 2

DÍNAMO IONOSFÉRICO, ELETROJATO EQUATORIAL, SUAS IRREGULARIDADES DE PLASMA E CONTRA ELETROJATO EQUATORIAL

Este capítulo introduz de forma resumida os conceitos da formação do eletrojato equatorial, principal objetivo de estudo neste trabalho. Para tanto, apresentamos o conhecimento corrente sobre o efeito de ondas atmosféricas na variabilidade do eletrojato equatorial (EEJ), a fim de identificarmos possíveis evidências de influência na dinâmica do contra eletrojato equatorial (CEJ). Além disso, os conceitos básicos relacionados com o assunto são comentados. Entre eles, atmosfera neutra, ionosfera, região E e teoria do Dínamo.

2.1. Atmosfera Neutra

A atmosfera terrestre pode ser classificada por diversos fatores, entre eles, composição, temperatura e taxa de ionização. Na figura 2.1 temos a divisão da atmosfera neutra de forma estratificada, levando em consideração o perfil de temperatura. Ela fornece uma descrição das camadas da atmosfera terrestre: a troposfera, onde ocorrem os principais fenômenos meteorológicos, tais como as fortes convecções; a estratosfera, na qual se observam ondas de gravidade que se propagam verticalmente; a mesosfera, região onde se encontram algumas das camadas de aeroluminescência e onde se acredita que ocorra o regime de quebra de onda; e a região da termosfera, região na qual se localiza grande porção da ionosfera.

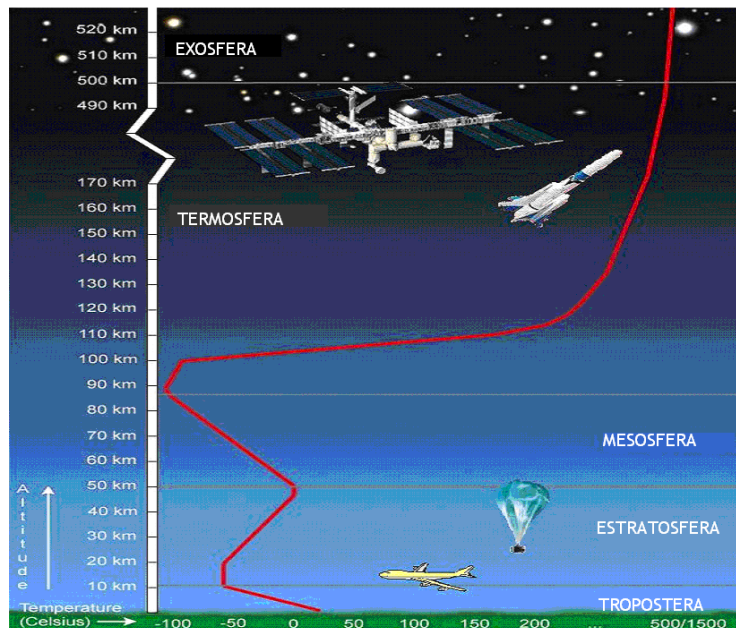


Fig. 2.1 – Perfil de temperatura com indicação de divisão da atmosfera neutra

FONTE: Cortesia de Clezio M. De Nardin (2009).

Uma das propriedades dinâmicas mais importantes da atmosfera é sua capacidade em suportar movimentos de ondas (ANDREWS et al., 1987). Em geral, para o estudo das ondas assume-se um tratamento linear. Para este tipo de tratamento devem-se assumir amplitudes suficientemente pequenas para que as equações primitivas da dinâmica possam ser aplicadas. Mesmo neste caso, é difícil formular uma definição precisa de “onda”. Em geral, associa-se a esse termo alguma característica de quase-periodicidade e a capacidade de transferir “informação” por longas distâncias, sem o correspondente transporte de matéria ou fluido.

De acordo com a característica da perturbação no meio em relação à direção de propagação das ondas na atmosfera, essas podem ser divididas em três classes básicas: a primeira e mais simples, são as ondas cujos deslocamentos (perturbação) são na mesma direção de propagação da onda, essas são as ondas longitudinais (ondas acústicas); a segunda, as ondas que se propagam horizontalmente e são compostas de deslocamentos verticais chamam-se ondas verticalmente transversas (ondas de gravidade); e a última classe são as ondas que se propagam horizontalmente com deslocamentos horizontais perpendiculares à direção de propagação, as quais são chamadas de ondas horizontalmente transversas ou ondas de Rossby (BEER, 1974). Uma representação esquemática para esses três tipos de ondas é mostrada na figura 2.2.

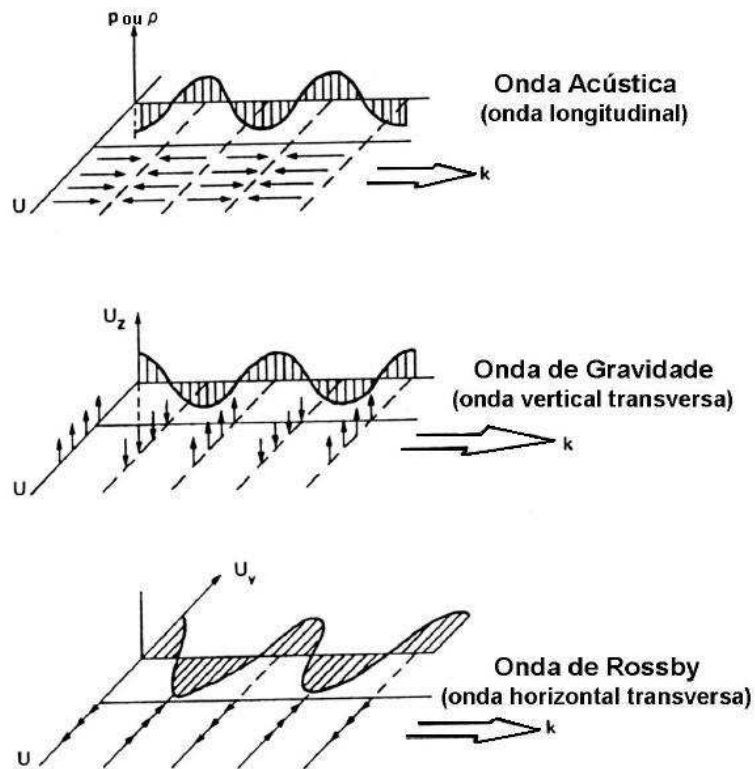


Fig. 2.2 – Ilustração dos três principais tipos de ondas que podem ocorrer na atmosfera terrestre.

FONTE: Adaptada de Beer (1974, p.02).

As ondas na atmosfera podem ser classificadas de acordo com suas propriedades físicas ou geométricas (ANDREWS et al., 1987). Assim, a primeira caracterização é de acordo com seus mecanismos de restauração. As chamadas *buoyancy waves*, ou ondas de gravidade interna (simplicadamente chamadas de “ondas de gravidade”), devem sua existência à estratificação e à ação da gravidade e do empuxo, enquanto as ondas de gravidade inerciais resultam de uma combinação entre o efeito de Coriolis e o gradiente de pressão. As ondas planetárias, ou de Rossby, resultam da conservação da vorticidade absoluta, decorrente da variação do parâmetro de Coriolis com a latitude.

Outro tipo de classificação diferencia ondas forçadas de ondas livres. As ondas forçadas são aquelas que são mantidas continuamente por um dado mecanismo de excitação, como por exemplo, as marés atmosféricas que são induzidas pelas flutuações no aquecimento da atmosfera. Já as ondas livres não necessitam ser mantidas por um mecanismo externo, como os modos normais globais das ondas planetárias (WRASSE, 2004).

2.1.1. Onda de Gravidade

Ondas de gravidade são oscilações com comprimentos de onda horizontais relativamente pequenos (tipicamente 10 - 1000 km) que se desenvolvem em fluídos estavelmente estratificados quando parcelas deste estão sendo deslocadas verticalmente. Na atmosfera, este tipo de ondas tem período característico entre minutos e horas, onde o limite inferior dessas ondas é o período de Brünt Väisälä (inverso da frequência angular característica, i. e., $1/\omega_g$), que na maior parte da alta atmosfera é da ordem de 5 minutos. Estas ondas são produzidas pelo fluxo de ar sobre montanhas (ondas orográficas) ou por outras fontes não orográficas, tais como, tempestades, sistemas frontais ou instabilidades atmosféricas.

As ondas de gravidade começaram a ser estudadas após a utilização de técnicas que permitiam medidas de vento na alta atmosfera. Estes ventos apresentam características bastante diferentes em relação aos ventos observados na baixa atmosfera. Na alta atmosfera os ventos apresentam valores altos e uma variação de intensidade com a altura. Por esse fato foram denominados de “ventos irregulares”. Posteriormente, foram publicados diversos artigos para a explicação desse comportamento. Alguns autores, como Hines (1960), afirmam que esse comportamento se deve à soma de modos de propagação de ondas internas.

O mecanismo físico que se acredita ser capaz de originar as ondas de gravidade é o desbalanço entre a força de gravidade e o gradiente de pressão (ou empuxo). A partir dessa geração, estas ondas propagam-se de forma ascendente na atmosfera e, considerando a conservação da energia, crescem em amplitude de forma exponencial devido ao decréscimo exponencial da densidade da atmosfera neutra com a altura. A propagação de ondas de gravidade através da atmosfera depende da distribuição de ventos e da estrutura térmica, as quais variam com diversos fatores como, por exemplo, a estação do ano. Especificamente, pode ser mostrado que a onda é absorvida quando a velocidade de fase desta se iguala à velocidade do vento na direção da onda. O ponto onde a absorção ocorre é denominado de nível crítico para uma onda particular (BRASSEUR e SOLOMON, 2005). A propagação vertical das ondas de gravidade é um assunto de particular interesse, uma vez que elas transportam energia e momentum para a região da mesosfera e baixa termosfera (MCLANDRESS, 1998).

2.1.2. As Equações das Ondas de Gravidade

A descrição matemática usada nos estudos das ondas de gravidade pode ser obtida como soluções idealizadas de modelos simplificados onde a atmosfera é considerada estacionária e sua temperatura e composição constantes. Sobre esta atmosfera básica as ondas são consideradas perturbações lineares que ocorrem adiabaticamente, sem fricção, e que se considera a aceleração da gravidade é constante com a altura. A força de Coriolis é desprezada em vista do gradiente de pressão, inércia e gravidade (WRASSE, 2004).

Como já mencionado, devido ao decréscimo exponencial da densidade atmosférica em função da altura, as ondas de gravidade crescem em amplitude à medida que se propagam verticalmente. Isto ocorre até que a onda atinja uma camada limite a qual não suporta oscilações desta escala devido às instabilidades, como por exemplo, a instabilidade Rayleigh-Taylor na região F. Neste regime, a teoria linear das ondas deixa de ser válida e termos não lineares devem ser considerados no conjunto de equações para que se possa ter uma descrição completa deste movimento (BEER, 1974).

As equações básicas que descrevem o movimento atmosférico, no sistema de coordenadas Cartesiano, onde \hat{x} , \hat{y} e \hat{z} representam as coordenadas norte, leste e vertical (para cima), respectivamente, são dadas por:

$$p = \rho RT \quad (2.1)$$

$$C_v \frac{dT}{dt} + p \frac{D(1/\rho)}{Dt} = Q \quad (2.2)$$

$$\frac{dp}{dt} + \rho \nabla v = 0 \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{d\vec{v}}{dt} \right) + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} = \frac{1}{\rho} \vec{F} \quad (2.4)$$

A Equação (2.1) é a equação dos gases perfeitos que pode ser aplicada para a condição de ar seco, onde R é a constante dos gases ideais e T a temperatura. A Equação (2.2) representa a conservação da energia, onde o termo $D/Dt = \partial/\partial t + \vec{v} \cdot \nabla$ é conhecido como o operador de Stokes, que representa a derivada total no sistema Euleriano. O parâmetro C_v é o calor específico a volume constante e Q é a quantidade de calor recebida

por uma massa de ar por unidade de massa e por unidade de tempo. O termo $\rho.D(1/\rho)/Dt$ é o trabalho realizado pela massa de ar quando esta sofre expansão ou contração.

A Equação (2.3) é a equação da continuidade que representa a conservação de massa dentro de um dado volume. A Equação (2.4) descreve a conservação do momentum, representada pelo campo de velocidade $\vec{v} = (u\hat{x}, v\hat{y}, w\hat{z})$; o termo $\vec{\Omega} \times \vec{v}$ é a força de Coriolis, onde $\vec{\Omega} = (0, \Omega_y, \Omega_z)$ representa a velocidade angular da Terra; \vec{g} é a aceleração da gravidade. As variáveis atmosféricas ρ e p presentes neste conjunto de equações são, respectivamente, a densidade da atmosfera neutra e a pressão atmosférica. \vec{F} caracteriza uma força externa qualquer.

A solução das equações acima em termos não lineares não é trivial, por isso será aplicada a teoria linear ou perturbação de primeira ordem. Assim, tem-se:

$$(u, v, w, p, \rho) = (u_0, v_0, w_0, p_0, \rho_0) + \varepsilon(u_1, v_1, w_1, p_1, \rho_1), \quad (2.5)$$

na qual os parâmetros representados pelo subscrito zero indicam o estado básico; os parâmetros representados pelo subscrito 1 indicam o estado perturbado e ε é um parâmetro proporcional ao desvio do estado médio. Ao substituímos as perturbações acima nas Equações de (2.2) à (2.4) e equacionar os termos de primeira ordem, obtém-se outra forma do conjunto das equações básicas para a atmosfera que podem ser expressas pelas equações abaixo, já escritas em termos de suas componentes \hat{x} , \hat{y} e \hat{z} :

$$\rho_o \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v_o \cdot \vec{\nabla} u \right) + \frac{\partial p}{\partial x} - 2\rho_o \Omega_z v = 0 \quad (2.6)$$

$$\rho_o \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v_o \cdot \vec{\nabla} v \right) + \frac{\partial p}{\partial y} - 2\rho_o \Omega_z u = 0 \quad (2.7)$$

$$\rho_o \left(\frac{\partial w}{\partial t} + v_o \cdot \vec{\nabla} w \right) + \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_o g = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_o \cdot \nabla \rho + w \frac{\partial \rho_o}{\partial z} + \rho_o \nabla \cdot v = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + v_o \cdot \nabla P + w \frac{\partial P_o}{\partial z} = c_s^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_o \cdot \nabla \rho + w \frac{\partial \rho_o}{\partial z} \right), \quad (2.10)$$

onde c_s^2 representa a velocidade do som e os parâmetros u, v, w, P e ρ sem subscrito representam agora termos perturbados de primeira ordem. Os demais termos já foram definidos anteriormente.

Admitindo-se que as soluções para as equações básicas da atmosfera sejam do tipo onda plana, ou seja:

$$(U, V, W, P, \rho) = (u_o, v_o, w_o, p_o, \rho_o) e^{i(\omega t - kx - ly - mz)} \quad (2.11)$$

na qual U, V, W, P, ρ são as quantidades perturbadas. k, l e m são as componentes do vetor nas direções \hat{x}, \hat{y} e \hat{z} , respectivamente. Considerando-se um modelo de atmosfera básica não ionizada, sem viscosidade, compressível, sem rotação da Terra ($\Omega_z = 0$) e sem difusividade, mas com cisalhamento vertical, as Equações de 2.7 a 2.10 podem ser reescritas como:

$$\frac{DU}{Dt} + W u_o' \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad u_o' = \frac{\partial u_o}{\partial z} \quad (2.12)$$

$$\frac{DV}{Dt} + W v_o' \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P}{\partial y} = 0, \quad v_o' = \frac{\partial v_o}{\partial z} \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{\rho_s c_s^2} \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial U}{\partial x} + \left(\frac{\partial}{\partial z} - \Gamma \right) W = 0 \quad (2.14)$$

$$\left(\frac{D^2}{Dt^2} + N^2 \right) W + \frac{1}{\rho_s} \frac{D}{Dt} \left(\frac{\partial}{\partial z} + \Gamma \right) P = 0. \quad (2.15)$$

onde ρ_o e ρ_s são a densidade média do gás majoritário no estado básico e a densidade em uma altura de referência, respectivamente. O parâmetro Γ representa a influência do

gradiente de densidade nos termos inerciais, sendo conhecido como coeficiente de Eckart, dado pela seguinte expressão:

$$\Gamma = \frac{1}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \frac{g}{c_s^2}. \quad (2.16)$$

O parâmetro N^2 é a frequência de Brünt Väisälä (em radianos/segundo), a qual é definida matematicamente como:

$$N^2 = -g \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \frac{g}{c_s^2} \right). \quad (2.17)$$

Utilizando a aproximação hidrostática, $\rho \approx p \approx \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right)$ pode-se obter uma expressão mais simples para a frequência de Brünt Väisälä:

$$N^2 = -\frac{g^2}{RT} \left(1 - \frac{RT}{c_s^2} \right) = \frac{g^2}{RT} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right), \quad (2.18)$$

onde γ é uma constante adimensional, dada pela razão c_p/c_v , sendo que estas variáveis de estado da termodinâmica, calor específico a pressão constante (c_p) e calor específico a volume constante (c_v) estão relacionadas entre si através da constante R dos gases:

$$c_p - c_v = R, \text{ sendo } c_v = 3/2 \cdot R \text{ e } c_p = 5/2 \cdot R.$$

O operador de Stokes, $D/Dt = \partial/\partial t + \vec{v} \cdot \nabla$, pode ser redefinido de forma mais conveniente:

$$\frac{D}{Dt} = ik[u(z) - c] = i\omega, \quad (2.19)$$

onde $c = \omega/k$ é a velocidade de fase da onda, k é o módulo do vetor de onda e ω é definida como uma frequência angular aparente, dada por:

$$\omega = \vec{k}[c - \vec{u}(z)]. \quad (2.20)$$

A frequência angular intrínseca ω_i da onda, determinada por um observador que se desloca com o vento médio de fundo, está associada com a frequência angular aparente ω pela seguinte relação:

$$\omega_i = \omega - \vec{k} \cdot \vec{u} \quad (2.21)$$

Quando as ondas se movem mais rápido que o vento, ω_i é positivo; caso contrário, é negativo, para soluções proporcionais a $\exp[i(kx - \omega t)]$. Usando a Equação 2.19 nas Equações 2.14 e 2.15, para eliminar P e U , chega-se na seguinte relação:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \left[\frac{N^2}{(u_0 - c)^2} - \frac{u_0''}{u_0 - c} - \frac{2\mathcal{M}'_0}{u_0 - c} - k^2 - \gamma^2 \right] W = 0, \quad (2.22)$$

na qual $u'_0 = \frac{\partial u_0}{\partial z}$ e $u''_0 = \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2}$.

Desprezando-se os efeitos de compressibilidade (ondas acústicas), $\gamma = 0$, a Equação 2.22 é conhecida como equação de Taylor-Goldstein, sendo esta o ponto de partida para a análise dos efeitos do cisalhamento e gradientes térmicos sobre o regime de propagação das ondas de gravidade. Assim, pode-se reescrever a equação de Taylor-Goldstein da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \left[\frac{N^2}{(u_0 - c)^2} - \frac{u_0''}{u_0 - c} - k_h^2 \right] W = 0. \quad (2.23)$$

Desde que N^2 e u_0 são funções da altura e variam lentamente, pode-se usar a conhecida aproximação WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin). Com esta aproximação, resolve-se a equação diferencial definida na Equação 2.23 e a relação de dispersão, que relaciona a frequência com o número de onda, para as ondas de gravidade fica dada por:

$$m^2 = \left[\frac{N^2}{(u_0 - c)^2} - \frac{u_0''}{u_0 - c} - k_h^2 \right] \quad (2.24)$$

onde $m = 2\pi/\lambda_z$ é o número de onda vertical, e $k_h = 2\pi/\lambda_h$ é o número de onda horizontal.

2.2. A Região E Ionosférica

A região E da ionosfera inicia por volta dos 90 km e se estende por aproximadamente 50 km. Durante a noite sua densidade eletrônica diminui significativamente, pois sua principal fonte produtora, o Sol, está ionizando o hemisfério diurno. Nesse horário sua densidade eletrônica é da ordem de 5×10^9 elétrons/m³, enquanto que durante o dia ela pode ser da ordem de 10^{11} elétrons/m³. Em relação aos processos de produção, perda e distribuição vertical da densidade, o comportamento da região E é próxima a de uma camada α -Chapman (HARGREAVES, 1992). Além disso, a frequência crítica f_oE , varia com o ângulo zenital, χ , na forma $(\cos \chi)^{1/4}$, o que significa dizer que o pico de densidade eletrônica, N_mE , varia na forma $(\cos \chi)^{1/2}$.

A produção da camada E é realizada em pequena escala por colisões e por ablação meteórica, e em sua maioria absoluta pelas radiações que possuem seção transversal de absorção inferior a 5×10^{-18} cm². A radiação solar na faixa de 31 a 100 Å e $\lambda > 800$ Å é a mais importante. A linha solar Lyman- β ($\lambda = 1025$ Å) e a linha C(III) ($\lambda = 977$ Å) possuem importância especial para ionização do oxigênio molecular (O₂). O Lyman-contínuo ($\lambda < 910$ Å) também contribui através da ionização do oxigênio atômico (O) (BANKS e KOCKARTS, 1973). No que tange a ablação meteórica, a região E é ainda caracterizada pela presença de íons metálicos como magnésio (Mg⁺), ferro (Fe⁺), cálcio (Ca⁺) e Silício (Si⁺). Os íons primários principais são nitrogênio molecular (N₂⁺), oxigênio molecular (O₂⁺) e oxigênio atômico (O⁺), mas reações subsequentes levam o óxido nítrico (NO⁺) e o oxigênio molecular (O₂⁺) a serem os íons mais abundantes.

É também na região E equatorial que temos a formação do eletrojato equatorial, o foco de estudo deste trabalho, o qual será descrito com maior detalhamento nas seções que se seguem. Por ora, mencionamos que este é uma corrente elétrica restrita à região ao longo do equador magnético nas alturas da região E ionosférica.

2.3. Condutividade Ionosférica

A ionosfera terrestre é permeada pelo campo magnético terrestre. Este campo confere características anisotrópicas às propriedades do seu plasma quando este está sujeito a forçantes como campos elétricos ou ventos neutros. Portanto, é conveniente apresentar a condutividade ionosférica como uma quantidade tensorial em termos das suas três componentes da seguinte forma: ao longo do vetor campo magnético; ao longo da componente de um vetor campo elétrico perpendicular ao campo magnético; e ao longo da componente perpendicular a ambos.

A componente da condutividade paralela ao campo magnético, também conhecida como condutividade direta ou longitudinal (σ_0) é dada por:

$$\sigma_0 = n \cdot e^2 \cdot \left(\frac{1}{m_e \nu_e} + \frac{1}{m_i \nu_i} \right) \quad (2.25)$$

A condutividade Pedersen ou transversal (σ_1) refere-se à condutividade na direção da componente do campo elétrico \vec{E} perpendicular a direção de \vec{B} , dada por:

$$\sigma_1 = n \cdot e^2 \cdot \left(\frac{\nu_e}{m_e (\nu_e^2 + \Omega_e^2)} + \frac{\nu_i}{m_i (\nu_i^2 + \Omega_i^2)} \right) \quad (2.26)$$

A condutividade Hall (σ_2) refere-se à condutividade na direção $\vec{E} \times \vec{B}$, dada por:

$$\sigma_2 = n \cdot e^2 \cdot \left(\frac{\Omega_e}{m_e (\nu_e^2 + \Omega_e^2)} - \frac{\Omega_i}{m_i (\nu_i^2 + \Omega_i^2)} \right) \quad (2.27)$$

Nas equações 2.25, 2.26 e 2.27 acima Ω_e e Ω_i são as frequências ciclotrônicas, ν_e e ν_i são as frequências de colisão, m_e e m_i são as massas dos elétrons e íons respectivamente, e é a carga dos elétrons e n é a densidade de plasma.

Uma distribuição em altura calculada da condutividade na ionosfera de médias latitudes ao meio-dia é mostrada na figura 2.3, na qual nota-se que os picos das condutividades Pedersen e Hall ocorrem na região E, decaindo acentuadamente acima e abaixo deste máximo. No equador magnético esse pico fica em torno de 150 km para a condutividade Pedersen e 130 km para a Hall (DENARDINI, 1999).

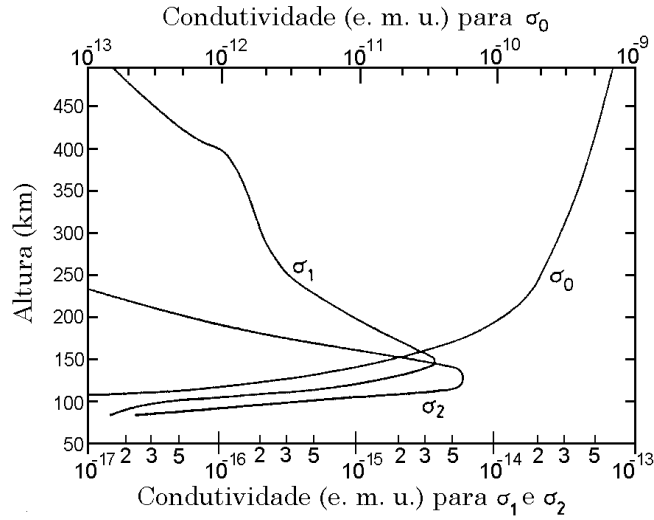


Fig. 2.3 - Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal σ_0 , Pedersen σ_1 e Hall σ_2 com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) = 1011 S/m (SI).

FONTE: Akasofu e Chapman (1972)

Unindo as três condutividades na forma tensorial, a condutividade elétrica σ fica na forma (MAEDA, 1977):

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \cdot \cos^2(I) + \sigma_1 \cdot \text{sen}^2(I) & \sigma_2 \cdot \text{sen}(I) & -(\sigma_0 - \sigma_1) \cdot \text{sen}(I) \cdot \cos(I) \\ -\sigma_2 \cdot \text{sen}(I) & \sigma_1 & -\sigma_2 \cdot \cos(I) \\ -(\sigma_0 - \sigma_1) \cdot \text{sen}(I) \cdot \cos(I) & \sigma_2 \cdot \cos(I) & \sigma_1 \cdot \cos^2(I) + \sigma_0 \cdot \text{sen}^2(I) \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

sendo I o ângulo da inclinação de \vec{B} em relação à superfície terrestre. Na região do equador magnético a inclinação do campo magnético é nula, logo, nesta região, o tensor condutividade $\underline{\sigma}$ resume-se a:

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_1 & -\sigma_2 \\ 0 & \sigma_2 & \sigma_1 \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Considerando somente o plano perpendicular ao campo magnético na região equatorial, através da relação $\vec{J} = \underline{\sigma} \cdot \vec{E}$, obtemos as seguintes equações:

$$\begin{cases} J_x = \sigma_1 \cdot E_x + \sigma_2 \cdot E_y, \\ J_y = -\sigma_2 \cdot E_x + \sigma_1 \cdot E_y. \end{cases} \quad (2.30)$$

Considere que o eixo \hat{y} está na direção vertical enquanto o eixo \hat{x} está na direção leste.

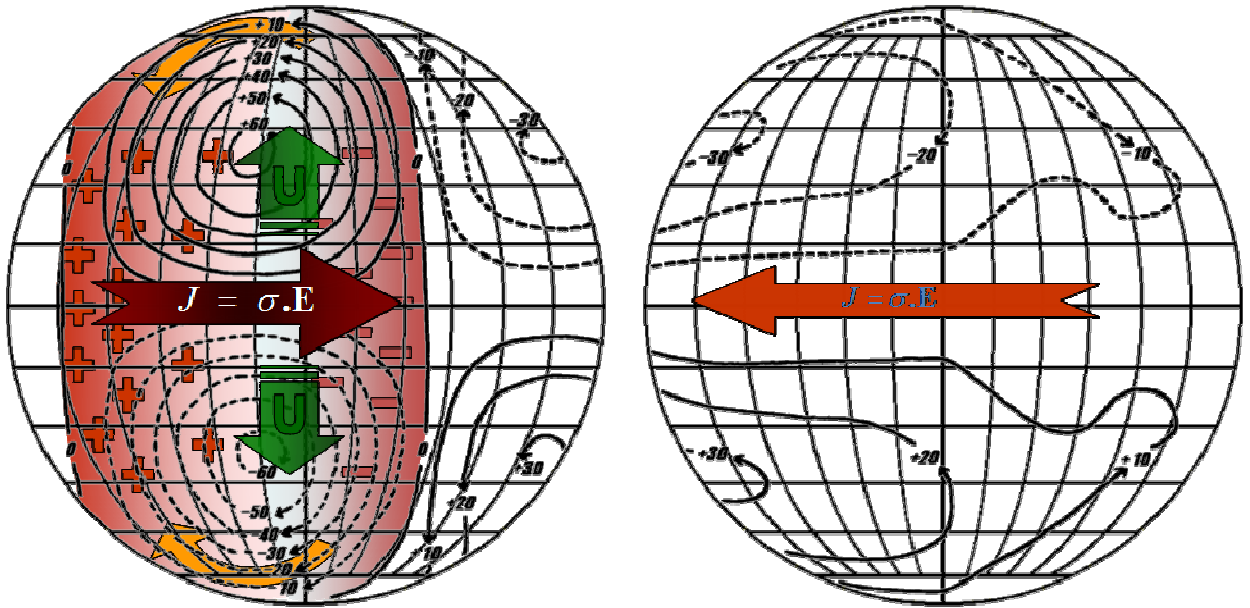
Neste caso, devido à queda acentuada da condutividade mostrada na figura 2.3, há uma inibição da corrente vertical que pode ser representada por $J_y = 0$ na Equação 2.30. Assim, resolvendo o sistema anterior temos:

$$J_x = \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1} \right) E_x \Rightarrow J_x = \sigma_3 \cdot E_x, \quad (2.31)$$

onde σ_3 é a condutividade Cowling, a condutividade na direção longitudinal do eletrojato equatorial.

2.3.1. Dínamo Ionosférico e Eletrojato Equatorial

Com a incidência da radiação solar na Terra, há o aquecimento da atmosfera neutra. O aquecimento leva à expansão da atmosfera provocando o surgimento de ventos neutros \vec{U} . Além disso, a atração lunar é responsável por forçar o aparecimento de vértices neutros associados com marés atmosféricas. Estes ventos neutros e marés, atuando na região E, causam um arraste de íons através do campo magnético. Este arraste ocorre para os pólos durante o dia induzindo campos elétricos $\vec{E} = \vec{U} \times \vec{B}$ em altas latitudes, devido à interação dos íons arrastados pelos ventos neutros com o campo magnético com grande inclinação nestas latitudes. Estes fenômenos provocam o surgimento do dínamo atmosférico global e polarizam o terminador do lado do amanhecer positivamente e negativamente do lado do anoitecer. Como a condutividade Cowling ionosférica na região do equador magnético é máxima entre 90 e 120 km de altura, esta região permite o fluxo de uma corrente de oeste para leste no lado do amanhecer e de leste para oeste do lado do anoitecer (figura 2.4). Note, porém, que os valores das correntes não são idênticos para os dois lados, já que a condutividade ionosférica depende diretamente da densidade eletrônica (veja Eq. 2.25 – 2.27). Esta corrente que circula pela região equatorial numa faixa de $\pm 3^\circ$ de latitude é denominada EEJ.



$$\vec{J} = \sigma \cdot (\vec{U} \times \vec{B} - \nabla \phi)$$

Fig. 2.4 - Formação do Sistema Sq de correntes, baseado na Teoria do Dínamo Atmosférico. No esquema são mostrados os ventos neutros \vec{U} no sentido dos pólos no lado iluminado pelo Sol, as correntes de altas latitudes $\vec{J} = \sigma \cdot (\vec{U} \times \vec{B} - \nabla \phi)$ que polarizam os terminadores e o eletrojato equatorial $\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$.

FONTE: Denardini (1999).

Diversos autores estudaram essa corrente equatorial e os fenômenos a ela associados (FORBES, 1981 e referências citadas neste). Por exemplo, Gouin (1962) relatou uma reversão do eletrojato equatorial usando medidas indiretas ao nível do solo. Essa inversão na corrente foi nomeada por Gouin e Mayaud (1967) de contra eletrojato equatorial (CEJ). Segundo Mayaud (1977), eventos de CEJ são mais frequentemente observáveis nos meses de solstícios quando a atividade solar é mínima.

2.4. Características das Irregularidades do Eletrojato Equatorial

Como apresentado, o EEJ faz parte do sistema de correntes e campos elétricos controlados pela ação do dínamo atmosférico e a sua presença está associada a diversos fenômenos, tais como, as irregularidades de plasma. Estudos feitos utilizando radar VHF mostraram dois tipos distintos de irregularidades de plasma no eletrojato equatorial: irregularidades tipo 1 e tipo 2 (FEJER e KELLEY, 1980). A figura 2.5 mostra exemplos de espectros de densidade espectral de potência, os quais foram obtidos na região de São Luís do Maranhão.

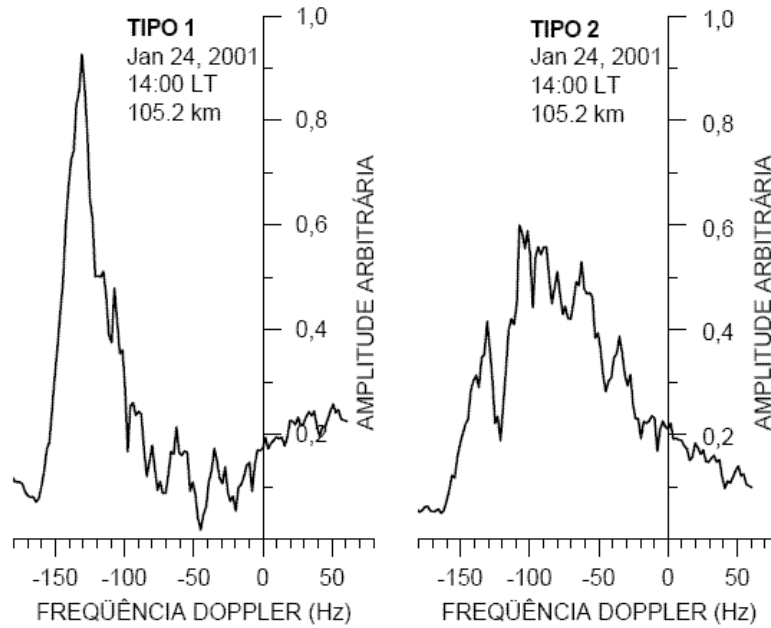


Fig. 2.5 - Espectros de irregularidades tipo 1, à esquerda, e irregularidades tipo 2, à direita, dos dados do Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz, no dia 24 de janeiro de 2001, às 14 horas, para a altura de 105,2 km, medidas no Observatório Espacial de São Luís do Maranhão/INPE - MCT.

FONTE: Denardini (2004).

O sinal captado pelo radar apresenta estes dois espectros misturados. Por meio de um método de mínimos quadrados, um software aplica um ajuste de duas gaussianas, separando o sinal em dois tipos de ecos. Estes tipos de instabilidade são apresentados a seguir.

2.4.1. Instabilidade de Dois-Feixes Modificada e Ecos do Tipo 1

Irregularidades relacionadas à instabilidade de dois-feixes modificada (*modified two-stream*) são conhecidas como ecos tipo 1 e caracterizadas por um espectro fino de grande amplitude encontrado predominantemente na parte mais alta do EEJ (DENARDINI, 2004). Em dias magneticamente calmos, ecos relacionados com esse tipo de irregularidade são esperados em horários entre as 10 e 13 horas (FORBES, 1981). Estes ecos são somente observados quando a diferença entre a velocidade eletrônica (V_e) e a velocidade iônica (V_i), $|V_e - V_i|$, é superior à velocidade íon-acústica C_s (BROCHE et al., 1978). Assim, a condição limiar para a aparição de irregularidades do tipo 1 é dada por:

$$(\vec{k} / k) \cdot (\vec{V}_e - \vec{V}_i) = C_s(1 + \psi), \quad (2.32)$$

na qual k é o vetor de onda da irregularidade. A velocidade íon-acústica C_s (velocidade do som no plasma), da ordem de 360 m/s, é dada por (ROGISTER and D'ANGELO, 1970):

$$C_s = \left[\frac{K(T_e - T_i)}{m_i} \right]^{1/2}, \quad (2.33)$$

onde T_e e T_i são as temperaturas dos elétrons e íons, respectivamente, K é a constante de Boltzmann e m_i é a massa média do íon. ψ é o fator anisotrópico dado por

$$\psi = \frac{v_e \cdot v_i}{\Omega_e \cdot \Omega_i} \cdot \left(\text{sen}^2 \alpha + \frac{\Omega_e^2}{v_e^2} \cdot \text{cos}^2 \alpha \right), \quad (2.34)$$

na qual α é o ângulo entre a onda e o campo magnético, v e Ω são a frequência de colisão e girofrequência dos elétrons e íons. O valor em que a velocidade íon-acústica deve ser excedida depende de ψ , que, por sua vez, depende de α . Para propagação normal ao campo, $\alpha=90^\circ$, ψ é aproximadamente 0,3 na Região E, mas aumenta rapidamente quando α afasta-se de 90° , já que Ω_e é em torno de 100 vezes maior que v_e (HARGREAVES, 1992). Este é o motivo pelo qual ondas eletrostáticas geradas por este mecanismo costumam propagar-se na direção normal ao campo magnético e porque a diferença de velocidades é próxima à velocidade íon-acústica. Como estaremos tratando nas seções a seguir apenas de ondas se propagando na direção normal ao campo, podemos reduzir ψ a:

$$\psi = \frac{v_e \cdot v_i}{\Omega_e \cdot \Omega_i}. \quad (2.35)$$

2.4.2. Instabilidade de Deriva de Gradiente e Ecos do Tipo 2

Irregularidades relacionadas à instabilidade conhecida como deriva de gradiente (*Gradient Drift*) são conhecidas como ecos tipo 2 e são caracterizadas por um espectro mais largo e de amplitude inferior às irregularidades tipo 1. Estes ecos são observados para valores muito pequenos de velocidade de deriva para leste durante o dia (COHEN e BOWLES et al., 1967; BALSLEY, 1973). Mesmo durante períodos diurnos, nos quais a corrente tem seu sentido invertido (condição fundamental de CEJ), estas irregularidades são observadas. Essas irregularidades desaparecem momentaneamente no período em que o campo elétrico reverte seu sinal, reaparecendo após a reversão em diferentes altitudes (FEJER e KELLEY, 1980; RASTOGI, 1972; CARTER et al., 1976). Em dias

magneticamente calmos, esse tipo de irregularidade é predominantemente encontrado na parte mais baixa do EEJ, podendo aparecer desde os primeiros horários da manhã até o pôr-do-sol (DENARDINI, 1999). Contudo, a faixa de altura onde seus ecos dominam em condições calmas aparenta subir em períodos perturbados (DENARDINI et al., 2004).

Este tipo de instabilidade ocorre em plasmas não homogêneos quando campos elétricos de polarização, \vec{E}_p , possuem uma componente muito acentuada na direção paralela ao gradiente de densidade. Devido à existência do campo magnético (\vec{B}) obtemos uma força vertical ($\vec{E}_p \times \vec{B}$), a qual pode estar orientada para cima ou para baixo, dependendo da distribuição de densidade da região perturbada (figura 2.6). Na região do EEJ, as diferentes derivas ocorrem, pois os íons são dominados por colisões, enquanto os elétrons se movem através de um plasma magnetizado passível de colisões. Uma vez que as velocidades de deriva eletrônica são maiores que as iônicas, campos de polarização secundários $\delta\vec{E}$ são criados. As derivas verticais resultantes movem as regiões mais densas para baixo e as menos densas para cima. Então a amplitude das perturbações de densidade parece crescer em relação à densidade de fundo. O mesmo ocorre à noite quando o gradiente de densidade eletrônica e o campo de polarização vertical são para baixo. Efeitos de difusão e recombinação opõem-se ao crescimento da onda e estabelecem um limiar para a ocorrência desta instabilidade.

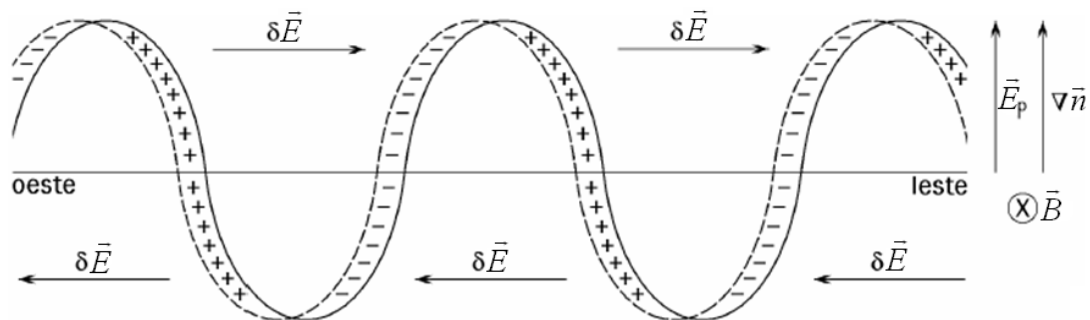


Fig. 2.6 - Representação simplificada do mecanismo de instabilidade de deriva de gradiente no eletrojo equatorial diurno.

Fonte: Fejer e Kelley (1980).

2.4.3. Ventos Neutros e Velocidades de Fase das Instabilidades no EEJ

As velocidades de fase de ambos os tipos de irregularidades do EEJ não são modificadas pela presença dos ventos neutros (SATO, 1975). Elas são relacionadas às velocidades de fase eletrônica V_e e iônica V_i por (ROGISTER e D'ANGELO, 1970):

$$V_p = \frac{(\vec{k}/k) \cdot (V_e + \psi V_i)}{(1 + \psi)} \quad (2.36)$$

O movimento dos elétrons é principalmente controlado pelos campos eletromagnéticos. Independentemente do vento, ele é dado por (BROCHE et al., 1978):

$$\vec{V}_e \approx \frac{(\vec{E} \times \vec{B})}{B^2}, \quad (2.37)$$

onde \vec{B} é o campo magnético da Terra. Reciprocamente, o movimento dos íons é controlado pelas colisões com as partículas neutras, tal que

$$\vec{V}_i \approx \vec{U}, \quad (2.38)$$

onde \vec{U} é a velocidade do vento neutro.

Richmond (1973) propôs que o campo elétrico de polarização E_z é dado por:

$$E_z = \frac{\int \sigma_H ds}{\int \sigma_P ds} \cdot E_y - B_0 \cdot \frac{\int \sigma_P U_y ds}{\int \sigma_P ds}, \quad (2.39)$$

onde as integrais são computadas ao longo da linha de campo magnético (ds). U_y é a velocidade do vento neutro no eixo leste-oeste magnético e E_y é o campo elétrico neste mesmo eixo.

As equações 2.37 e 2.39 levam à seguinte expressão para a componente no eixo leste-oeste magnético da velocidade eletrônica (BROCHE et al., 1978):

$$V_{ey} = -\frac{E_z}{B_0} = -\frac{E_y \int \sigma_H ds}{B_0 \int \sigma_P ds} + \frac{\int \sigma_P U_y ds}{\int \sigma_P ds} \quad (2.40)$$

O primeiro termo é a contribuição independente do vento (representado como $(V_{e0})_y$), causada apenas pelo campo elétrico do dínamo. O segundo termo é o valor médio de U_y ao longo da linha de campo magnético (representado por $\langle U_y \rangle$). Assim temos:

$$V_{ey} = (V_{e0})_y + \langle U_y \rangle \quad (2.41)$$

Para uma velocidade de vento no eixo leste-oeste magnético U e um eletrojato simétrico, as outras componentes de V_e são independentes do vento, e

$$V_e = V_{e0} + \langle U \rangle, \quad (2.42)$$

onde V_{e0} é a velocidade eletrônica sem ventos correspondentes ao campo elétrico primário E_y .

O resultado correspondente da Equação 2.38 para os íons permanece inalterado, na forma

$$V_i = V_{i0} + U. \quad (2.43)$$

A velocidade de fase das irregularidades do tipo 1 é próxima à velocidade da onda marginalmente instável, a qual é obtida pela substituição de (2.32) em (2.36):

$$\vec{V}_{p1} = \frac{(\vec{k}/k) \cdot (V_e + \psi V_i)}{(1 + \psi)} = C_s + (\vec{k}/k) \cdot \vec{V}_i \quad (2.44)$$

Este resultado mostra que a modificação $\Delta \vec{V}_{p1}$ induzida pelo vento é $\vec{V}_{p1} = (\vec{k}/k) \cdot \vec{V}_n$

Para irregularidades do Tipo 2, (2.36), (2.42) e (2.43) levam a

$$\vec{V}_{p2} = (\vec{V}_{p2})_0 + (\vec{k}/k) \cdot (\vec{U}) + \frac{(\vec{k}/k) \cdot (\langle \vec{U} \rangle - \vec{U})}{(1 + \psi)}, \quad (2.45)$$

onde $(\vec{V}_{p2})_0$ é a velocidade de fase a qual seria observada sob as mesmas condições (mesmo campo elétrico primário E_y e mesmos perfis ionosféricos) se o vento estivesse ausente.

Se $\vec{U} = \langle \vec{U} \rangle$, há uma deriva inteira de ambos os elétrons e íons na mesma velocidade \vec{U} , e então as irregularidades do tipo 1 e tipo 2 apresentam a mesma variação de suas

velocidades de fase: $(\vec{k}/k) \vec{U}$ (Broche et al, 1978). Esta condição é preenchida se o vento é constante com altitude e latitude, i.e., ao longo das linhas de campo. Pode ser admitido que a conclusão seja a mesma se a curvatura das linhas do campo magnético terrestre fosse desconsiderada e se o vento dependesse somente da altitude, o que corresponde aos resultados de Sato (1975).

É também uma boa aproximação, próximo ao equador magnético, se o perfil de vento for suficientemente suave. A condutividade Pedersen σ_P rapidamente aumenta com a altitude próxima a 100 km, de forma que as contribuições principais em $\int \sigma_P U_y d\vec{s}$ e $\int \sigma_P d\vec{s}$ são oriundas do topo da linha de campo, e

$$\langle \vec{U} \rangle \approx (\vec{U})_{topo}, \quad (2.46)$$

onde $(\vec{U})_{topo}$ é, por sua vez, próximo a velocidade local \vec{U} , devido a pequena diferença de altitude entre o topo da linha de campo e o ponto de interesse caso este seja próximo suficiente do equador (BROCHE et al., 1978).

Se um cisalhamento de ventos está presente, produzindo uma grande variação da velocidade do vento com altitude ou se o ponto de interesse for afastado do equador, uma diferença significativa pode aparecer entre \vec{U} e $\langle \vec{U} \rangle$. Para uma latitude de 3°, o topo da linha de campo tem uma altitude superior a esta das observações por aproximadamente 20 km (BROCHE et al., 1978).

2.4.4. Revisão Teórica sobre Contra Eletrojato Equatorial (CEJ)

Sabemos que a inversão na campo elétrico de polarização e no gradiente de densidade eletrônica podem causar inversão na deriva de irregularidades ionosféricas presentes na região E (DENARDINI et. al., 2009). Obviamente, inversões na deriva relacionadas com o campo elétrico de polarização são seguidas por uma inversão na EEJ atual, a qual pode ser detectada por sua assinatura na componente horizontal do campo magnético da Terra (H), medido por magnetômetros próximos a região do equador magnético. A partir de estudos, Hanuise et al.(1983) explicaram a possível reversão do campo elétrico leste-oeste durante o evento CEJ, devido a uma combinação anormal modos de vento das marés de escala global, ou seja, semi-diurno (2,2) e (2,4) e modo diurno (1, -2). Tarpley (1973) afirmou que a posição do foco Sq iria alterar a força do eletrojato equatorial. No

entanto, outros autores acreditam que eventos locais são responsáveis por reverter EEJ, ao invés de eventos globais serem os causadores. A maioria deles acredita que os ventos verticais e ondas de gravidade associados ao cisalhamento de vento são capazes de produzir tais reversões em uma estreita faixa de latitude e altitude (RAGHAVARAO e ANANDARAO, 1987 e suas referências). De acordo com Somayajulu e Viswanathan (1987) muitos eventos de contra eletrojato têm sido observados no setor indiano. Usando um radar alta frequência em Addis-Abeba (setor Leste Africano), Crochet et al. (1979) observaram dois feixes de ondas com velocidade de fase maior que a velocidade íon-acústica na presença do gradiente normal para cima durante o evento de CEJ em 21 de janeiro de 1977. Recentemente, Woodman e Chau (2002) relataram a primeira observação de radar VHF de dois feixes de ondas durante eventos de CEJ nos 40 anos de existência do observatório de Jicamarca (setor peruano). Eles afirmaram que, no início e término dos eventos de CEJ eles encontraram o que chamaram de "a condição mais próxima da instabilidade linear de dois feixes de ondas". Além disso, todos os estudos acima mencionados têm sido feitos na Índia, o oriente da África e em setores peruano baseado principalmente em magnetômetros. Assim, neste trabalho abrangemos uma zona longitudinal diferente, examinando algumas características CEJ com base em dados de radar coerente no setor brasileiro. Apesar de vários estudos feitos durante as últimas décadas, o mecanismo que impulsiona a corrente do CEJ em condições geomagnéticas calmas ainda é uma questão em aberto. A única afirmação é que o contra eletrojato é mais frequentemente observado durante meses do solstício de mínimo solar (MAYAUD, 1977), como mostra a Figura 2.7.

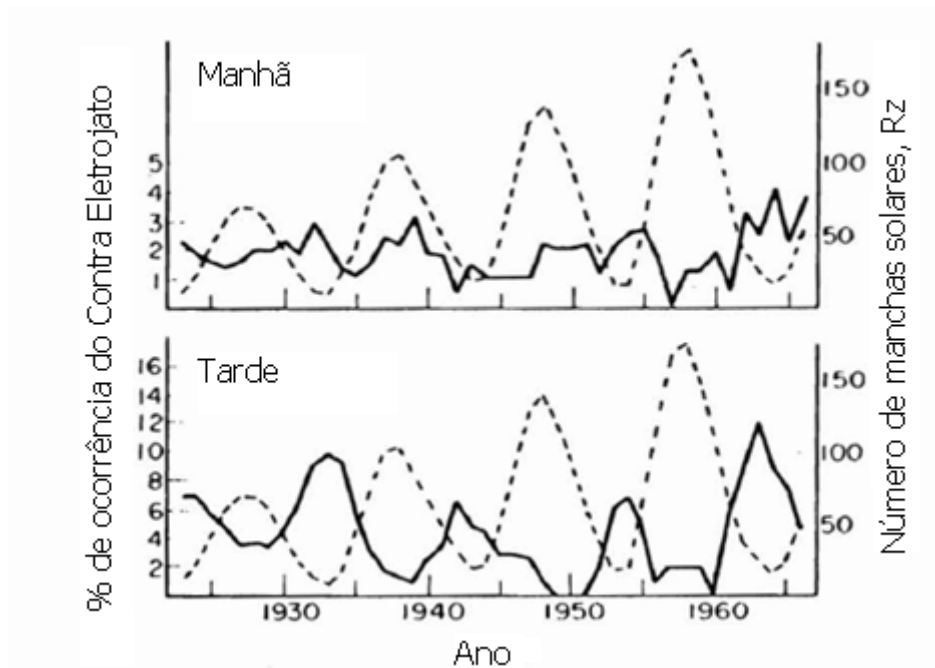


Fig 2.7 – Conjunto de gráficos mostrando a ocorrência do aparecimento do CEJ em relação ao número de manchas solares.

Fonte: Adaptada de Mayaud (1977)

Hanuse et al. (1983) atribuíram que as variações do CEJ têm influencia dos modos de marés (1,-2) (2,2) e (2,4). Em relação ao mecanismo de modificação desse fenômeno, Raghavarao e Anandarao (1987) acreditam que os ventos verticais e ondas de gravidade associadas ao cisalhamento de ventos são capazes de produzir essas inversões nas correntes em uma região estreita de latitude e altitude.

Mayaud (1977) utilizou dados de magnetômetros de estações de região equatorial e afirmou que uma excursão negativa da componente H do campo magnético pode identificar um evento de contra eletrojato equatorial. Porém ele comentou que utilizar este parâmetro do campo pode ser um argumento insuficiente para constatar tal fato. Ele disse que utilizando dados de apenas uma estação equatorial, tal identificação deste evento se torna muito subjetiva devido às incertezas causadas pelas perturbações magnéticas. As estações analisadas localizadas fora da região equatorial confirmam que este fenômeno é apenas equatorial. Além disso, foi afirmado que o perfil vertical varia em relação às latitudes magnéticas, mostradas na Figura 2.8.

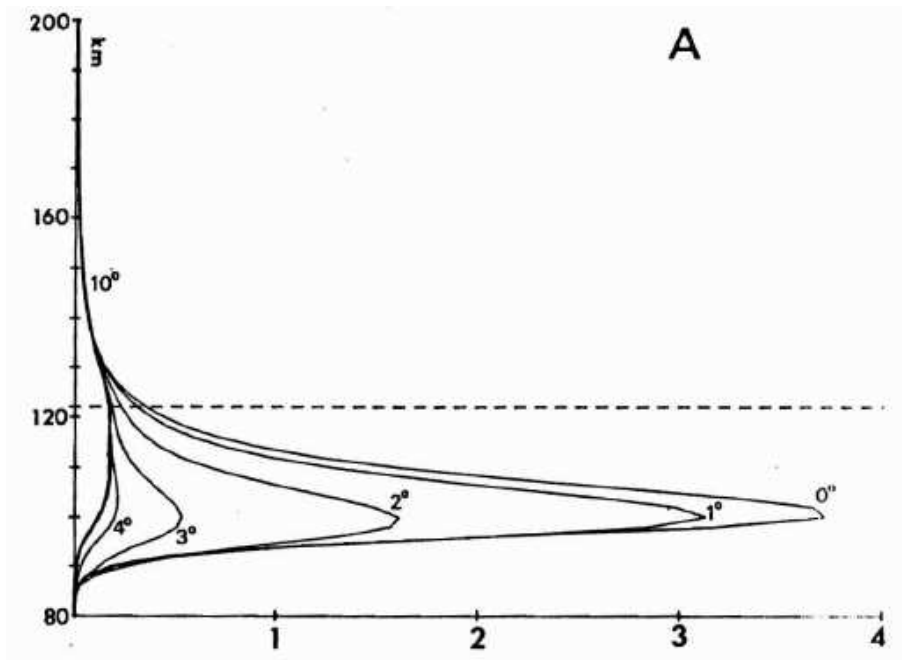


Fig 2.8 – Perfil de altura da densidade de corrente em relação às latitudes magnéticas.

Fonte: Mayaud (1977)

Neste gráfico podemos perceber que com o afastamento do equador magnético, a densidade de corrente na região equatorial passa a ter menor amplitude. Mayaud (1977) notou ainda que é possível encontrar eventos de CEJ em qualquer período do dia, mas concordou com as publicações anteriores à sua em que a ocorrência do evento de CEJ é muito mais frequente no período da tarde. Ele afirmou que esses eventos de CEJ da tarde são mais vistos no solstício de verão, em dezembro. O evento de CEJ, no período do equinócio não tem longa duração, mas esse evento ainda tem mais curta duração no período de solstício de Junho.

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTAÇÃO

O presente estudo de ondas de gravidade e contra eletrojato equatorial é baseado no comportamento das irregularidades ionosféricas medidas por radares e nas medidas de assinaturas do campo magnético ao nível do solo. Neste capítulo vamos apresentar de forma sucinta o princípio de funcionamento dos instrumentos, bem como o radar de espalhamento coerente (RESCO) e o magnetômetro do tipo “*Fluxgate*”.

3.1. Radar de Espalhamento Coerente (RESCO)

No setor brasileiro o radar de espalhamento coerente em 50 MHz tem sido operado desde 1998 em São Luís, no Maranhão (2,33 ° S; 44,27° O), próximo ao equador magnético. O RESCO observa o comportamento das irregularidades ionosféricas com escala de 3 metros de comprimento perpendiculares às linhas de campo magnético. O principal objetivo dessas observações é estudar a dinâmica da região E através da análise espectral dos ecos retro-espalhados pelas irregularidades (DENARDINI, 2003).

Os parâmetros do radar são escolhidos de acordo com o tipo de estudo a ser conduzido durante a sua operação. A seguir, apresentamos de forma resumida a explicação dos parâmetros mais relevantes, bem como as considerações para suas escolhas.

3.1.1. Frequência de Operação

Usualmente, frequências na porção inferior da banda VHF são usadas para estudos utilizando radares de espalhamento coerente. A frequência de operação do radar é um importante parâmetro, pois ela seleciona a escala da irregularidade que vai ser sondada. Os ecos coerentes de irregularidades são obtidos quando a escala da irregularidade é metade do comprimento de onda correspondente da frequência de operação do radar e resultam na recepção num sinal mais forte. Frequências abaixo de 30 MHz e acima de 54 MHz não podem ser utilizadas, pois entram na faixa do espectro reservado para radiodifusão e TV. Com base nos dados acima, entre outras características desejadas, 50 MHz foi a frequência de operação escolhida para o radar RESCO.

3.1.2. Sistema Pulsado

Sistemas de onda contínua são ideais para medir deslocamento Doppler, porém, para este radar, também é necessário uma boa medição da altura da fonte e sistemas pulsados podem mais facilmente obter estes dois parâmetros. O único cuidado a ser tomado é que a Frequência de Repetição de Pulsos (*Pulse Repetition Frequency*, PRF) deverá ser maior que duas vezes o máximo deslocamento esperado pelo alvo observado.

3.1.3. Largura do Pulso

Num sistema de radar pulsado simples a relação sinal-ruído do eco refletido é proporcional à potência média do radar (SKOLNIK, 1962). A potência média aumenta com a largura do pulso e com a frequência de repetição de pulsos para uma dada potência de pico. No entanto, a PRF é limitada para evitar ambigüidades nas medidas de altura e, além disso, a largura do pulso é inversamente proporcional à resolução em altura. Portanto, a resolução em altura de um radar pulsado é dada por:

$$dh = \text{sen}(\theta)dR + \frac{h}{\tan(\theta)} d\theta, \quad (3.1)$$

onde:

h = altura zenital do solo ao ponto de reflexão (m);

R = distância em linha reta do ponto de reflexão ao radar (m);

dh = resolução em altura (m);

θ = ângulo de elevação de R em relação ao plano do solo (rad);

dR = resolução em altura = $c \cdot t/2$, onde c é a velocidade da luz (m/s) e t é a largura do pulso (μs);

$d\theta$ = ângulo de abertura do feixe da antena (rad).

Como descrito no capítulo anterior, a região E estende-se de 90 a 120 km, enquanto que a Região F localiza-se entre 120 e 1500 km. Desta forma, os requisitos de resolução são diferentes para estas duas regiões ionosféricas, levando a escolha da largura do pulso a ser variável de 5 a 100 μs .

3.1.4. Frequência de Repetição de Pulso

Como mencionado anteriormente, pelo critério de Nyquist, a “PRF” deve ser maior que duas vezes o máximo deslocamento Doppler esperado. Porém, este parâmetro não pode ser muito alto, pois causaria ambigüidades nas medições de altura. Além disso, as velocidades e as alturas são diferentes para as regiões E e F. Conseqüentemente, as “PRF's” serão diferentes para estas duas regiões.

No caso da região E, assumindo a velocidade máxima de propagação das irregularidades nesta região como sendo 400 m/s e considerando 120 km como a altura máxima para esta camada, temos uma “PRF” limitada de 266,6 a 1080 Hz. Para a região F, assumindo a velocidade máxima de 200 m/s para as irregularidades e tomando 800 km como a altura máxima desta região, resultamos numa “PRF” limitada de 133,4 a 162 Hz.

Desta forma, para satisfazer os requisitos para ambas as regiões, foi escolhida para o radar uma “PRF” variável entre 100 e 1000 Hz.

3.1.5. Potência do Transmissor

Para estudarmos as irregularidades das regiões E era necessário um transmissor de alguns quilowatts, no entanto para estudar com boa precisão os ecos de espalhamento observados na região F fazia-se necessário um transmissor de dezenas de quilowatts (JANARDHANAN, 1983). Como resultado destes requisitos foi escolhida a utilização de oito transmissores de 15 kW, totalizando a potência de 120 kW. Além disso, um sistema de 8 transmissores permite que a refrigeração seja feita com ventilação forçada, diminuindo os custos de instalação e operação de radares deste tipo.

3.1.6. Descrição do Sistema (RESCO)

O sistema completo do Radar RESCO pode ser dividido basicamente em 4 partes: sistema de antenas, sistema transmissor, sistema receptor, e sistema de controle e armazenamento de dados do radar. A seguir é dada uma breve descrição de cada um dos sistemas, sendo que partes comuns aos sistemas transmissor e receptor, que são os osciladores, serão descritas no sistema transmissor apenas com caráter didático.

3.1.6.1. Sistema de Antenas

O sistema de antenas do radar RESCO é composto por 768 dipolos de cabo coaxial, dispostos no arranjo de 32 x 24 (ver Figura 3.1). As 32 antenas são dispostas em grupos de 4 antenas para sua alimentação pelos 8 transmissores. Cada antena do arranjo consiste de 24 dipolos ligados em série, dois a dois, alinhados no sentido norte-sul, resultando num ganho total aproximado para a antena de 32.5 dB.



Fig. 3.1 – Fotografia do Observatório Espacial de São Luís do Maranhão do INPE/MCT, onde pode ser visto o conjunto de antenas do Radar de Espalhamento Coerente - RESCO.

FONTE: Denardini (2004).

Como as irregularidades são posicionadas na direção das linhas do campo magnético terrestre outro fator determinante foi a escolha da largura do feixe nos sentidos norte-sul e leste-oeste. Isto é criticamente importante no caso do RESCO, uma vez que o EEJ está se deslocando para oeste e se afastando do observatório. Para a largura do feixe no sentido norte-sul foi escolhido o valor de 6° , no sentido leste-oeste foi escolhida uma largura de feixe de $3,5^\circ$.

3.1.6.2. Sistema Transmissor

O sistema transmissor do RESCO é composto de um oscilador de 30 MHz, um oscilador de 80 MHz, dois moduladores de pulso, um misturador, um amplificador de 80 MHz, um divisor de potência, oito deslocadores de fase, oito transmissores e oito módulos duplexadores pré-amplificadores. A potência de pico (120 kW) é dividida igualmente

entre os transmissores, assim resultando na irradiação de 15 kW de pico em cada um deles.

A saída de cada um dos dois osciladores (de 30 MHz e 80 MHz) é conectada a um modulador de pulso e ao receptor. Os dois moduladores recebem os sinais senoidais gerados no controlador do radar e os modula, cada um com sua devida portadora. O misturador recebe os sinais pulsados em 80 MHz e 30 MHz e coloca na sua saída a diferença e a soma de frequência entre eles, dentre as quais um sinal pulsado de 50 MHz. No amplificador de frequência intermediária (FI) 50 MHz, o sinal com a soma das frequências é filtrado e o sinal com a diferença das frequências é amplificado. Sua saída conecta-se ao divisor de potência, onde posteriormente o sinal é dividido igualmente em oito partes. Um sinal de controle do radar determina a modificação na fase que ocorrerá nos deslocadores de fase, de acordo com o interesse do operador. O sinal chega aos oito transmissores, onde cada um é conectado a um módulo pré-amplificador-duplexador. Os duplexadores (também conhecidos como chaves T/R) habilitam o uso da mesma seção da antena para transmissão e recepção.

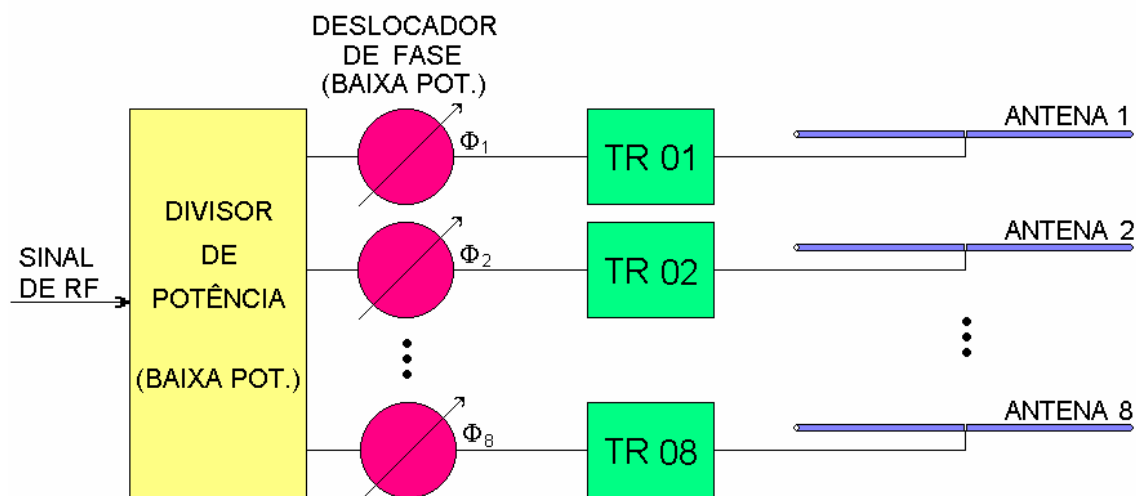


Fig. 3.2 – Diagrama em blocos mostrando esquema de transmissão do radar usando 8 transmissores com divisores de potência e deslocadores de fase de baixa potência do Sistema Radar RESCO.

FONTE: Adaptada de Denardini (1999).

3.1.6.3. Sistema Receptor

O Sistema Receptor do RESCO é composto basicamente de oito pré-amplificadores, oito deslocadores de fase, um combinador e um circuito receptor. Na recepção, o sinal chega

ao conjunto de antenas e é encaminhado através do módulo pré-amplificador duplexador aos deslocadores de fase. Os deslocadores de fase são idênticos aos utilizados no sistema transmissor e são controlados da mesma forma, recebendo o mesmo deslocamento imposto no momento da transmissão. Em seguida, o circuito combinador soma os oito sinais, que posteriormente chegam ao circuito receptor. O circuito receptor amplifica o sinal, converte para uma FI de 30 MHz e o divide em duas partes idênticas. Uma das partes é passada a um detector de fase junto com a saída do oscilador de 30 MHz. A outra parte do sinal é passada a um segundo detector junto com a saída do oscilador de 30 MHz defasado eletricamente de 90°. As saídas dos dois detectores de fase chegam cada uma a um filtro onde são removidas as frequências indesejadas, as quais foram geradas nos processos de detecção de fase. Estas duas saídas do receptor são chamadas de sinal em fase e sinal em quadratura e contém as informações desejadas do sinal retro-espalhado do radar.

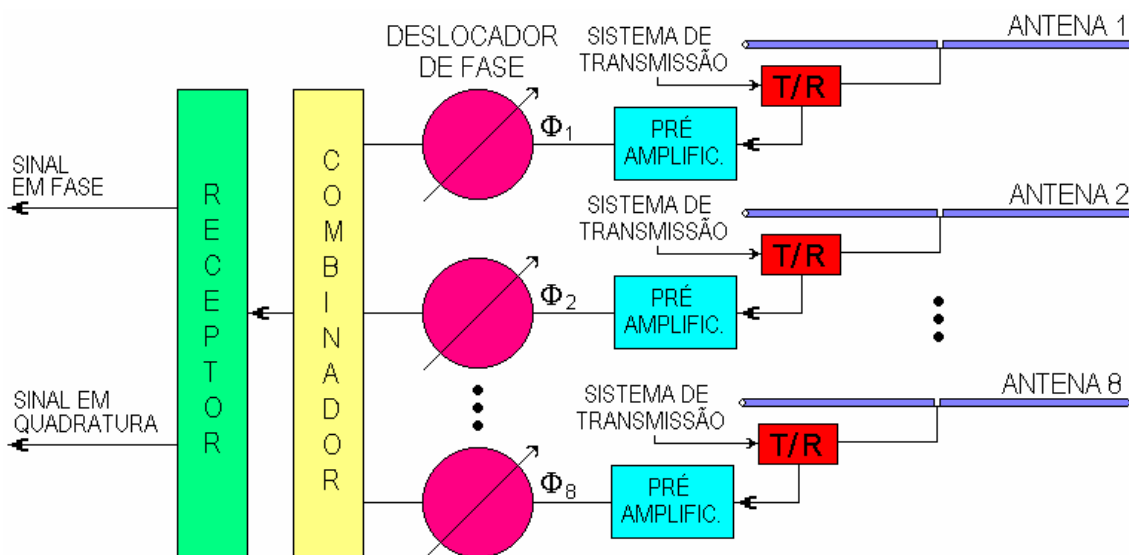


Fig.3.3 – Diagrama em blocos mostrando esquema de recepção para o radar ionosférico, utilizando o sistema de chaves T/R para comutação entre os sistemas de transmissão e recepção do Sistema Radar RESCO.

FONTE: Adaptada de Denardini (1999).

3.1.6.4. Sistema de Controle e Armazenamento dos Dados

O sistema controlador do Radar RESCO é responsável por gerar os pulsos de controle dos sinais transmitidos, dos sinais recebidos, do sistema de armazenamento de dados e da alteração da posição do feixe da antena entre oblíquo e vertical.

Esta unidade controla as variáveis do sinal transmitido, sendo a largura de pulso variável de 20 a 100 μ s e a taxa de repetição de pulsos variável de 50 Hz a 1000 Hz, correspondendo a um período entre pulsos de 1 ms até 20 ms. Este sistema ainda é responsável pelas variáveis de controle da recepção, como atenuação exigida pela unidade de aquisição de dados, tempo entre a transmissão do sinal e início da amostragem e número de amostras do sinal recebido.

A unidade de armazenamento dos dados consiste de um circuito de interface e um computador para armazenamento dos dados. Nesta unidade os sinais analógicos dos dois canais, o sinal em fase e em quadratura são convertidos em dados digitais de 16 bits para posterior gravação. Ao serem gravados, os dados são colocados no arquivo conforme a ordem a que chegam, ou seja, é colocado o sinal em fase, parte real, de uma dada altura, após o sinal em quadratura, parte imaginária desta mesma altura, repetindo-se até que todos os arquivos tenham sido salvos.

Juntamente com os dados é gravado um outro arquivo, de nome “RDATA.HDR”. Este arquivo contém as informações sobre a taxa de repetição de pulso (IPP), largura de pulso (PW), tempo de atraso entre emissão de pulso e início de aquisição de ecos (TD), tempo de intervalo entre amostras de ecos (TI), tempo de amostragem (SW), número de pulsos (NP), número de alturas (NG), inclinação de feixe (BEAM) e tempo de repetição por feixe (RT). Alguns desses parâmetros são identificados na figura 3.4.

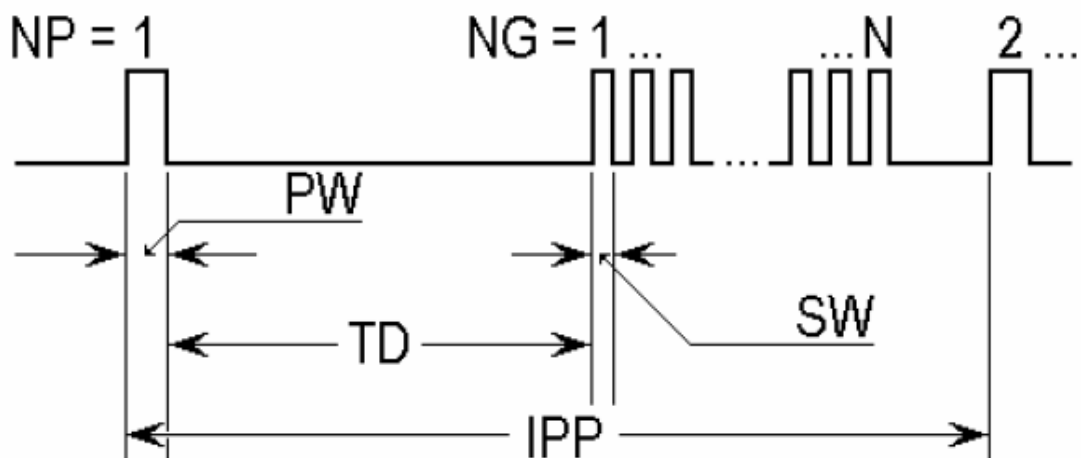


Fig.3.4 – Diagrama temporal contendo os pulsos de sinais transmitidos e as janelas de amostragem do eco recebido pelo radar RESCO.

FONTE: Denardini (2004).

3.1.6.5. Análise Espectral, Espectrograma e Mapa RTI

Ao obtermos os sinais de fase e quadratura, o passo seguinte é verificar se nenhum nível de tensão contínua foi adicionado antes do armazenamento das amostras. Para tal verificação tomamos a média da variação de cada componente para o conjunto de pulsos recolhidos. Essa média é subtraída de cada valor do conjunto. A segunda verificação que fazemos nos sinais é observar se existe alguma variação brusca nas amplitudes relativas aos pulsos processados. Caso existam variações bruscas, elas são descartadas.

Após esta etapa de verificações, os sinais (real e imaginário) são transportados do domínio do tempo para o domínio da frequência. A técnica usada para o processamento dos dados é baseada na análise espectral de Fourier. De cada pacote de dado bruto é gerado um espectro de potência para cada altura (*gate*) que foi amostrado. A figura 3.5 mostra um exemplo da variação das componentes em fase e em quadratura de acordo com a sequência de ecos recebidos. Nesta figura também é apresentado o gráfico correspondente do espectro de potência obtido pela análise de Fourier desta série complexa.

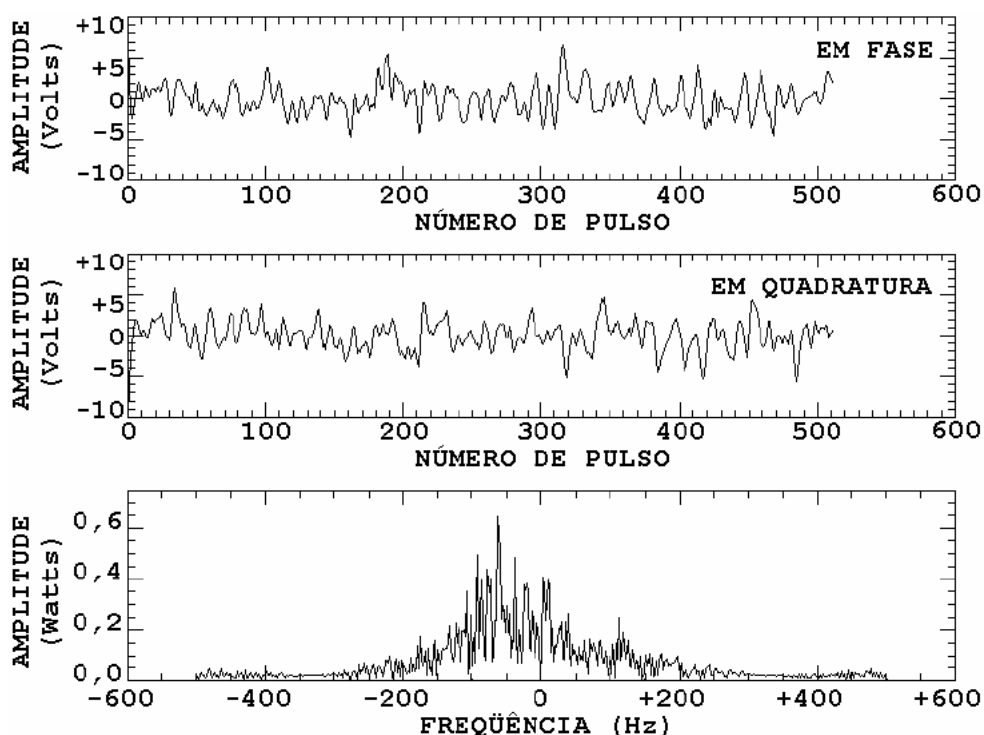


Fig.3.5 – Exemplo de variação das componentes em fase e em quadratura dos pulsos recebidos e do espectro de potência obtido através da análise espectral de Fourier.

FONTE: Denardini (2004).

A análise de todos os dados brutos produz vários conjuntos de espectros. Os espectrogramas são obtidos pelo agrupamento em ordem cronológica de todos estes espectros relativos à mesma altura. Logo, ao fim da análise espectral de todos os pacotes de dados, teremos espectrogramas de todas as faixas de alturas medidas. A figura 3.6 mostra um exemplo de espectrograma obtido pelo agrupamento de todos os espectros referentes à altura 106,5 km. Nesta figura, o conjunto de cores determina a distribuição de potência espectral (em decibéis) dos ecos recebidos ao longo do período analisado.

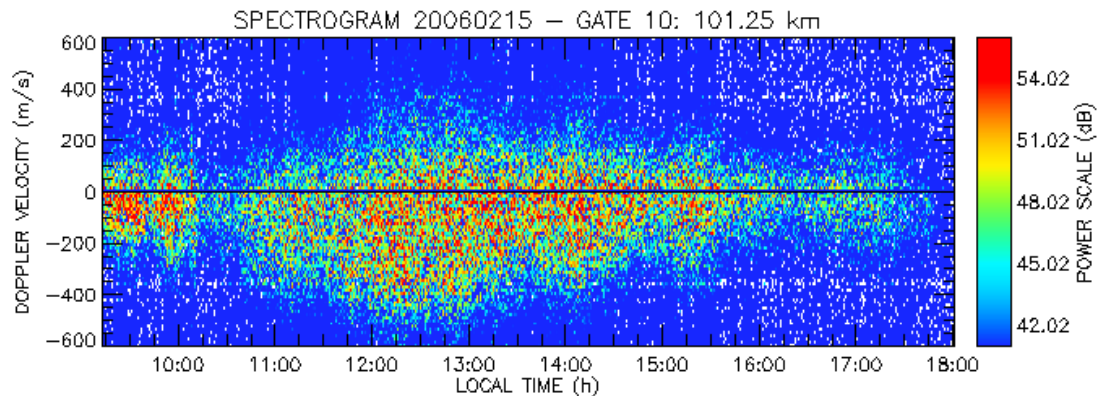


Fig.3.6 – Exemplo de espectrograma obtido pelo agrupamento de todos os espectros referentes à altura de 101,5 km (*gate 10*), obtidos pelo radar RESCO.

Em seguida, os espectrogramas são integrados em frequência e agrupados de acordo com a altura que correspondem. A integração em frequência de cada espectro de potência resulta numa variação de potencia total do sinal retro-espalhado ao longo do período de aquisição para a faixa de altura correspondente do espectrograma. A compilação de todos esses valores integrados, organizados por altura, resulta no mapa de intensidade de potência (mapa RTI). A figura 3.7 apresenta um exemplo de RTI, obtido pela integração dos espectrogramas de todas as alturas medidas.

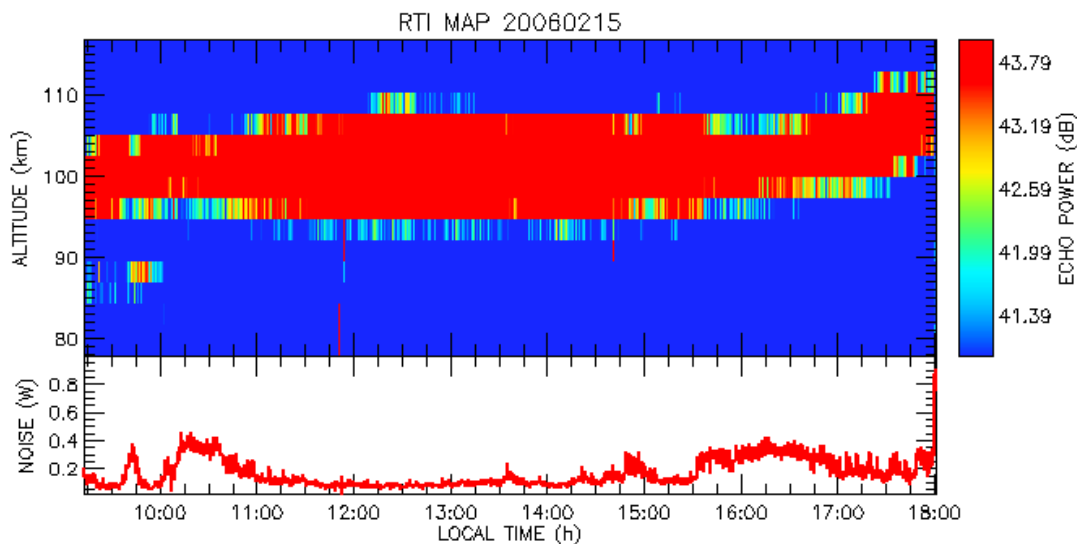


Fig.3.7 – Exemplo de Mapa RTI (*Range Time Intensity*) obtido pelo radar RESCO mostrando o aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia.

Neste mapa é possível visualizar a região que está retro-espalhando o sinal transmitido pelo radar em relação à hora, local e à latitude. O código de cores deste mapa representa a intensidade de potência recebida (em Watts).

No painel inferior da figura 3.7 temos o nível de ruído do sinal captado. Este parâmetro é baseado nas características de formação dos espectros de potência. Na figura 3.8 podemos ver um exemplo do espectro de potencia do EEJ. Nela estão identificados os parâmetros do espectro usados para determinar o nível de ruído.

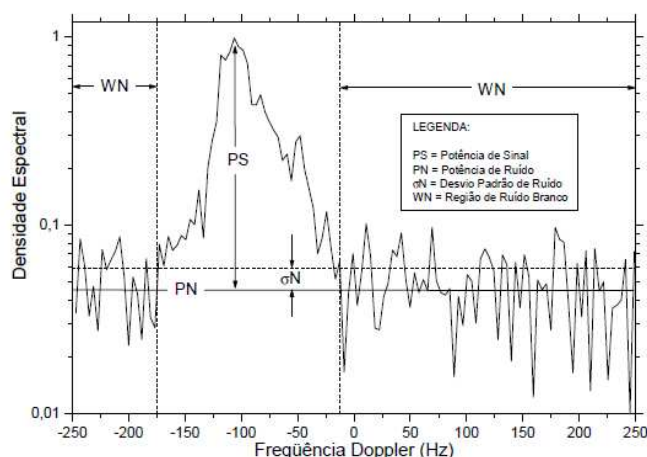


Fig.3.8 – Exemplo de variação das componentes em fase e em quadratura dos pulsos recebidos e do espectro de potência obtido através da análise espectral de Fourier.

FONTE: Denardini (2004).

Nesta figura, PS é densidade espectral de potência média do sinal recebido, PN é a densidade espectral de potência média do ruído espectral, σN é o desvio padrão do ruído. Os dados são processados e colocados de maneira crescente. Através de um sistema que compara a variação do desvio padrão e a variação de um sinal com o seu consecutivo, identificamos o sinal retro-espalhado por um alvo. Este critério de detectabilidade de um sinal retro-espalhado está definido no trabalho de Gage e Balsley (1978) e Balsley e Gage (1980).

3.2. Sistemas de Magnetômetros

Os magnetômetros utilizados pelo INPE são instalados no solo enterrado a 1 metro de profundidade a uma distância de 60 metros do computador de processamento. Seu principal objetivo é registrar as variações geomagnéticas, causadas principalmente por fontes externas, ocorridas no campo magnético da Terra, na região brasileira. A partir dessas medidas é possível investigar sobre as possíveis causas destas variações temporais

3.2.1. Magnetômetro tipo “Fluxgate”

O magnetômetro tipo “Fluxgate” é um instrumento feito para medição das variações de intensidade de campo magnético na Terra e no espaço. Sua medição das componentes vetoriais destas variações de campo magnético pode variar na faixa de 0,1 nT a 1 mT, os quais normalmente adotam o sistema de coordenadas geográficas (X, Y, Z) ou coordenadas magnéticas (H, D, Z). O princípio geral de seu funcionamento é a aplicação imediata da Lei de Indução de Faraday, a qual prevê a indução de uma força eletromotriz ε nos terminais de uma bobina quando houver variação no fluxo magnético dentro dela. Se desconsiderarmos mudanças na geometria do sensor (número de espiras, área de secção reta, entre outros), uma maneira de provocar variações no fluxo é através de mudanças na permeabilidade do material que constitui o núcleo dessa bobina. Baseado neste princípio existe diferentes configurações de sensores “Fluxgate”.

O sensor “Fluxgate” de núcleo em anel é construído a partir de uma fina fita de material ferromagnético facilmente saturável, isto é, que apresenta uma curva de saturação (relação entre o fluxo magnético \vec{B} e a densidade de fluxo magnético \vec{H} , i.e., \vec{B} vs \vec{H}) praticamente vertical, possuindo alta permeabilidade ($\mu = d\vec{B} / d\vec{H}$) para um valor de \vec{H} não muito elevado e saturam abruptamente para valores maiores de \vec{H} (onde $\mu \approx 0$).

Além disso, é normal utilizar núcleo enrolado por uma bobina em forma de anel ou toróide. Neste caso, uma corrente alternada é aplicada na bobina, a qual cria um campo magnético que circula pelo núcleo e produz um fluxo no material ferroso para saturação periódica, ora num sentido ora em sentido inverso. Para completar sua construção, uma outra bobina de detecção é enrolada envolvendo o toróide. Desta forma, enquanto o material ferroso está entre extremos de saturação, ele mantém uma permeabilidade magnética média muito maior que a do ar. Quando o núcleo está saturado, sua permeabilidade se torna igual à do ar. Se não há uma componente de campo magnético ao longo do eixo da bobina de detecção, a variação de fluxo vista pelo enrolamento é nula. A figura 3.9 mostra o esquema de funcionamento dos magnetômetros.

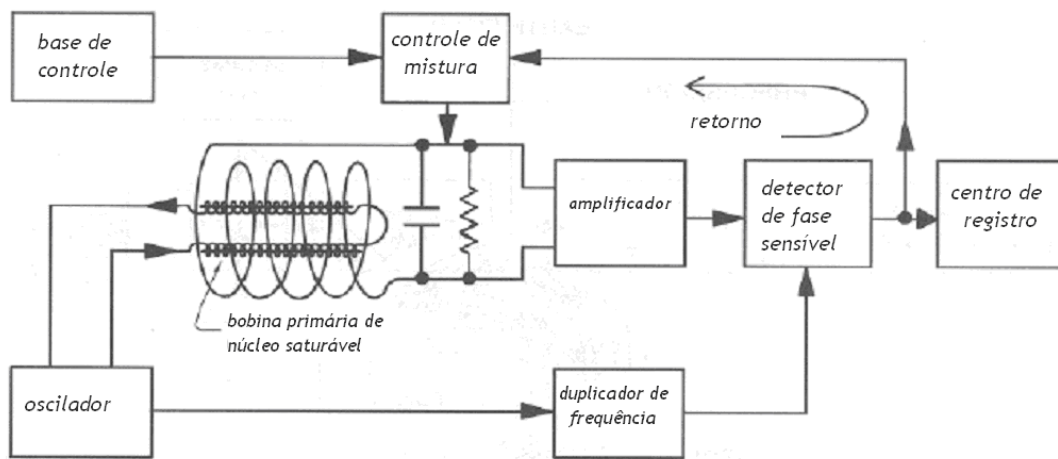


Fig. 3.9 - Estrutura funcional do magnetômetro tipo "Fluxgate".

Fonte: Adaptada de Campbell (1997).

A Figura 3.10 mostra o vetor total do campo geomagnético que é representado pela letra \vec{F} . A componente magnética norte é representada pelo elemento linear X , a componente magnética leste é representada pelo Y , Z é a componente vertical para baixo, e H é a componente horizontal paralela a superfície da Terra. O elemento angular D representa a declinação magnética definida pelo ângulo entre o norte geográfico (na direção de \hat{x}) e a direção da componente da componente horizontal do campo magnético (\vec{H}). O elemento angular I representa a inclinação magnética o qual é o ângulo entre a direção da componente magnética horizontal (\vec{H}) e o vetor intensidade total do campo magnético (\vec{F}).

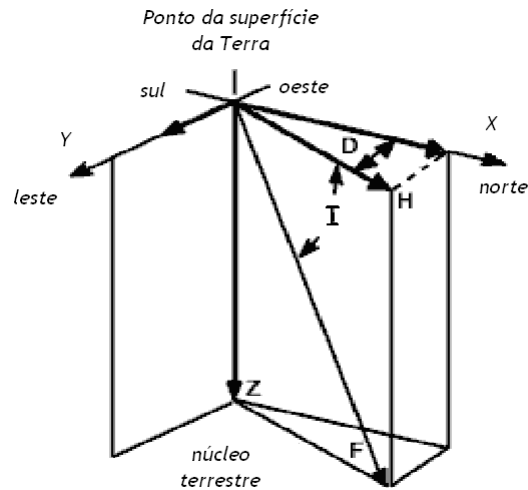


Fig. 3.10 - Elementos do vetor magnético

3.2.2. Pré-Processamento Básico dos dados de Magnetômetro

As bobinas dos magnetômetros medem as três componentes do campo magnético (H, D, e Z). Cada uma destas 3 variáveis corresponde a nível de tensão (de -10 a +10 Volts) proporcional ao que está sendo medido. Esta tensão é convertida para um número inteiro pelo "Analog-to-Digital Converter (ADC)", que lê cada um dos canais de uma vez. Cada valor inteiro corresponde a uma escala de tensão, que por sua vez corresponde a uma grandeza física. Estes valores são gravados em arquivos horários, junto com a hora, minuto e segundo.

Para analisar os dados de magnetômetro, eles voltam a ser convertidos a grandezas físicas medidas. Para isso a relação entre as grandezas físicas e os valores de tensão são considerados pelo software do equipamento. No nosso caso, esse software não funcionou ou estava desatualizado. Então, foi necessário criar essa ferramenta para essa conversão de dados e está apresentada no APÊNDICE B. Finalmente, após esta etapa os valores medidos (H, D, e Z) são armazenados em arquivos ASCII. Além disso, são adicionados informações de hora, minuto e segundo em que foram feitas as medições.

Para este estudo, foram processados todos os dados brutos das Estações de São Luís e Eusébio, mostrados na Figura 3.11.

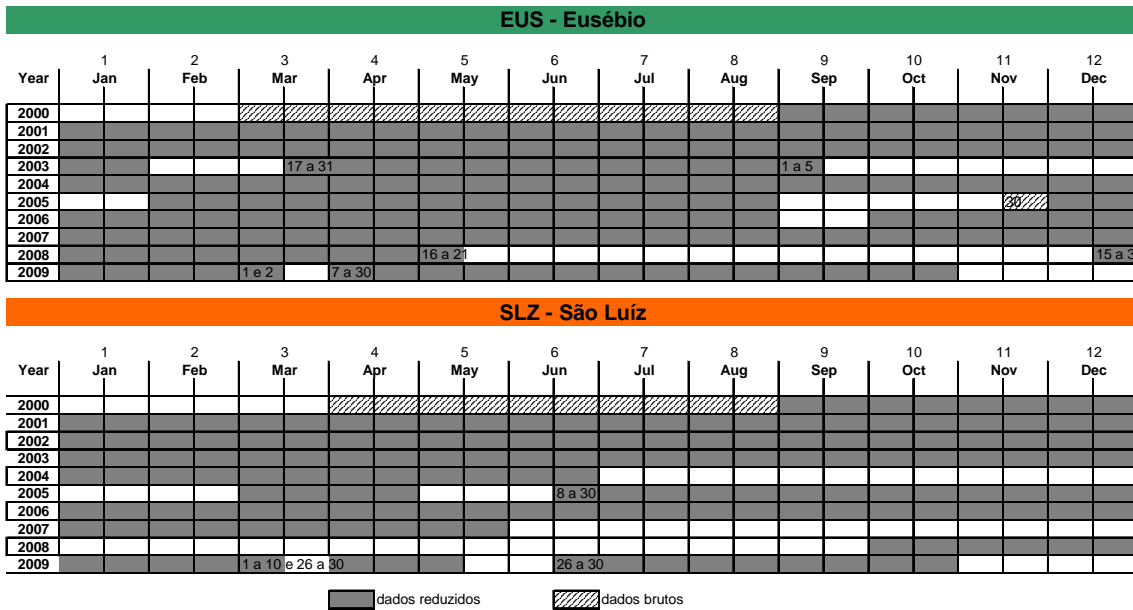


Fig. 3.11 – Tabela de dados convertidos para ASCII das estações de São Luís e Eusébio.

CAPÍTULO 4

PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo apresentamos como são identificados e utilizados os parâmetros de interesse deste trabalho. Também apresentamos como são observadas as irregularidades do EEJ e como é determinada sua velocidade nos espectrogramas. Além disso, demonstramos exemplos de CEJ observados nos dados do RESCO. Por fim, apresentamos exemplos de dados de magnetômetros coletados e processados para o período de interesse. Nesta sessão, também é discutida a qualidade e utilidade dos dados para o presente estudo.

4.1. Identificação e Utilização dos parâmetros do EEJ

4.1.1. Identificação dos Eventos de CEJ nos dados de Radar.

Através dos dados do radar RESCO, vamos identificar períodos com o evento de CEJ. Para isso, apresentamos primeiramente os dados do radar, para entendermos o EEJ. Em seguida podemos procurar por eventos de CEJ. Como já mencionado no capítulo de instrumentações, o RESCO não registra informações do EEJ. O que ele mostra são ecos retro-espalhados das irregularidades de 3 metros. O que chamamos de EEJ visto nos dados do RESCO são, na verdade, ecos espalhados pelas irregularidades de plasma. Como elas se movimentam em função do campo elétrico do EEJ, podemos assumir que as características aqui apresentadas são, de fato, do EEJ.

Tomemos como exemplo para este dia os dados coletados em 15 de fevereiro de 2006, um dia considerado normal em termos de presença de irregularidades e de perfil magnético. No Mapa RTI (figura 4.1), vemos a característica comum do EEJ.

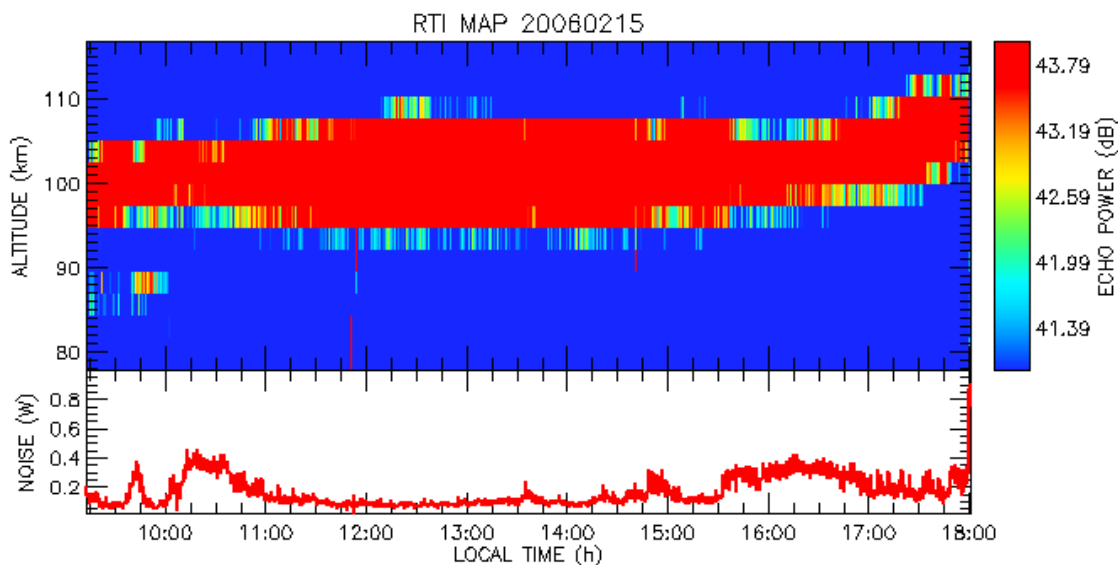


Fig. 4.1 – Mapa RTI (*Range Time Intensity*) obtido pelo radar RESCO no dia 15 de fevereiro de 2006. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.

O mapa RTI é um gráfico que mostra a amplitude de potência dos ecos refletidos nas movimentações das irregularidades de plasma em função do tempo. A intensidade (dB) do eco é medida através da barra de cores, a direita do gráfico. No painel inferior temos um gráfico de nível de ruído em função da hora. Esse ruído representa a intensidade de interferência que o sinal sofreu no percurso.

Neste mapa vemos as características do comportamento das irregularidades ionosféricas. As irregularidades se movem em função da intensidade e direção do campo elétrico produzido pelo EEJ. Logo, vemos indiretamente o comportamento do EEJ. O eletrojato tem um comportamento característico de se intensificar durante o dia, pois a corrente depende da condutividade, que é fraca ou nula à noite. A região de espalhamento do EEJ normalmente é observada pouco depois das 8 LT, com seu centro em torno de 100 a 105 km de altura. Em torno de 12 LT essa região se apresenta completamente desenvolvida e no final da tarde enfraquece. A partir das 17 LT o seu centro começa a ser deslocado verticalmente para cima e desaparece por voltas das 18:30 LT. Sua espessura tem em média 10 km, segundo nossas observações.

Cada mapa RTI é formado por uma integração em frequência de vários espectrogramas correspondentes às várias alturas. Tomemos como exemplo um espectrograma do mesmo dia utilizado anteriormente, 15/fev/2006, do feixe oeste (figura 4.2).

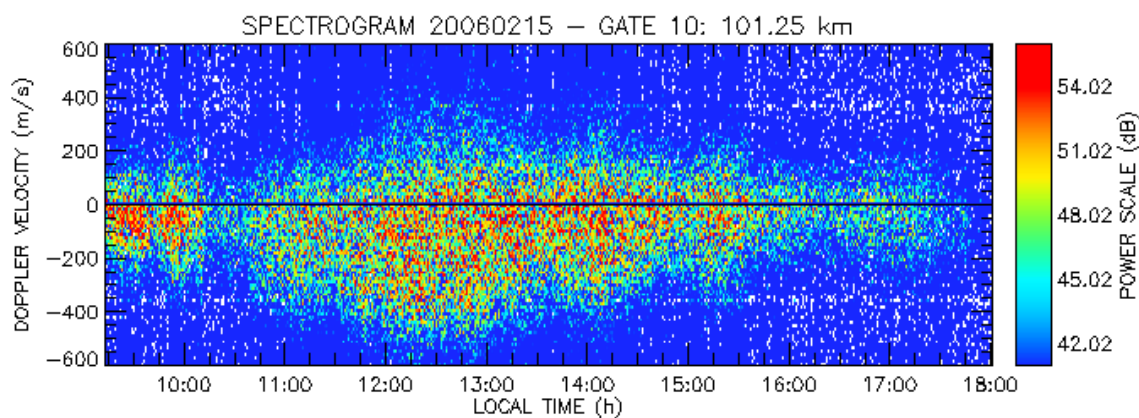


Fig. 4.2 – Espectrograma obtido pelo radar RESCO no dia 15 de fevereiro de 2006, representando o *gate* 10 – 101,25 km.

O espectrograma é um mapa de cores que apresenta a distribuição das velocidades Doppler (m/s) das irregularidades ionosféricas em função da hora local. Como mencionado, um espectrograma é gerado para cada faixa de altura que o radar RESCO sonda. O exemplo utilizado representa o *gate* de número 10, em torno de 101 km de altura. Nele vemos algumas características comuns das movimentações das irregularidades. No caso deste espectrograma, podemos ver a presença da movimentação das irregularidades a partir das 09 LT até por volta das 17 LT, tendo uma diminuição no seu aparecimento na faixa entre 10:15 e 10:45 LT. Percebemos também, que essas irregularidades estão se movimentando com velocidade Doppler negativa. Logo as irregularidades estão se afastando do radar, sendo conduzidas pelo curso normal do eletrojato equatorial diurno.

Um dia atípico, considerado neste trabalho, é quando ocorre um evento de contra eletrojato. Além de sua identificação normal em dados magnéticos, ele também pode ser observado, dentre várias maneiras, nos espectrogramas. Vejamos como exemplo o espectrograma do dia 16 de maio de 2008 (figura 4.3).

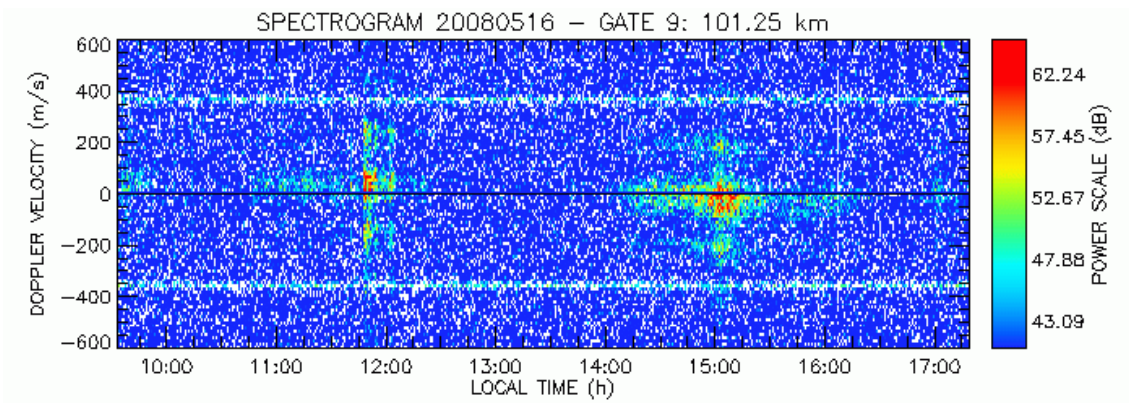


Fig. 4.3 – Espectrograma obtido pelo radar RESCO no dia 16 de maio de 2008, representando o gate 09 – 101,25 km.

Este espectrograma foi obtido pelo processamento dos dados do feixe oeste, e por definição, as velocidades Doppler correspondentes a uma condição normal de EEJ diurno deveriam ser negativas. Isso é visto na porção que aparece entre 14:15 e 15:30. Porém na porção que aparece por volta de 11:45 LT apresentam velocidade Doppler positiva. Isso indica a presença de um CEJ neste horário específico. Essa estrutura indicada como CEJ não aparece necessariamente em uma faixa específica. Para identificá-la, vamos analisar um mapa RTI comparando os *Gates* que apresentam a presença desses eventos.

O conjunto de dados do radar selecionados para este estudo, foi classificado, por tanto, de acordo com o aparecimento de um contra eletrojato equatorial. Entre os dias que o radar operou, houve 13 dias em que supostamente observamos o evento de CEJ. Em 2007 foram selecionados os dias 13 e 19 de dezembro. No ano de 2008, foram escolhidos os dias, 16 e 21 de maio, 09 e 18 de junho, 18 de agosto, 30 de setembro, 11 de novembro e 16 e 26 de dezembro. Em 2009, as datas onde ocorreu o aparecimento do CEJ foram: 21 de janeiro, 20 de agosto. Ao final, é importante ressaltar que este conjunto de dias foi selecionado num universo de 139 dias, cobrindo do final de 2007 até o fim de 2009.

4.1.2. Análise dos Parâmetros do CEJ nos dados do radar RESCO

Nesta seção, vamos apresentar a análise do dia 19 de dezembro de 2007, como exemplo de um evento de CEJ para ilustração do método. A nossa análise começa com a classificação do índice de perturbação magnética Dst (figura 4.4).

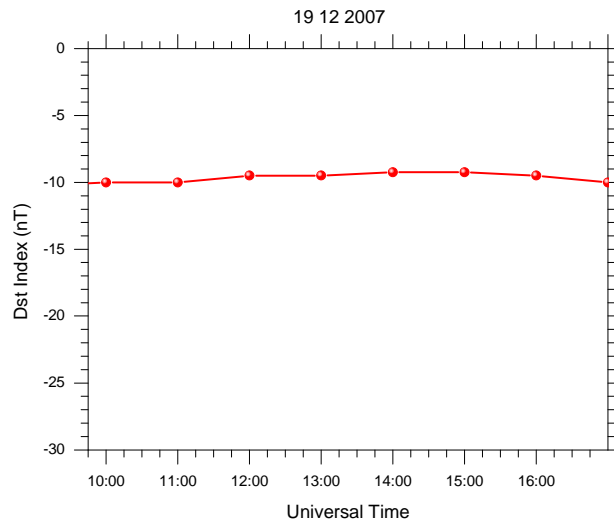


Fig. 4.4 – Variação da perturbação magnética de acordo com o Índice Dst em função das horas do dia, medido a cada hora.

Este gráfico mostra a intensidade de perturbação magnética de acordo com o Índice Dst ao longo do dia, medido a cada hora. A partir deste gráfico podemos classificar os dias selecionados de acordo com a média do índice Dst.

O próximo passo é analisar os dados provenientes do radar RESCO. Para isso, temos o mapa RTI mostrado na figura 4.5.

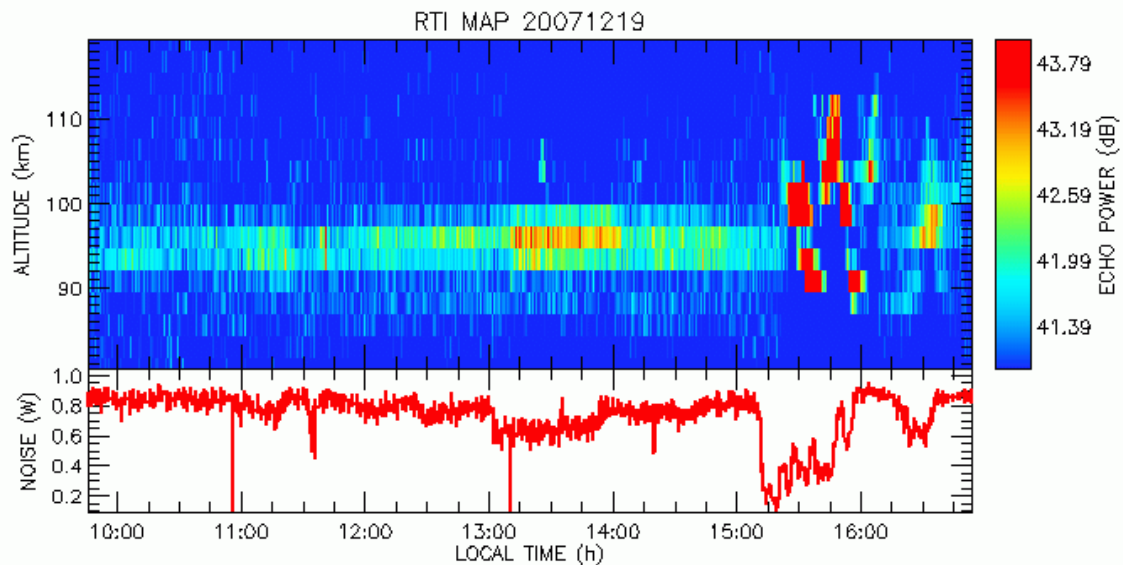


Fig. 4.5 – Mapa RTI (*Range Time Intensity*) obtido pelo radar RESCO no dia 19 de dezembro de 2007. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.

Este gráfico mostra a altura dos ecos retro-espalhados das irregularidades ionosféricas (painel superior) e o nível de ruído captado pelo radar (painel inferior), ambos em função da hora do dia. Neste gráfico vemos a presença de irregularidades que representam o EEJ em todo o tempo que o radar operou. Porém, mostrado mais fraco que o normal. Deste mapa RTI retiramos algumas características: o horário em que o radar RESCO iniciou a sua operação, o horário que o radar foi desligado, o horário em que a irregularidade começou a ser capturada, o horário em que deixou de ser capturada e a altura média do centro das irregularidades.

Já no mapa montado por espectrogramas dessa mesma data (figura 4.6) vemos algumas estruturas diferenciadas.

O mapa abaixo, mostra a variação da velocidade Doppler da irregularidade em função da hora do dia. Ele é separado for faixas de alturas específicas. Este mapa de espectrogramas cobre a faixa de 88 a 111 km, referente aos Gates 4 a 13. Ele mostra um conjunto de irregularidades se movimentando positivamente (se aproximando do radar) e negativamente (se afastando do radar). Como já dito anteriormente, é nesta parte da análise em que verificamos a presença de CEJ. Neste conjunto de espectrogramas retiramos as seguinte informações sobre as irregularidades: a direção em que ela se movimenta, o horário de aparecimento da irregularidade, a altura mais baixa e a mais alta que cada grupo de irregularidades atinge e o horário de desaparecimento das irregularidades.

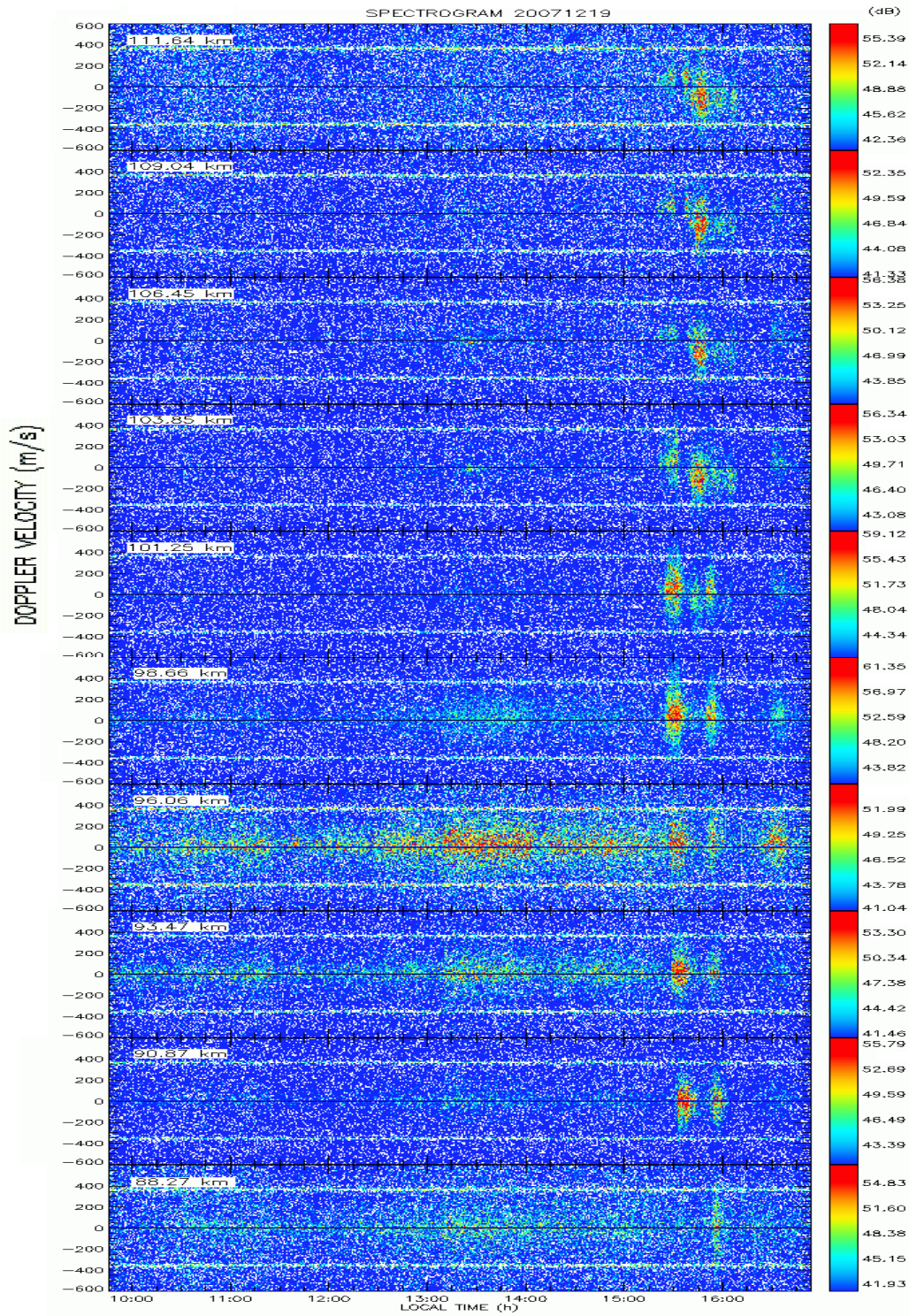


Fig. 4.6 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO no dia 19 de dezembro de 2007. Cada painel representa uma altura cobrindo um total de 88 até 111 km de altura.

4.2. Análise Espectral

Uma maneira de observar a influência da atmosfera neutra no EEJ é utilizando dados de ventos neutros (SATO, 1975). Existem diversas análises utilizando dados de ventos como, por exemplo, com radar meteorológico (LIMA et al., 2005). Como não temos dados da atmosfera neutra, nós utilizaremos uma análise de ondeleta dos parâmetros de dados do RTI, como o EJC e o EJT. O centro médio da região de retro-espalhamento do EEJ (EJC) é obtido da estimação de parâmetros da curva de potência da gaussiana. O parâmetro EJT é definido como a espessura do perfil de potência retro-espalhada quando a potência do sinal cai à metade do seu valor máximo.

Utilizando parâmetros do RTI como um indicativo do campo elétrico EEJ e usando a transformação de ondeleta contínua, é possível buscar oscilações do tipo de ondas que poderiam levar a uma indicação de cisalhamento do vento. A Transformada de Ondeleta foi escolhida devido à sua capacidade de localizar no tempo as oscilações, o que nos permite verificar se o seu tempo de ocorrência coincide com o momento da ocorrência do CEJ. Na verdade, a transformada de ondeleta contínua (CWT) de uma sequência de amostra discreta (x_n) é definida como a convolução das amostras com uma escala e versão traduzida da ondeleta-mãe. Entretanto, pode ser tratada como a transformação inversa de Fourier do produto no domínio da frequência, como proposto por (TORRENCE e COMPO, 1998):

$$W_n(s) = (2\pi s / \delta t) \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\psi}_0^*(s\omega_k) e^{[i\omega_k n \delta t]}, \quad (4.1)$$

onde s é a escala da ondeleta, k é o índice de frequência, δt é o tempo de resolução, N é o número total de pontos, x é a transformada de Fourier da série temporal, a frequência angular (ω_k) é definido como $+ 2\pi k / N\delta t$ quando $k \leq N/2$ e $- 2\pi k / N\delta t$ quando $k > N/2$, e $\hat{\psi}_0^*(s\omega_k)$ é o complexo conjugado da ondeleta-mãe. Usamos ondeleta-mãe Morlet, a qual é uma onda plana modulada por um envelope gaussiano de largura por unidade (FARGE, 1992) dada por:

$$\hat{\psi}_0(s\omega_k) = \pi^{-1/4} H(\omega) e^{[-(s\omega - \omega_0)^2 / 2]}, \quad (4.2)$$

pois ela é o tipo apropriado para pesquisar periodicidades nos conjuntos de dados. A função Heaviside $H(\omega)$ é igual a 0 para frequências negativas (ω) e igual a 1 para as outras. Finalmente, a densidade de energia de escala de espaço de uma série temporal é definida como:

$$E_n(s) = |W_n(s)|^2 / s. \quad (4.3)$$

Por meio destes cálculos, chegamos a um gráfico final mostrando as periodicidades e oscilações EJC e EJT. As análises destes gráficos serão apresentadas no capítulo 5, nos resultados.

As Figuras 4.7 e 4.8 representam a transformada de ondeleta da variação da altura média do centro das irregularidades (EJC) e a variação da espessura das irregularidades (EJT), respectivamente.

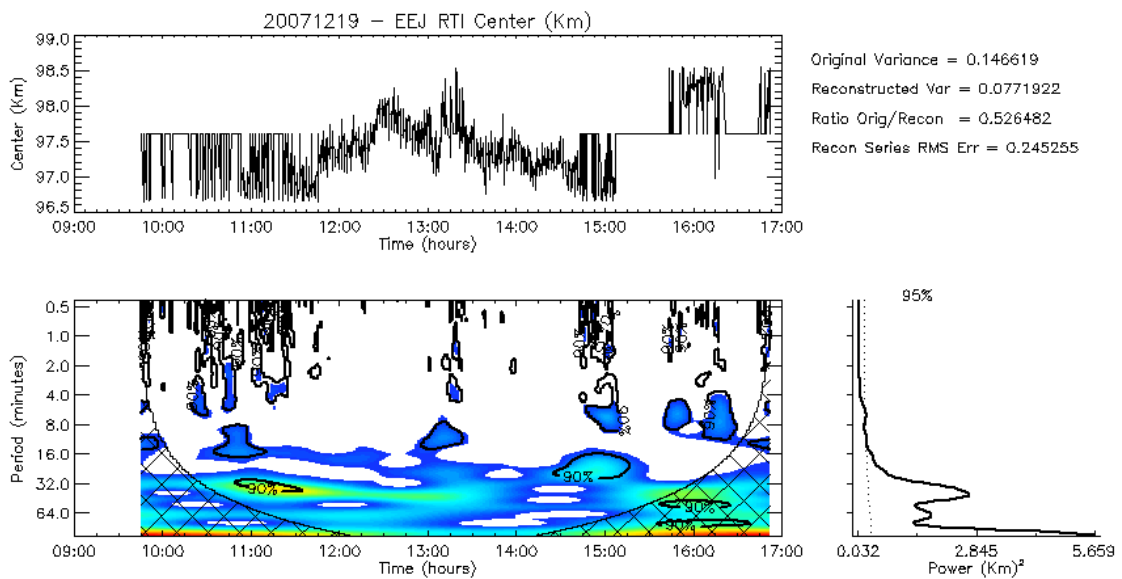


Fig. 4.7 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJC, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da altura do centro médio das irregularidades retro-espalhadas.

A Figura 4.7 mostra a variação da altura do centro das irregularidades (painel superior). No painel inferior, podemos ver um mapa com as periodicidades dominantes em função das horas do dia, relacionadas à variação da altura do centro das irregularidades. Neste gráfico vemos importantes características como: horário de aparecimento de cada oscilação, horário de desaparecimento da oscilação e a periodicidade que ela apresenta.

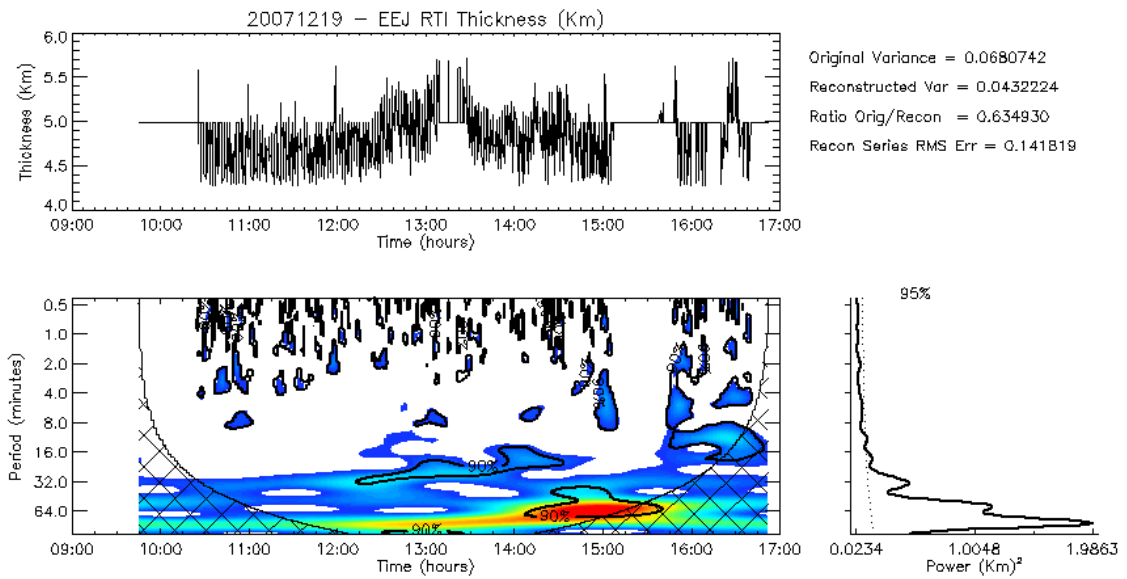


Fig. 4.8–Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJT, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da espessura das irregularidades retro-espalhadas.

A Figura 4.8 mostra a variação da espessura das irregularidades (painel superior). No painel inferior, podemos ver um mapa com as periodicidades dominantes em função das horas do dia, relacionadas à variação da largura das bordas das irregularidades. Assim como no gráfico do EJC, analisamos características como: horário de aparecimento de cada oscilação, horário de desaparecimento da oscilação e a periodicidade que a espessura das irregularidades apresenta.

Em todas as análises da transformada de ondeleta, temos que ter em mente que a variação das cores é relativa para cada mapa em específico. Podemos perceber que a escala de cores vai do vermelho (maior potência) ao azul (menor potência). A região de cor branca não temos oscilações ou temos oscilações que estão fora da faixa de pesquisa. Na nossa análise não estamos interessados no valor representado pela cor mostrada, mas apenas com a identificação da oscilação e sua faixa temporal, por isso não foram colocadas as escalas de cores nos mapas espectrais.

Para ambas as análises dos parâmetros acima citados, temos que deixar claro que não podemos afirmar que essas oscilações são de fato uma onda atmosférica. Toda a teoria apresentada sobre ondas atmosféricas no capítulo 2 é válida para ondas evanescentes (ondas propagantes). Contudo, utilizando esta técnica, nós não temos conhecimento do período intrínseco da onda, logo não podemos afirmar a sua presença. Nestas análises, o

período observado é o período aparente das oscilações. Com isso, fica claro que não estamos procurando ondas propagantes e sim oscilações que tenham periodicidades compatíveis com ondas de gravidade. Portanto, para analisar uma onda evanescente precisaríamos de uma melhor revisão bibliográfica da diferenciação entre ondas evanescentes e não evanescentes, outros parâmetros de análises de influência de background e utilização de instrumentos ópticos para a análise dessas ondas.

4.4. Sumário do Processamento de cada evento de CEJ

Ao final de todos os processamentos e análises, todos os parâmetros comentados acima estão distribuídos em um formulário, como no exemplo mostrado abaixo:

Data: 19 de dezembro de 2007

Início de Operação: 09:50

Fim de Operação: 17:00

Variação do Dst: -10 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	09:50	15:15	95 km
2	15:30	16:10	100 km **
3	16:20	16:45	98 km

2) Comportamento no Espectrograma:

	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	10:00	15:15	93 km	96 km	positivo
2	15:20	15:40	90 km	101 km	Positivo
3	15:40	16:00	88 km	101 km	positivo
4	15:40	15:50	103 km	108 km	negativo
5	16:20	16:40	96 km	98 km	positivo

3) Ondeleta:

	Início:	Término:	Período (min.):
EJC	10:45	11:35	32
	14:15	15:15	16 e 32
EJT	12:10	14:30	16 e 32
	14:00	15:40	64 *

* afetado pelo cone de influência.

** apresenta oscilações (90km a 103km).

A mesma análise mostrada acima foi feita em cada dia selecionado. Os gráficos e tabelas de todos os dias selecionados foram colocados como Apêndice a esta dissertação. Com

esses parâmetros apresentados, foi feito um estudo estatístico para podermos entender a climatologia do CEJ e dos eventos que acontecem nos dias relacionados. Este estudo está apresentado no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

ESTUDO ESTATÍSTICO E ANÁLISE DE CASOS SELECIONADOS

Neste capítulo apresentamos os resultados da análise estatística realizada sobre os eventos de CEJ observados nos dados do RESCO. Em seguida, três casos especiais são analisados em detalhes, representando o conjunto de eventos observados.

5.1. Estudos Estatísticos

Aplicando a metodologia apresentada nos capítulos anteriores para todos os dias selecionados neste estudo, podemos evidenciar algumas características mais relevantes sobre o estudo da correlação entre a ocorrência do CEJ e o aparecimento de oscilações de pequena escala compatíveis com ondas de gravidade. Algumas das características observadas foram:

1. Caracterização do dia:
 - a. com relação à perturbação magnética;
 - b. com relação às condições da região de Espalhamento do EEJ (mapa RTI e Espectrogramas);
 - hora de início e fim da operação do radar RESCO;
 - altura de centro das irregularidades nos mapas RTI;
 - altura de início e fim das irregularidades nos mapas RTI;
 - período de duração das irregularidades no mapa RTI;
 - hora de início e fim do aparecimento das irregularidades no Espectrograma;
 - período de duração das irregularidades no Espectrograma;
 - altura inicial e final das irregularidades nos Espectrogramas;
 - variação vertical das irregularidades nos Espectrogramas;

2. Características dos Eventos de CEJ:

variação mensal do CEJ;

horário de início do CEJ;

período de duração do CEJ;

altura de aparecimento do CEJ; e

variação vertical do aparecimento do CEJ.

3. Características das oscilações:

hora de início e fim do aparecimento de oscilações na transformada de ondeleta do EJC;

período de duração das oscilações do EJC;

periodicidade da oscilação do EJC;

hora de início e fim do aparecimento de oscilações na transformada de ondeleta do EJT;

período de duração das oscilações do EJT;

periodicidade da oscilação do EJT;

Essas características estão apresentadas na forma de um simples estudo estatístico abaixo, na mesma estrutura mostrada acima:

1. Caracterização do dia:

a. Com relação à perturbação magnética:

O histograma da figura 5.1 mostra a relação de eventos de CEJ com a intensidade de perturbação magnética.

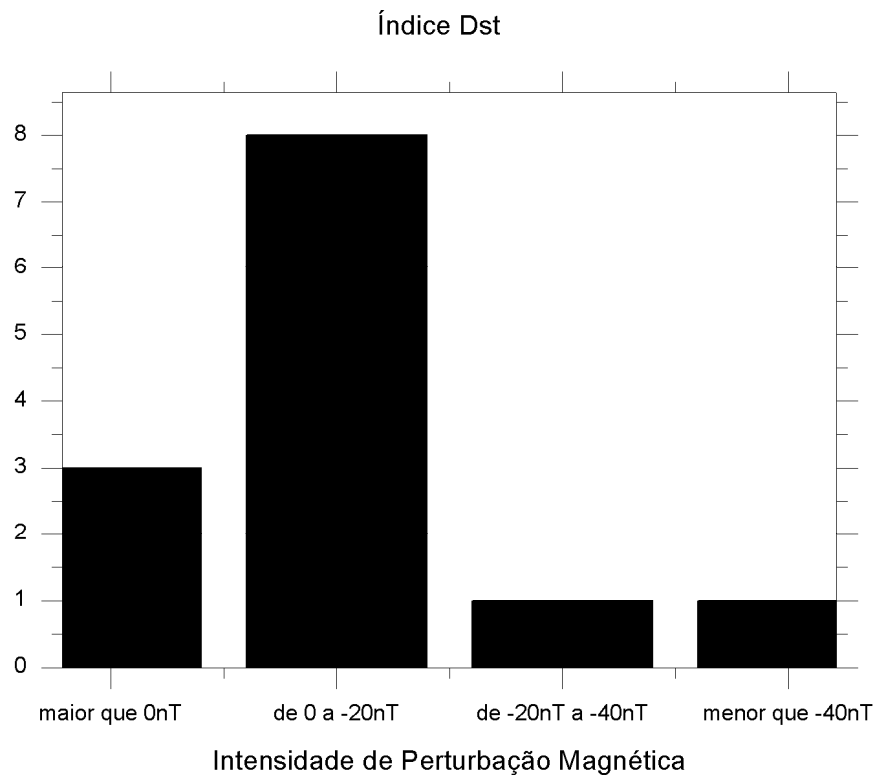


Fig. 5.1 – Histograma que mostra a ocorrência de eventos de CEJ em função da faixa de intensidade de perturbação magnética.

O histograma da Figura 5.1 mostra a quantidade de eventos de CEJ em função da perturbação magnética, de acordo com o Índice Dst. Podemos ver que a maioria dos casos registrados ocorreu em um grau de perturbação considerado fraco (0 a -20 nT). Uma justificativa seria a de que o ambiente precisaria ser levemente modificado, pois se o mesmo se mantiver calmo, o EEJ se mantém em condições normais. Se o ambiente apresentar uma perturbação muito alta as correntes do dínamo perturbado dão condições para o evento de CEJ não acontecer.

b. Com relação às condições do dia:

A partir do mapa RTI, resultado do radar RESCO, podemos obter informações de tempo de operação (Figura 5.2) e aparecimento de irregularidades (Figura 5.3). Sempre importante lembrar que, neste trabalho, o termo horas refere-se à hora oficial de Brasília sendo, portanto, hora local.

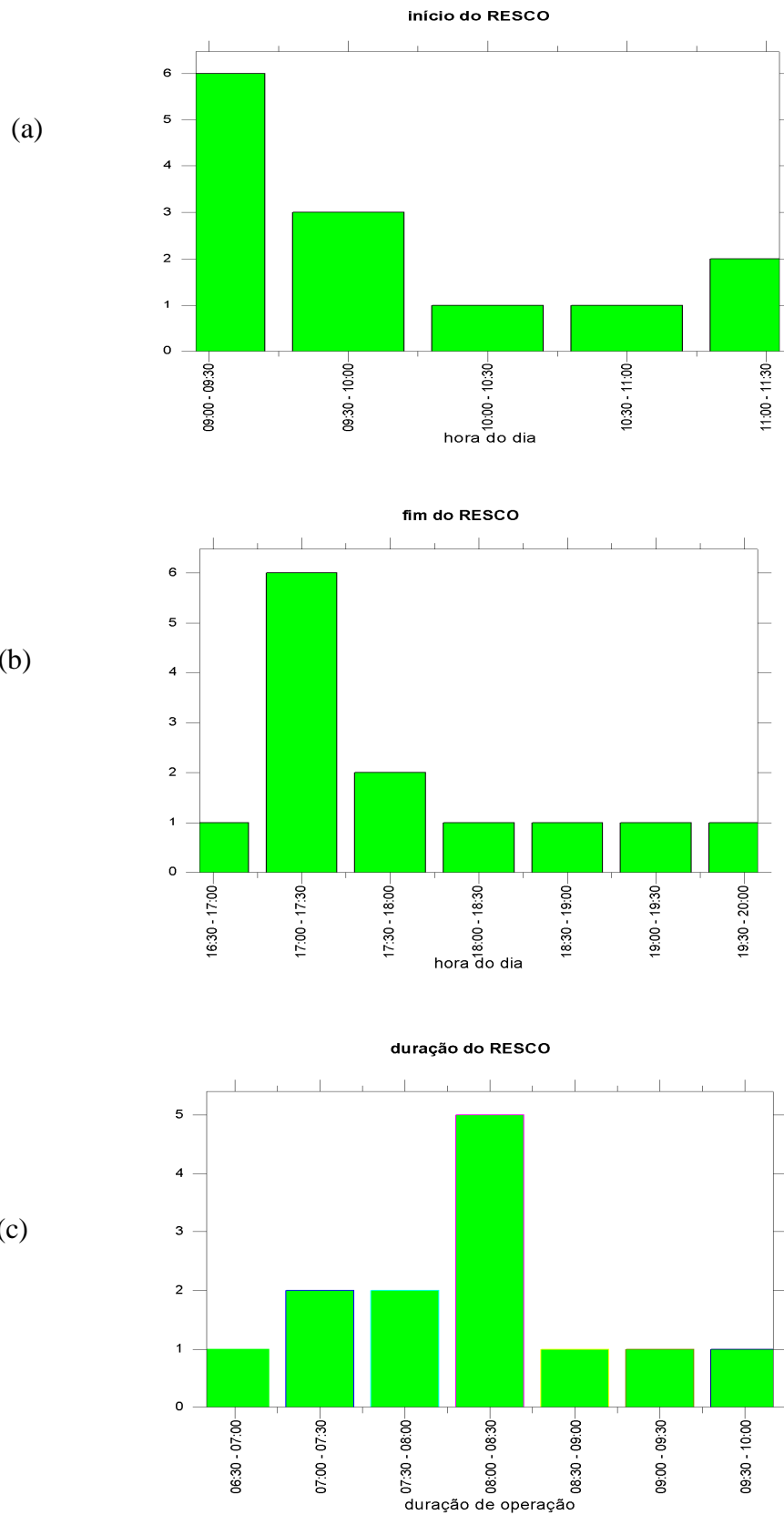


Fig. 5.2 – Conjunto de Histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início de operação do radar RESCO; (b) estatística da hora de término de operação do radar RESCO; e (c) estatística do período de duração do funcionamento do radar RESCO.

Os histogramas da Figura 5.2 mostram que o período de duração da operação do radar RESCO (horário final - inicial), na maioria dos dias analisados oscila entre 08:00 e 08:30 horas, iniciando entre 09: e 09:30 horas e sendo desligado por volta de 17:00 a 17:30 horas.

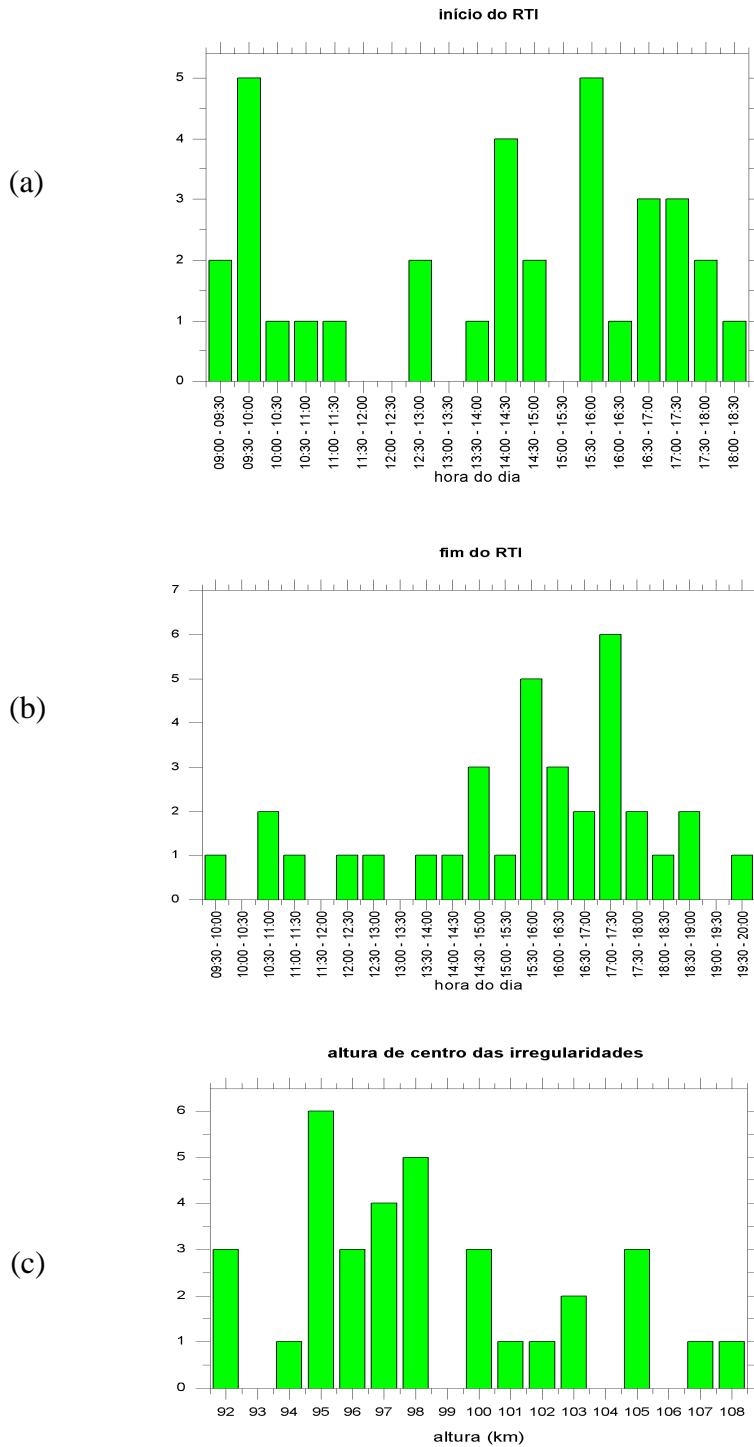


Fig. 5.3 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do aparecimento das irregularidades no mapa RTI; (b) estatística da hora de término do aparecimento das irregularidades no mapa RTI; e (c) estatística da altura do centro da irregularidade no mapa RTI.

Denardini et al. (2007), mostraram que a altura média do centro das irregularidades tem diminuído com o passar dos anos. Eles registraram uma altura média de 105 km. Nos gráficos da Figura 5.3, podemos evidenciar isso, tendo em vista que a altura do centro médio das irregularidades se concentra em regiões entre 95 e 98 km de altura. Elas costumam aparecer no período da manhã, entre 09:00 e 09:30, e no período da tarde, entre 14:30 e 16:00. Vemos também que existe uma tendência grande a desaparecer entre 15:30 e 18:00.

Já nos dados obtidos a partir do mapa de espectrogramas, podemos retirar algumas características, como a duração das irregularidades (Figura 5.4) e a variação vertical em que elas aparecem (Figura 5.5).

Nestes gráficos da Figura 5.4 podemos perceber que a hora de início do aparecimento das irregularidades é bem distribuída ao longo do dia, porém os desaparecimentos das irregularidades estão concentrados no período da tarde, entre 15:30 e 16:00 e entre 17:00 e 17:30. Na maioria dos casos, as irregularidades têm uma duração de 20 a 40 minutos, como visto no gráfico estatístico acima. Já a Figura 5.5 mostra a variação vertical dessas irregularidades.

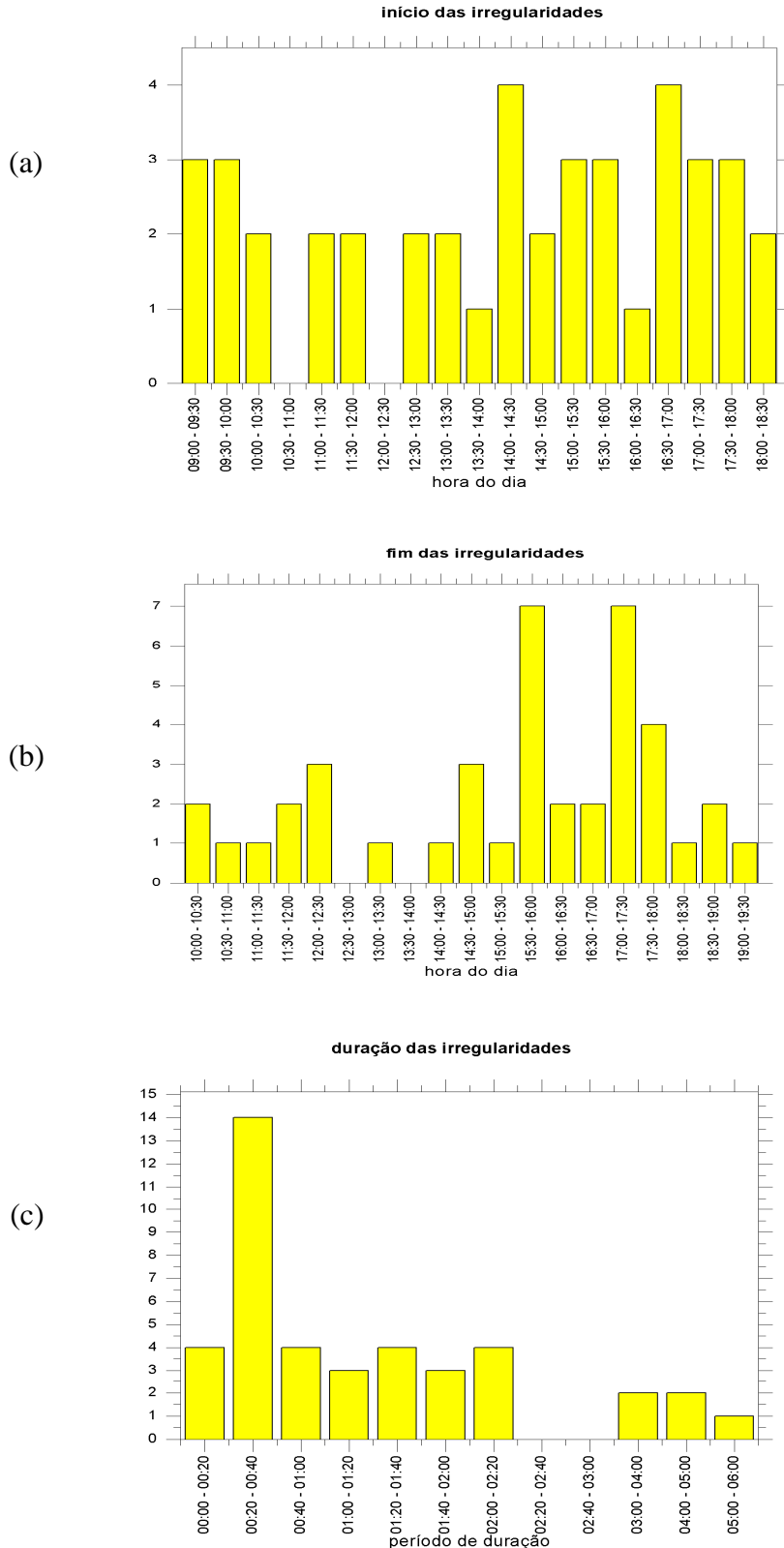


Fig. 5.4 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do aparecimento das irregularidades nos Espectrogramas; (b) estatística da hora de término do aparecimento das irregularidades nos Espectrogramas; e (c) estatística do tempo de duração das irregularidades nos Espectrogramas.

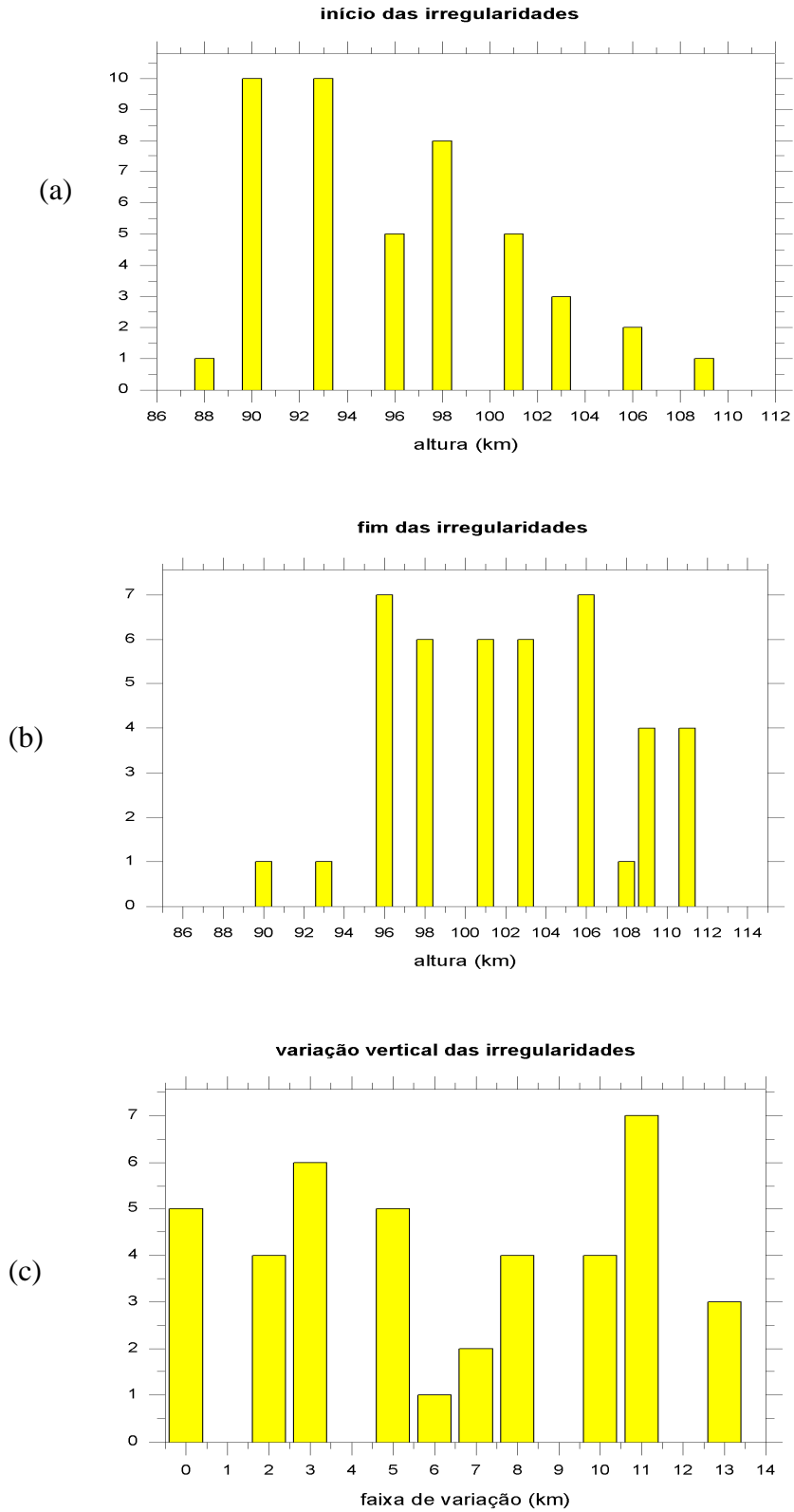


Fig. 5.5 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da altura inicial do aparecimento das irregularidades nos Espectrogramas; (b) estatística da altura final do aparecimento das irregularidades nos Espectrogramas; e (c) estatística da faixa vertical de duração das irregularidades nos Espectrogramas.

No gráfico (a) da Figura 5.5 podemos perceber que a altura inicial das irregularidades retro-espalhadas tem aparecido na região mais baixa do EEJ, entre 90 e 98 km de altura. No gráfico (b) é possível notar na maioria dos casos, que o desaparecimento das irregularidades ocorre entre 96 e 106 km de altura. No gráfico (c), apesar de ter uma distribuição mais homogênea de variação vertical, podemos ver que existem alguns casos de duração de 10, 11 e 13 km.

Por fim, podemos perceber que a maioria dos ecos captados estão entre 09:00 e 09:30, e no período da tarde, entre 14:30 e 16:00. A altura inicial (borda inferior) das irregularidades são vistas entre 90 e 98 km de altura. A porção superior das irregularidades termina entre 96 e 106 km de altura, mostrando que a variação vertical tem uma distribuição homogênea.

2. Características dos eventos de CEJ:

Após essa visualização geral dos dias em que houve eventos relacionados à CEJ, vamos analisar apenas o período em que as irregularidades produzem ecos retro-espalhados que permitam identificar condição de CEJ. A seguir, na Figura 5.6 podemos ver a variação mensal do aparecimento dos CEJ.

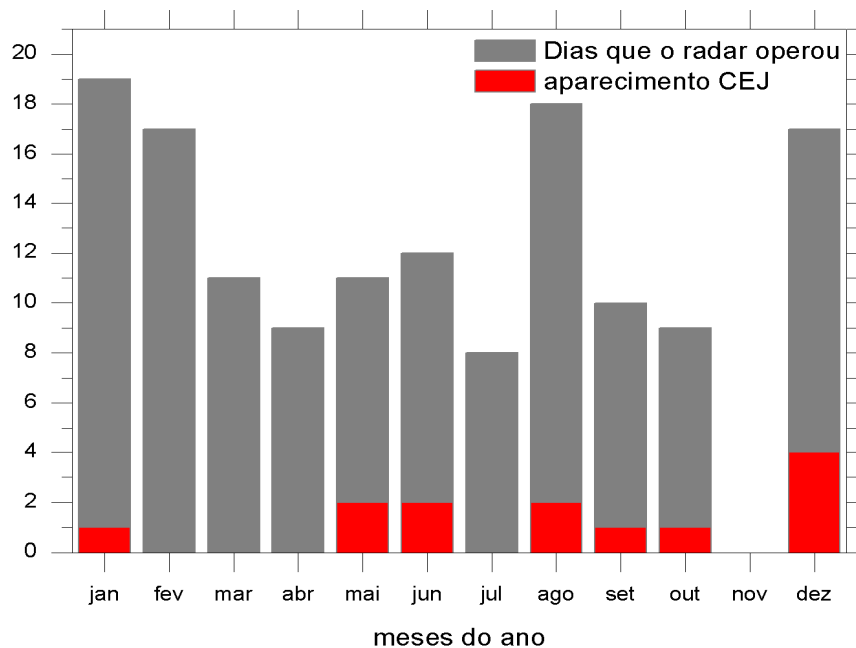


Fig. 5.6 – Histograma mostrando a estatística de aparecimento do CEJ em relação à distribuição anual (vermelho), em relação ao número de dias que o radar operou (cinza).

No histograma da Figura 5.6, é possível ver a relação entre o número de dias em que o radar operou (cinza) e os dias em que ocorreram eventos de CEJ (vermelho). Com isto, podemos evidenciar que nos meses D (novembro, dezembro, janeiro e fevereiro) e nos meses J (maio, junho, julho e agosto) ocorrem mais eventos do que nos meses E (março, abril, setembro e outubro). Levando em consideração que temos um baixo índice de dados analisados, não podemos sustentar esta afirmação. Porém, esta observação concorda com os resultados Mayaud (1977), os quais são baseados em dados de magnetômetro e são mostrados na seção do CEJ.

Com os gráficos da Figura 5.7 podemos identificar o horário em que e o CEJ inicia e a sua duração.

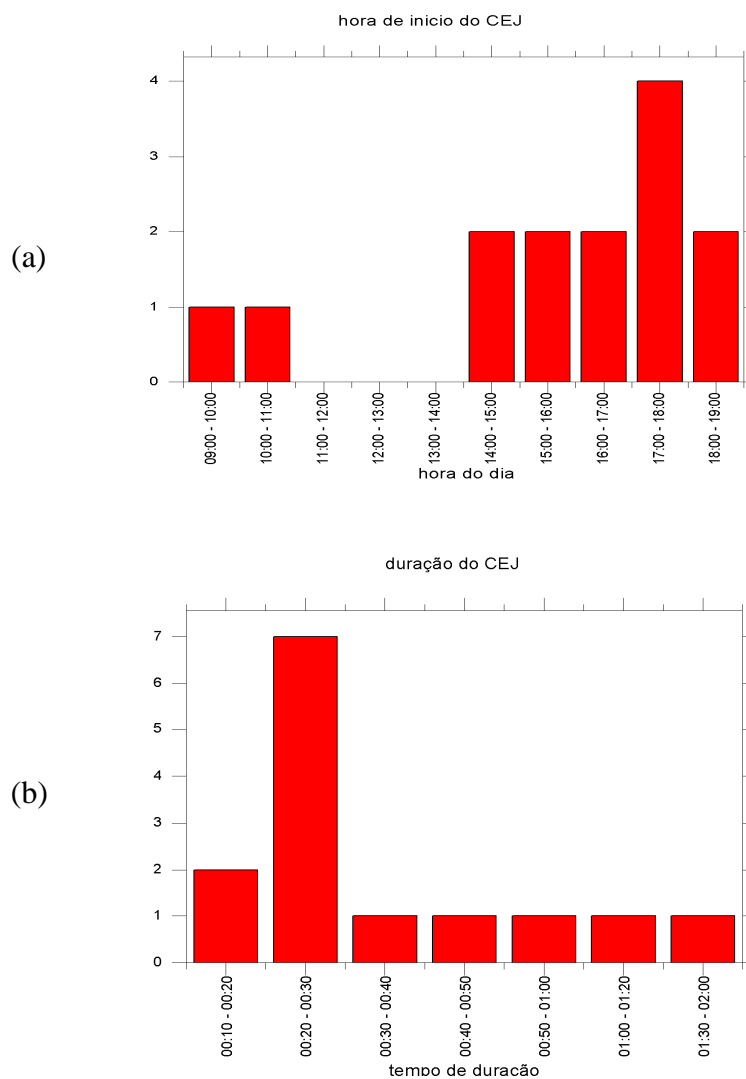


Fig. 5.7 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do CEJ; e (b) estatística da duração do CEJ (período final - inicial).

A Figura 5.7 apresenta a estatística do horário de início do CEJ. Nela podemos ver que a maioria dos casos ocorre no período da tarde, entre 14:00 e 19:00. A maioria dos CEJ têm um aparecimento rápido, com duração menor que 30 minutos. Isso é visto na estatística do CEJ, onde vemos que mais de 60% dos casos estão entre 10 e 30 minutos.

Nos gráficos da Figura 5.8 podemos ver a altura inicial do CEJ e a sua variação vertical do CEJ.

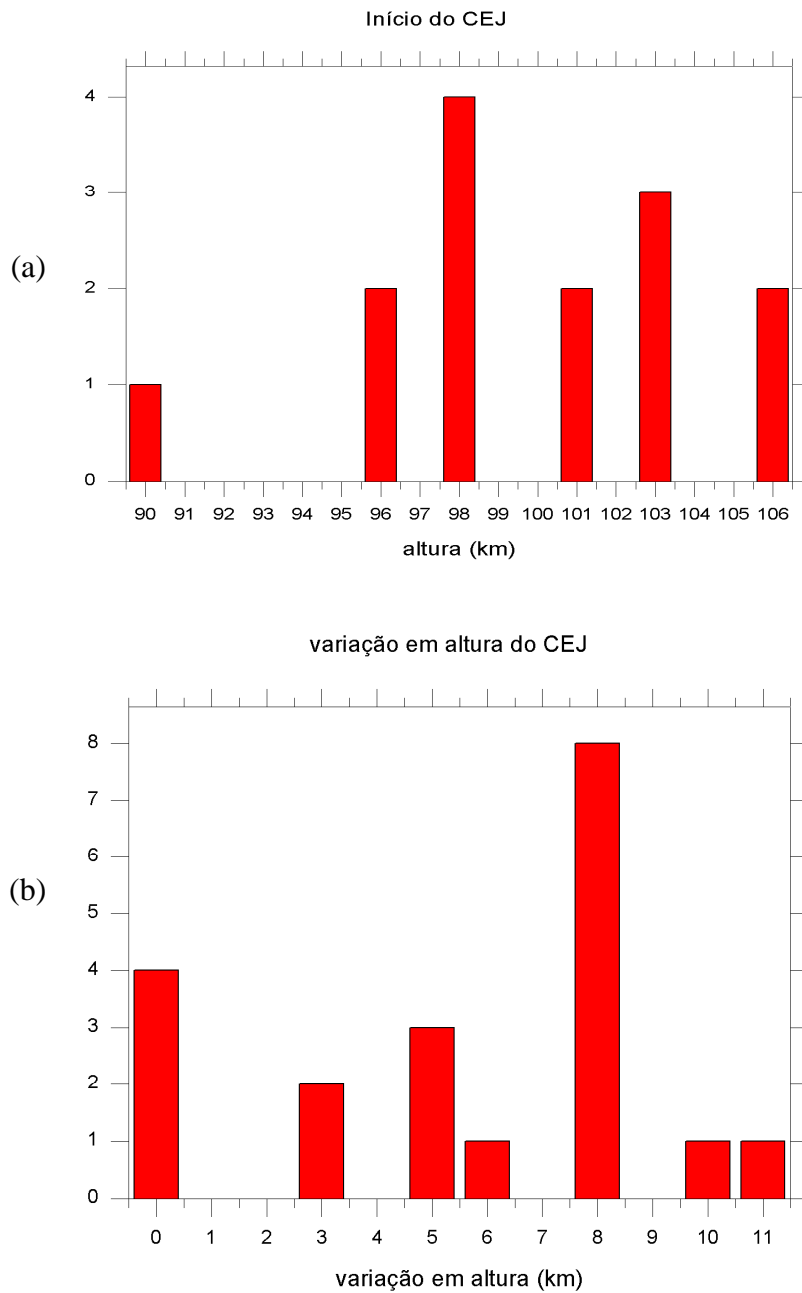


Fig. 5.8 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da faixa de altura em que CEJ aparece no espectrograma; e (b) estatística da variação vertical do CEJ mostrado no espectrograma.

Na Figura 5.8 é mostrado um histograma com a quantidade de eventos de CEJ registrados distribuídos em relação à altura inicial em que a irregularidade apareceu no espectrograma. Com isso podemos identificar a faixa inicial de altura que o CEJ abrange desde 96 até 103 km. O segundo gráfico mostra a variação vertical da irregularidade do CEJ, ou seja, altura final – inicial. Com esse gráfico podemos ver que, na grande maioria, a extensão vertical obtida foi de 8 km. Essa maioria representa 40% das amostras obtidas. O segundo pico expressivo de amostras, representando 20% dos casos, mostra que o CEJ ocorreu em apenas uma faixa de altura do espectrograma. Nesta análise existem 2 casos específicos que estão representados pelas ocorrências de CEJ na altura inicial de 106 km, na Figura 5.8 (a) e ocorrem a partir das 18:00, vistas na Figura 5.7 (a). Na verdade esse fenômeno é devido ao pôr-do-sol (*Sunset*). Um destes casos será abordado com mais detalhes no tópico de estudo de caso.

Contudo, concluímos que nos meses D e J ocorrem mais eventos do que nos meses E. A maioria dos eventos ocorreu no período da tarde, entre 14:00 e 19:00. Mais de 60% dos CEJ analisados tem um aparecimento rápido, com duração entre 10 e 30 minutos.

3. Características das oscilações:

Para analisar os períodos de oscilação nos parâmetros EJC e EJT, temos as Figuras 5.9 e 5.10.

Na Figura 5.9 podemos perceber uma distribuição estatística homogênea no horário de início das oscilações do EJC. Essa distribuição segue de 10:30 a 16:30, tendo um pico máximo entre 13:30 e 14:00. Já no horário de término dessas oscilações, vemos também uma distribuição quase homogênea, porém com alguns máximos. Sua distribuição segue de 11:00 até as 17:00, com máximos entre 12:30 e 13:00, 14:00 e 14:30, 16:00 e 17:00. As amostras de duração das oscilações do EJC apresentam uma distribuição similar a uma gaussiana, com o centro entre 40 minutos e 1 hora. No último gráfico podemos perceber que a periodicidade dessas oscilações vistas nos mapas resultantes da análise de ondeleta de EJC é centrada entre 8 minutos e 16 minutos, porém com uma distribuição mais espalhada, tendo vários casos de períodos entre 4 e 8 minutos e casos com períodos de 64 minutos.

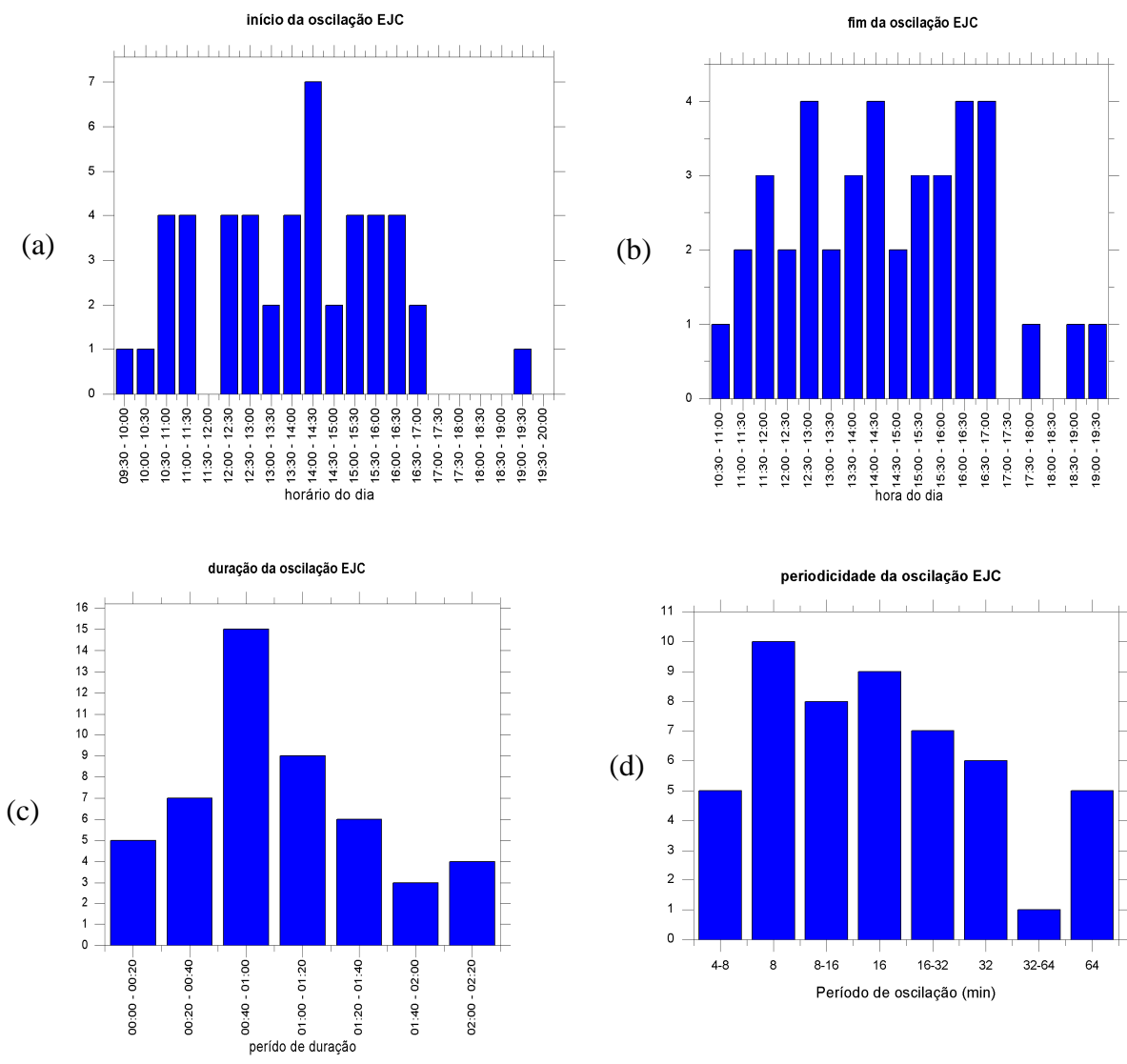


Fig. 5.9 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do aparecimento das oscilações da ondeleta_EJC; (b) estatística da hora de término do aparecimento das oscilações da ondeleta_EJC; (c) estatística do tempo de duração das oscilações da ondeleta_EJC; e (d) estatística da periodicidade das oscilações da ondeleta_EJC.

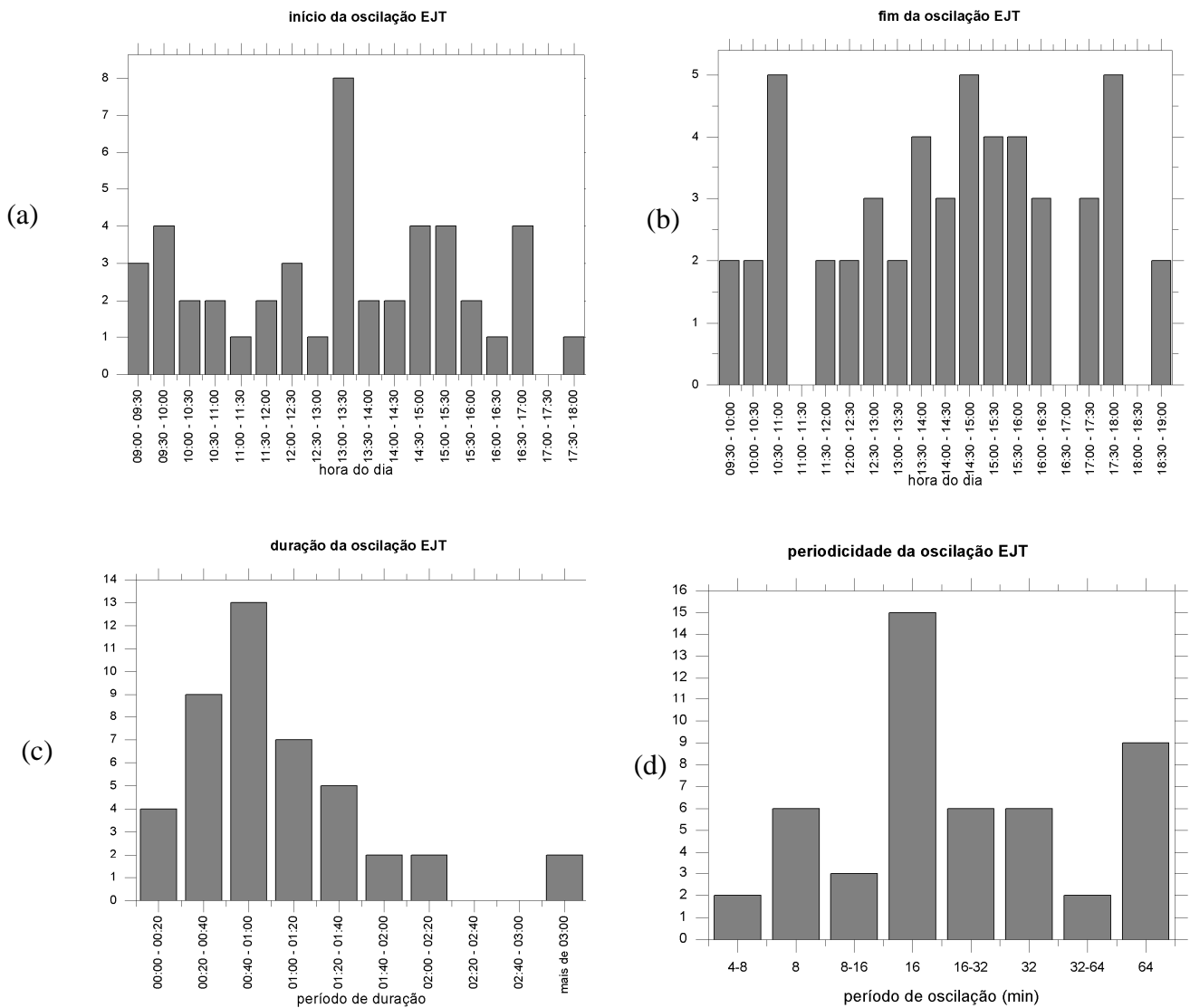


Fig. 5.10 – Conjunto de histogramas mostrando: (a) estatística da hora de início do aparecimento das oscilações da ondeleta_EJT; (b) estatística da hora de término do aparecimento das oscilações da ondeleta_EJT; (c) estatística do tempo de duração das oscilações da ondeleta_EJT; e (d) estatística da periodicidade das oscilações da ondeleta_EJT.

Nos gráficos da Figura 5.10, podemos ver que, assim como nos resultados da análise da ondeleta do EJC, este resultado para o ECT mostra que o início das oscilações referente à espessura das regiões de espalhamento também não segue um padrão ao longo do dia. Podemos ver que no período da manhã ocorreram alguns casos de oscilação, mas próximo ao meio dia local esse surgimento de oscilações fica menos expressivo. À tarde, a partir das 13:00 podemos perceber que voltam a surgir às oscilações, até próximo das 17:00, mostrando um pico bem intensificado entre 13:00 e 13:30. Já o horário de término

dessas oscilações é visto bem distribuído no período da tarde, entre 14:30 e 18:00. Podemos ver neste mesmo gráfico uma grande porção dos casos em que o término da oscilação varia entre 10:30 e 11:00.

Assim como mostrado nas estatísticas de oscilações do EJC, podemos ver as oscilações do EJT manterem uma distribuição de tempo de duração com o pico máximo entre 40 minutos e 1 hora. Já no quesito periodicidade, podemos ver que os períodos predominantes de oscilação são de 16 minutos e 64 minutos.

Portanto, através da análise de oscilações podemos concluir que elas não seguem um padrão ao longo do dia, apresentando uma distribuição homogênea para ambos os parâmetros. Na maioria dos casos, as oscilações duram entre 40 minutos e 1 hora. A periodicidade dominante no parâmetro EJC é centrada entre 8 minutos e 16 minutos, porém com uma distribuição mais espalhada, enquanto no parâmetro EJT os períodos predominantes de oscilação são de 16 minutos e 64 minutos. Cabe ressaltar que o parâmetro EJC é muito importante na tentativa de detectar oscilações na região do EEJ, assim como o parâmetro EJT. Com o EJC pudemos perceber ondas que podem ser causadoras de flutuações na região ionosférica. Porém, com o parâmetro EJT foi possível destacar que as flutuações vistas nos mapas RTI e nos espectrogramas podem ser influenciadas por ondas. Segundo o nosso estudo, este é o parâmetro mais indicado para fazer essa correlação.

5.2. Estudo de Casos

Foram selecionados três casos específicos para uma análise mais detalhada. Os dias escolhidos foram 16 de dezembro de 2008, 19 de dezembro de 2007 e 11 de outubro de 2008 e serão apresentados nesta seção.

5.2.1. Dia 16 de dezembro de 2008

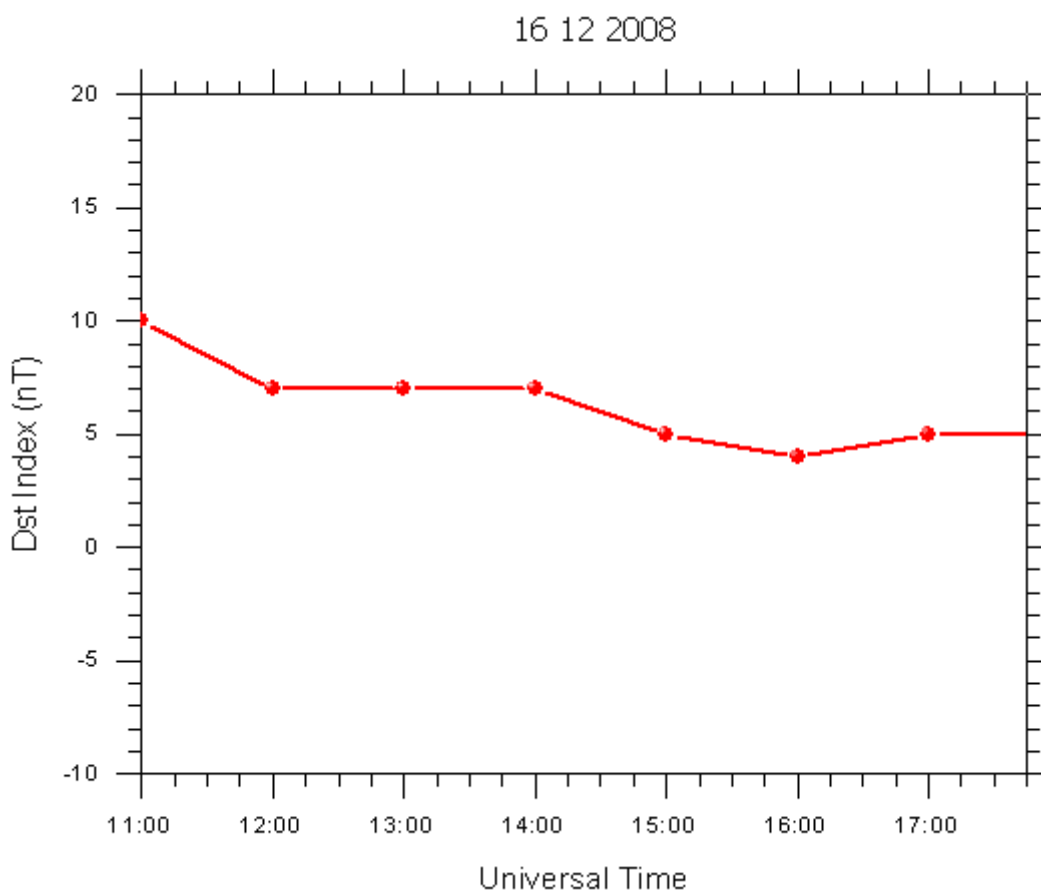


Fig. 5.11 – Variação da perturbação magnética para o dia 16 de dezembro de 2008 de acordo com o Índice Dst em função das horas do dia, medido a cada 3 horas.

O gráfico acima mostra a intensidade de perturbação magnética de acordo com o Índice Dst ao longo do dia, medido a cada 3 horas. Como vemos, foi escolhido um dia sem perturbação magnética, com variação de 5 a 10 nT durante o período de duração do dia.

O próximo passo é analisar os dados provenientes do radar RESCO. No mapa RTI, mostrado na figura 5.12, podemos ver que o radar começou a operar próximo das 11:00 LT e terminou perto das 17:45 LT.

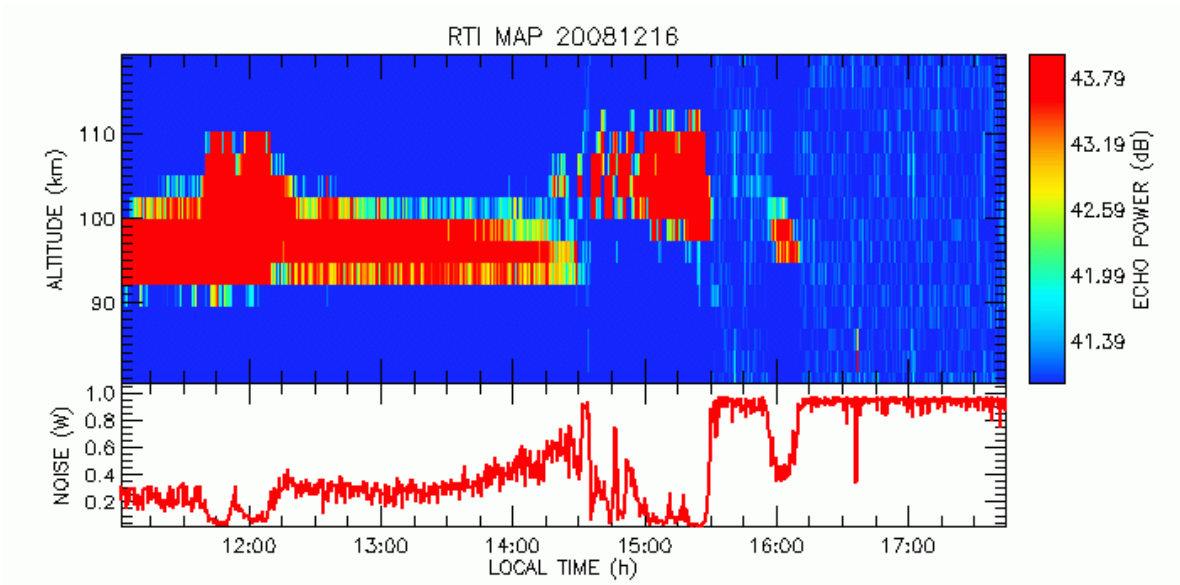


Fig. 5.12 – Mapa RTI (*Range Time Intensity*) obtido pelo radar RESCO no dia 16 de dezembro de 2008. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.

Este gráfico mostra a altura dos ecos retro-espalhados das irregularidades ionosféricas (painel superior) e o nível de ruído captado pelo radar, em função da hora do dia. Neste gráfico vemos a presença de irregularidades que representam o EEJ desde o início da operação do radar, às 11:00. Elas são vistas até próximo de 14:30. Esta estrutura se manteve com o centro médio em 97 km de altura. Podemos notar que entre os horários de 11:40 e 12:10 é possível ver uma flutuação na espessura deste conjunto de irregularidades. Esta borda superior oscila de aproximadamente 100 para 110 km.

Logo em seguida, às 14:30, os ecos retro-espalhados voltam a aparecer, porém centrados em 105 km de altura. Essa estrutura apresenta flutuações no início do seu aparecimento, até próximo de 15:00. A partir deste horário estas flutuações desaparecem e a borda de baixo da estrutura se rebaixa de 100 para 97 km.

Após isso, às 15:55, notamos uma pequena faixa de ecos retro-espalhados, durando até próximo das 16:15. Este grupo de irregularidades se mantém centrado em 97 km de altura.

No mapa montado por espectrogramas dessa mesma data (figura 5.13) podemos identificar algumas estruturas semelhantes.

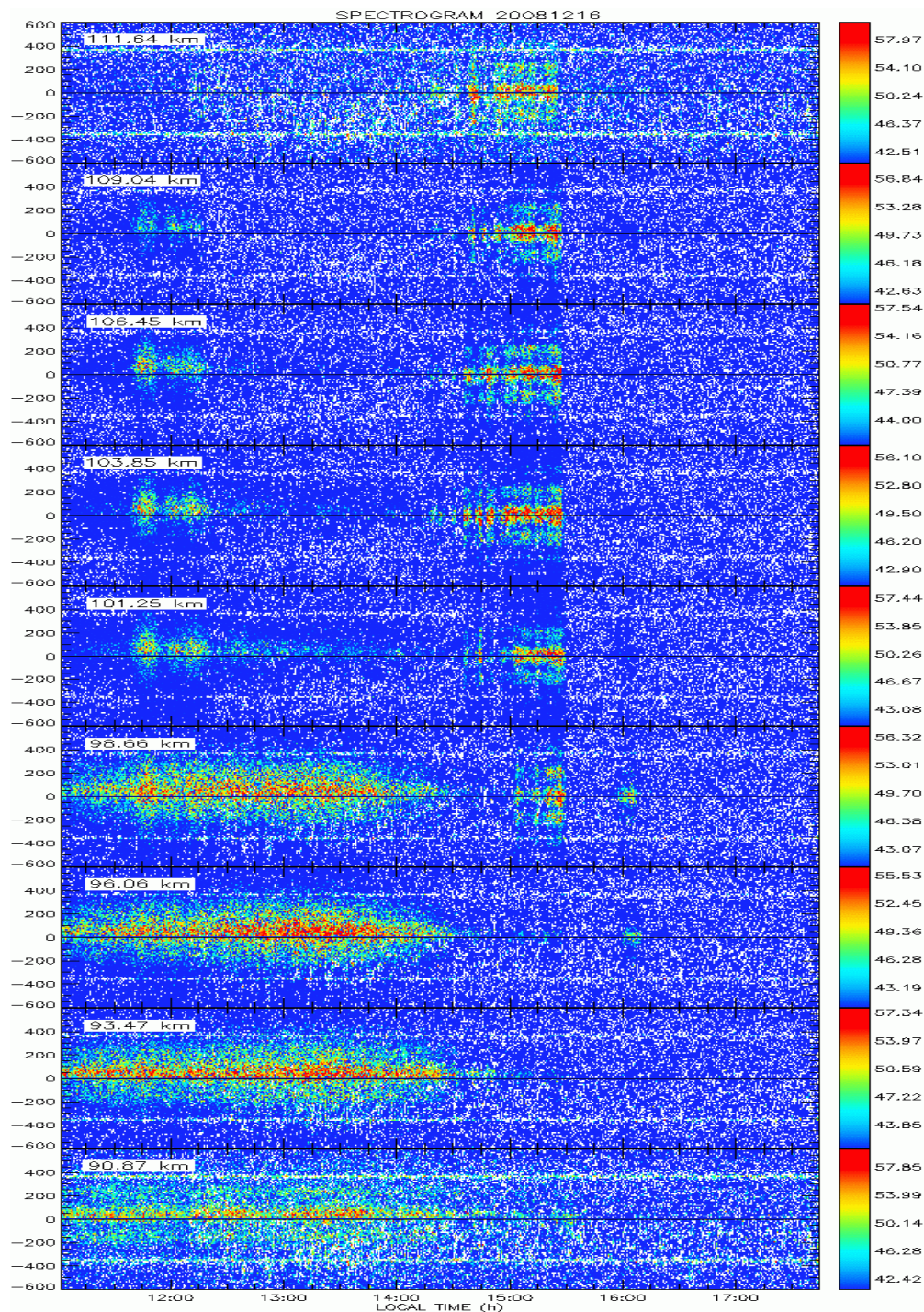


Fig. 5.13 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO no dia 16 de dezembro de 2008. Cada painel representa uma altura cobrindo um total de 90 até 111 km de altura.

O mapa acima mostra a variação da velocidade Doppler da irregularidade em função da hora do dia. Ele é separado por faixas de alturas específicas. Esse mapa de espectrogramas cobre a faixa de 90 a 111 km, referente aos Gates 5 a 13. Ele mostra um

conjunto de irregularidades se movimentando positivamente (se afastando do radar) desde 11:00 até 14:30 LT, visto nos painéis referente as alturas de 90 até 98 km. Nas alturas de 101 a 109 km, vemos esse mesmo conjunto de irregularidades, porém mais fraco, desde 11:40 até 12:15.

Logo adiante, às 14:30, o radar capta ecos das irregularidades entre a faixa horária de 14:30 à 15:30. Este conjunto de irregularidades se estende desde 98 até 111 km de altura. Nela, notamos que a mesma flutuação vista no mapa RTI é visto no conjunto de espectrogramas. Esta estrutura não apresenta a velocidade Doppler negativa o suficiente para classificarmos como CEJ, mas nela podemos ver um enfraquecimento na potência retro-espalhada, captada pelo radar. Isso pode significar que a corrente elétrica do EEJ pode ter enfraquecido e conseqüentemente, significa que o campo elétrico também pode ter sido enfraquecido.

Vadas e Fritts. (2002) diz que ondas atmosféricas se quebram na parte mais alta da região E (110 km) e depositam energia nessa região. Nós acreditamos que este depósito de energia pode acelerar a corrente do EEJ. Isso pode ser uma justificativa para o restabelecimento da corrente do EEJ.

Para tentar correlacionar o restabelecimento do EEJ com ondas na atmosfera, tomemos para análise as Figuras 5.14 e 5.15. Elas representam a transformada de ondeleta da variação da altura do centro das irregularidades (EJC) e a variação da espessura das irregularidades (EJT), respectivamente.

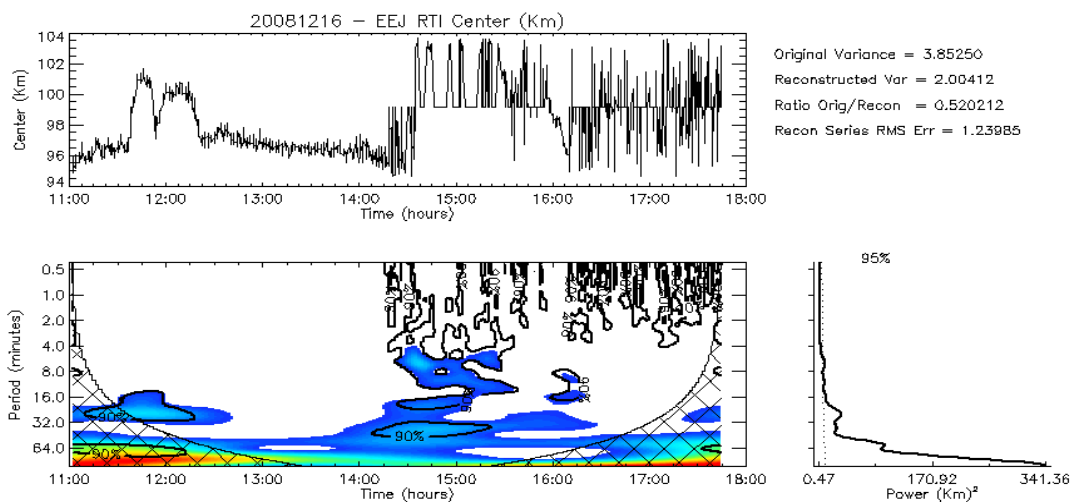


Fig. 5.14 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJC, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da altura do centro médio das irregularidades retro-espalhadas.

A Figura 5.14 mostra a variação da altura do centro das irregularidades (painel superior). No painel inferior, podemos ver um mapa com as periodicidades dominantes em função das horas do dia, relacionadas à variação da altura do centro das irregularidades. Neste gráfico vemos uma oscilação com periodicidade de 64 minutos, entre às 11:00 e 13:00. Neste caso, não podemos ter a certeza de que está oscilação é real e nem a sua duração, pois ela está dentro do cone de influência.

Na mesma faixa horária (entre 11:15 e 12:15) vemos uma oscilação com periodicidade entre 16 e 32 minutos. Ela também está sob o cone de influência, por isso também não pode ser considerada. Às 14:10, vemos uma onda com oscilação de 32 minutos, durando até as 15:20. Sobreposta a esta onda, vemos uma estrutura de onda iniciando as 14:25. Esta estrutura se inicia com periodicidades de 4 e 16 minutos, separadamente. Após as 15:15, elas se misturam, continuando até as 15:40 com o período de 8 minutos. Estas oscilações são exatamente no mesmo horário em que foi restabelecida a corrente do EEJ, no espectrograma. Mais adiante, vemos duas ondas oscilarem por um curto espaço de tempo. Elas aparecem entre 16:00 e 16:20, com periodicidades de 8 e 16 minutos.

Agora, vamos analisar as oscilações da espessura das irregularidades, na figura 5.15.

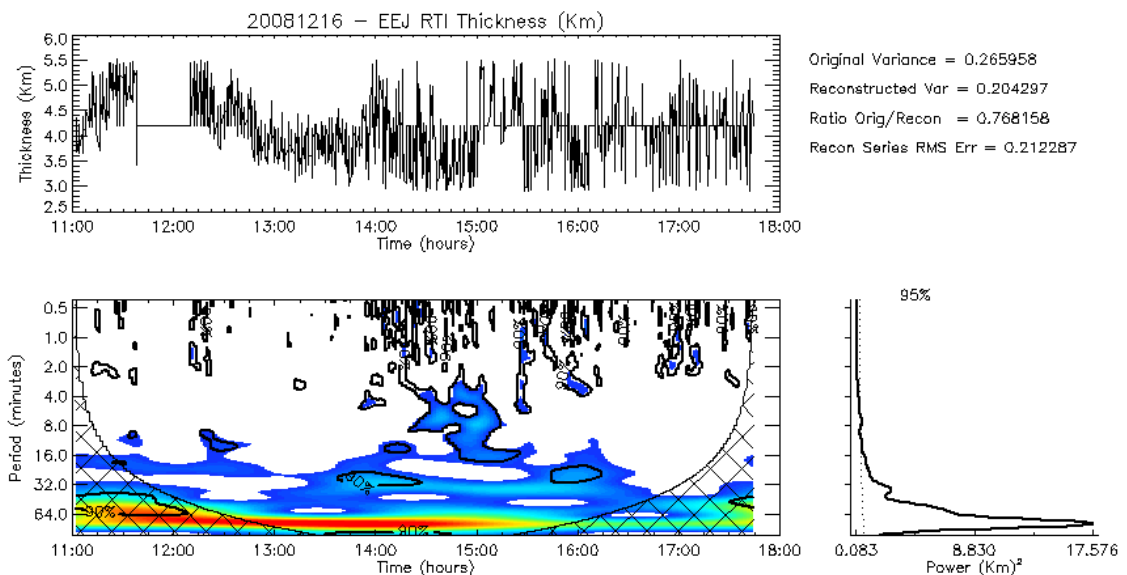


Fig. 5.15 –Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJT, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da espessura das irregularidades retro-espalhadas.

A Figura 5.15 mostra a variação da espessura das irregularidades (painel superior). No painel inferior, podemos ver um mapa com as periodicidades dominantes em função das horas do dia, relacionadas à variação da espessura das irregularidades. Neste gráfico vemos uma oscilação com periodicidade de 64 minutos das 11:00 até 16:00. Assim como comentado na análise do EJC, essa oscilação não pode ser considerada devido ao cone de influência. Às 13:30, temos uma oscilação de 32 minutos de periodicidade. Ela oscila até próximo das 14:30. Neste meio tempo, surge uma estrutura de ondas, às 14:20, se iniciando com 4 e 8 minutos, separadamente. Após alguns minutos elas se misturam a partir das 14:45 e perduram até 15:15. A partir das 14:50 essa estrutura começa a apresentar uma redução de frequência. Daí em diante, sua periodicidade se mantém em 16 minutos até 15:40. Esta estrutura é muito importante para este estudo, pois com ela podemos perceber que ondas compatíveis com ondas de gravidade podem ser um fator de influência na região ionosférica. Após isso, vemos uma pequena oscilação entre 15:45 e 16:15. Esta última oscilação apresenta um período de 32 minutos.

5.2.2. Dia 19 de dezembro de 2007

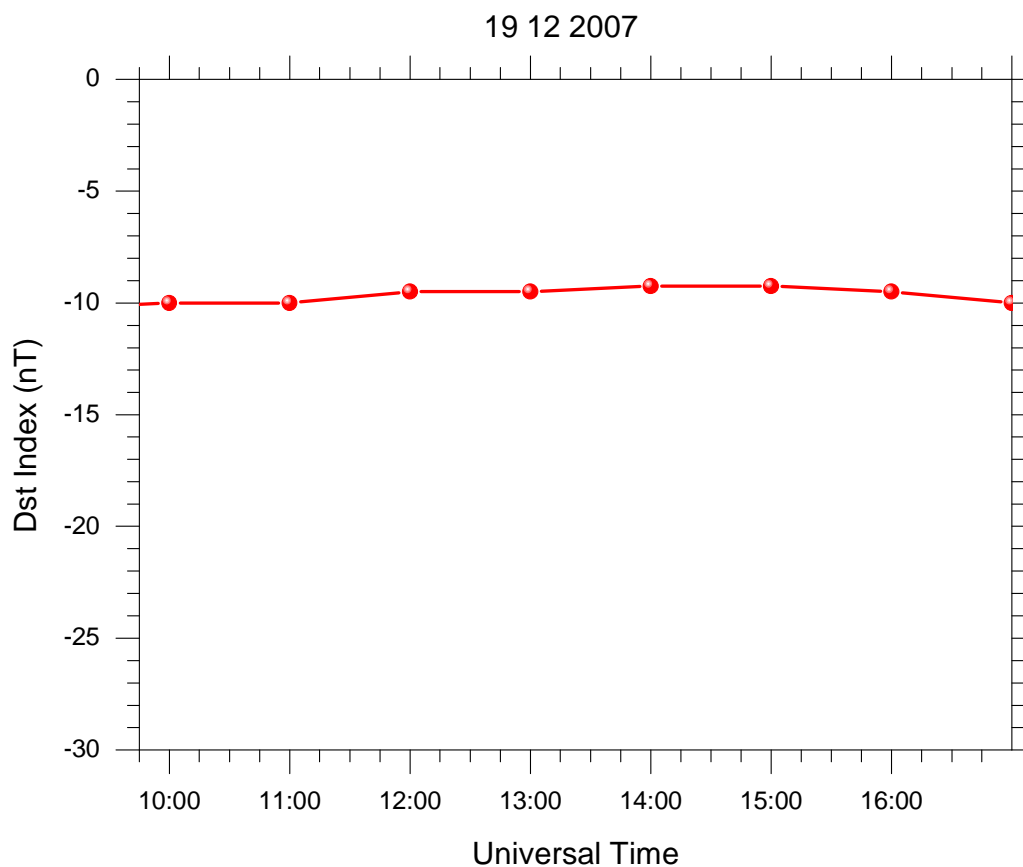


Fig. 5.16 – Variação da perturbação magnética de acordo com o Índice Dst em função das horas do dia, para o dia 19 de dezembro de 2007.

O gráfico da Figura 5.16 mostra a intensidade de perturbação magnética de acordo com o Índice Dst ao longo do dia. Como vemos, temos uma perturbação fraca, com aproximadamente -10 nT durante o período de duração do dia.

O próximo passo é analisar os dados provenientes do radar RESCO. No mapa RTI, mostrado na Figura 5.17, podemos ver que o radar começou a operar pouco antes das 10:00 LT e terminou perto das 17:00 LT.

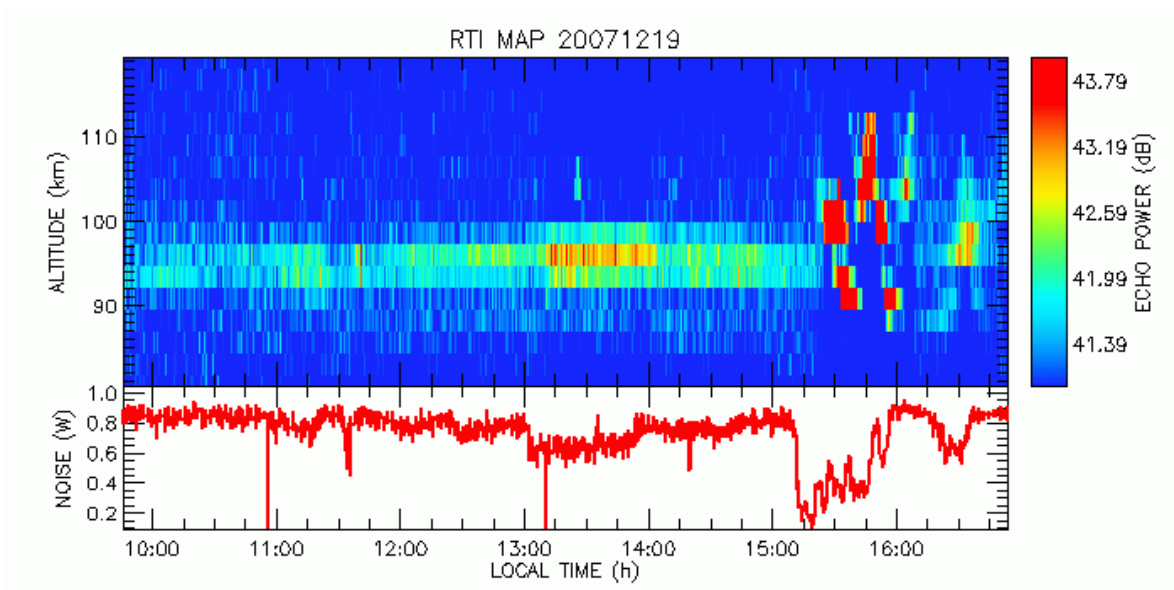


Fig. 5.17 – Mapa RTI (*Range Time Intensity*) obtido pelo radar RESCO no dia 19 de dezembro de 2007. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.

A Figura 5.17 mostra a altura dos ecos retro-espalhados das irregularidades ionosféricas (painel superior) e o nível de ruído captado pelo radar, em função da hora do dia. Neste gráfico vemos a presença de irregularidades que representam o EEJ em todo o tempo que o radar operou. Porém, mostrado mais fraco que o normal. O centro das irregularidades se mantém em torno de 95 km de altura até próximo das 15:20. A partir das 15:30 os ecos retro-espalhados mostram que as irregularidades parecem sofrer influência de alguma flutuação, variando de 90 km até 113 km de altura. Essa flutuação dura aproximadamente 40 minutos. Após às 16:20 as irregularidades voltam a aparecer normalmente. Porém com uma altura média de centro um pouco mais elevada, com aproximadamente 98 km.

Já no mapa montado por espectrogramas dessa mesma data (Figura 5.18) vemos algumas estruturas diferenciadas.

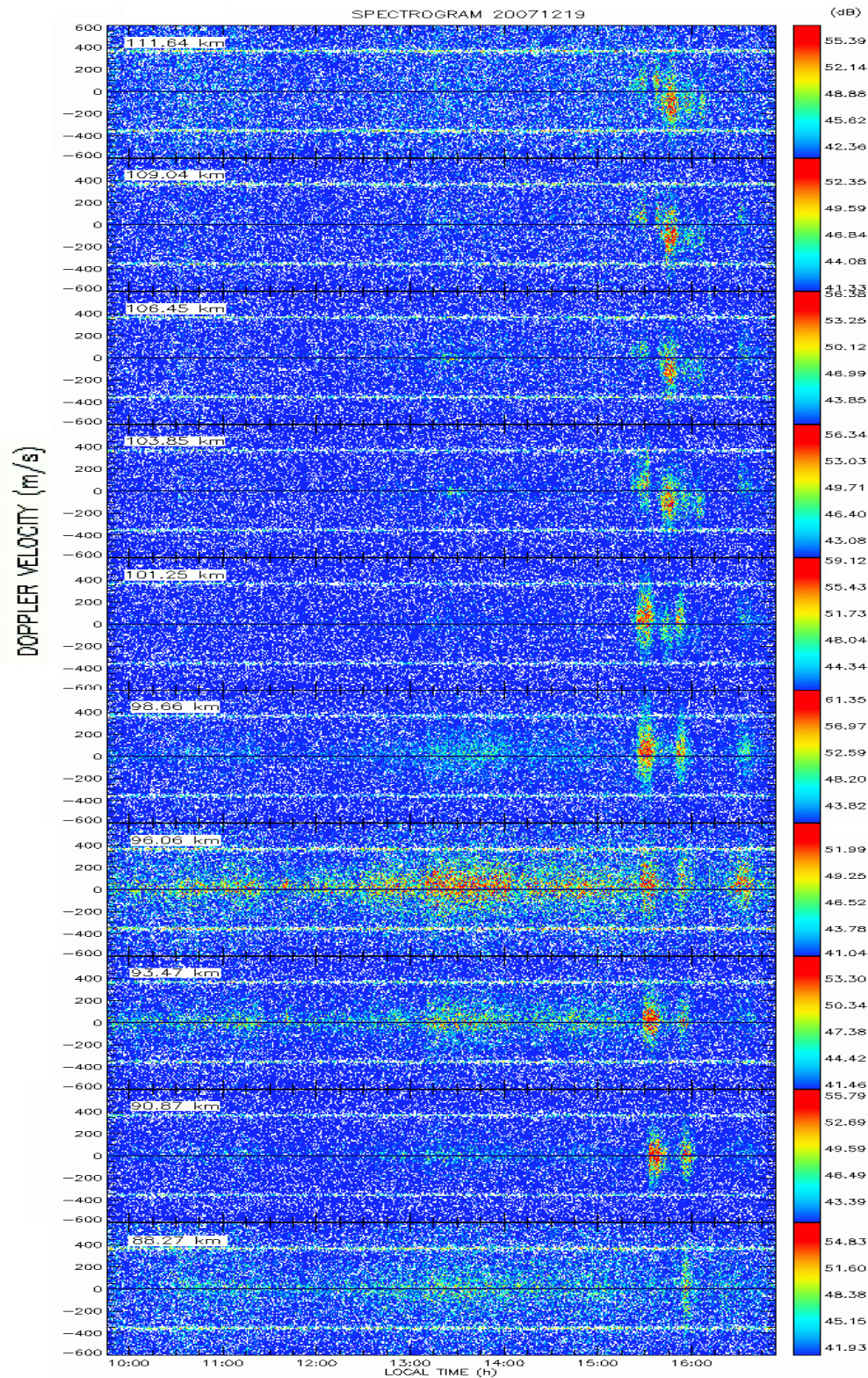


Fig. 5.18 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO no dia 19 de dezembro de 2007. Cada painel representa uma altura cobrindo um total de 88 até 111 km de altura.

O mapa da Figura 5.18 mostra a variação da velocidade Doppler da irregularidade em função da hora do dia. Ele é separado por faixas de alturas específicas. Esse mapa de

espectrogramas sobre a faixa de 88 a 111 km, referente aos Gates 4 a 13. Ele mostra um conjunto de irregularidades se movimentando positivamente (se afastando do radar) desde 10:00 até 15:30 LT, no painel referente a 96 km. Vemos esse mesmo conjunto de irregularidades, porém mais fraco, nos painéis inferior e superior à este. Outro grupo de irregularidades aparece se movimentando com velocidade positiva. Inicia por volta de 15:30 LT e dura cerca de 15 minutos e desaparece. Esse grupo de irregularidades aparece bem pronunciado nas alturas referente aos espectrogramas de 90, 93 e 96 km. Na altura de 88 km essa mesma estrutura é vista, porém mais fraca, iniciando às 15:50 e com duração de 10 minutos. Nas alturas de 98 e 101 km essa mesma estrutura aparece, mas deslocada no tempo. Ela começa a aparecer por volta de 15:20 e dura cerca de 20 minutos.

Em seguida, podemos ver a formação de uma nova estrutura nas alturas de 103, 106, 109 e 111 km. Desta vez, essa estrutura possui velocidade Doppler negativa (aproximando do radar). Logo, podemos caracterizar um aparecimento de um CEJ neste horário. Essa estrutura dura cerca de 10 minutos, sendo iniciada às 15:40. Logo após, voltam a aparecer irregularidades com velocidades positiva. Estas aparecem entre 88 e 101 km de altura. Esta estrutura perdura por 10 minutos, após as 15:50. A última estrutura vista nesse dia aparece entre 96 e 98 km de altura, sendo vista das 16:20 até 16:40. Para observar oscilações, vamos focar na análise das figuras 5.19 e 5.20. Elas representam a transformada de ondeleta da variação da altura do centro das irregularidades (EJC) e a variação da espessura das irregularidades (EJT), respectivamente.

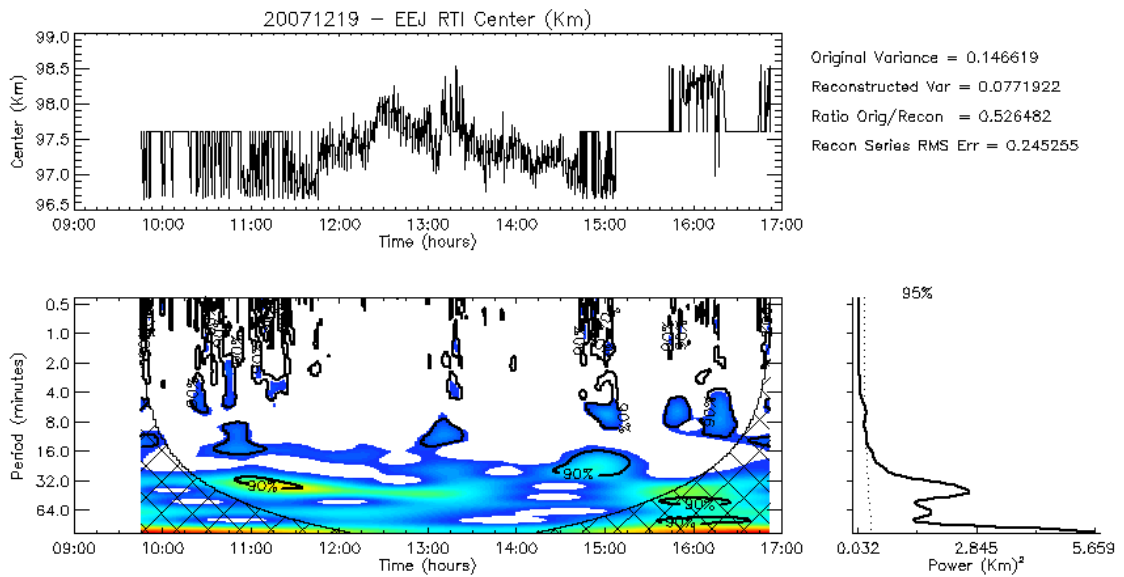


Fig. 5.19 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJC, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da altura do centro médio das irregularidades retro-espalhadas.

A Figura 5.19 mostra a variação da altura do centro das irregularidades (painel superior). No painel inferior, podemos ver um mapa com as periodicidades dominantes em função das horas do dia, relacionadas à variação da altura do centro das irregularidades. Neste gráfico vemos uma oscilação com periodicidade de 32 minutos, entre às 10:45 e 11:35.

No período da tarde, observamos outra oscilação, mas agora com periodicidade de 16 a 32 minutos. Essa oscilação aparece entre os horários de 14:15 e 15:20. Para o nosso estudo, esta oscilação é importante pelo fato de ser imediatamente antes da inversão da direção de movimentação das irregularidades.

Vamos analisar as oscilações da espessura das irregularidades, na Figura 5.20.

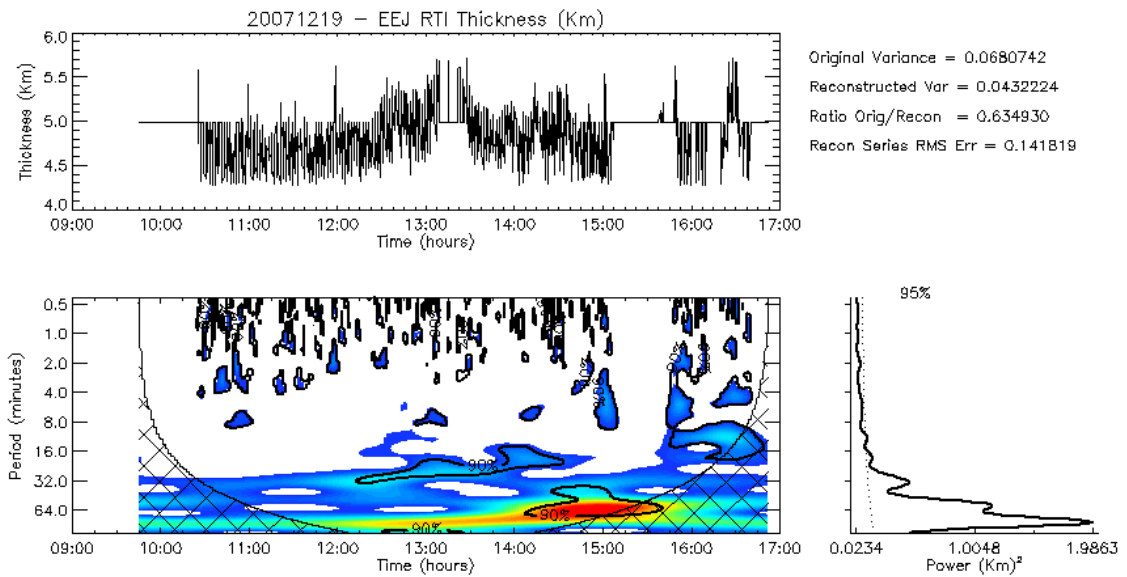


Fig. 5.20 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJT, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da espessura das irregularidades retro-espalhadas.

A Figura 5.20 mostra a variação da espessura das irregularidades (painel superior). No painel inferior, podemos ver um mapa com as periodicidades dominantes em função das horas do dia, relacionadas à variação da espessura das irregularidades. Neste gráfico vemos uma oscilação que começa com periodicidade de 32 minutos às 12:10 e, ao longo do dia, tem seu período de oscilação reduzido, chegando até 16 minutos às 14:30.

Logo em seguida, podemos observar uma forte oscilação com período de 64 minutos entre 14:00 e 15:40. Esta oscilação é importante para o nosso estudo, pois ocorre na mesma hora do dia em que ocorre o CEJ, mostrado nos espectrogramas.

5.2.3. Dia 11 de outubro de 2008

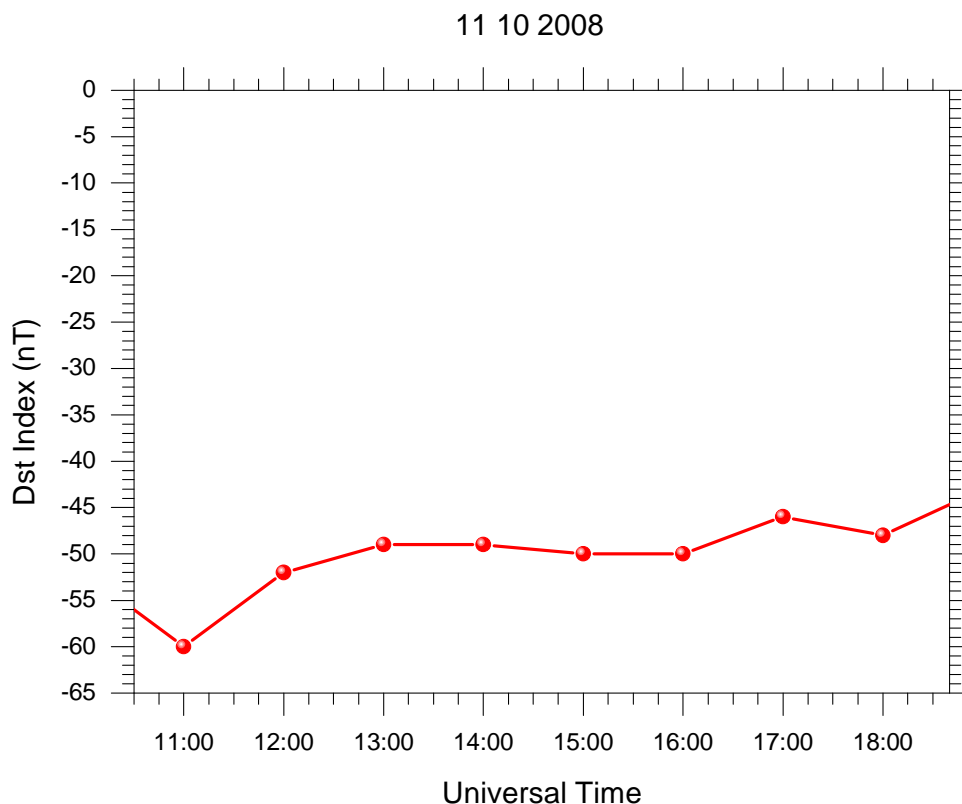


Fig. 5.21 – Variação da perturbação magnética de acordo com o Índice Dst em função das horas do dia.

O gráfico da Figura 5.21 mostra a intensidade de perturbação magnética de acordo com o Índice Dst ao longo do dia. Como vemos, o gráfico mostra uma perturbação magnética considerada intensa, com variação de -60 nT a -45 nT durante o período de duração do dia.

O próximo passo é analisar os dados provenientes do radar RESCO. No mapa RTI, mostrado na Figura 5.22, podemos ver que o radar começou a operar pouco antes das 10:20 LT e terminou perto das 18:40 LT.

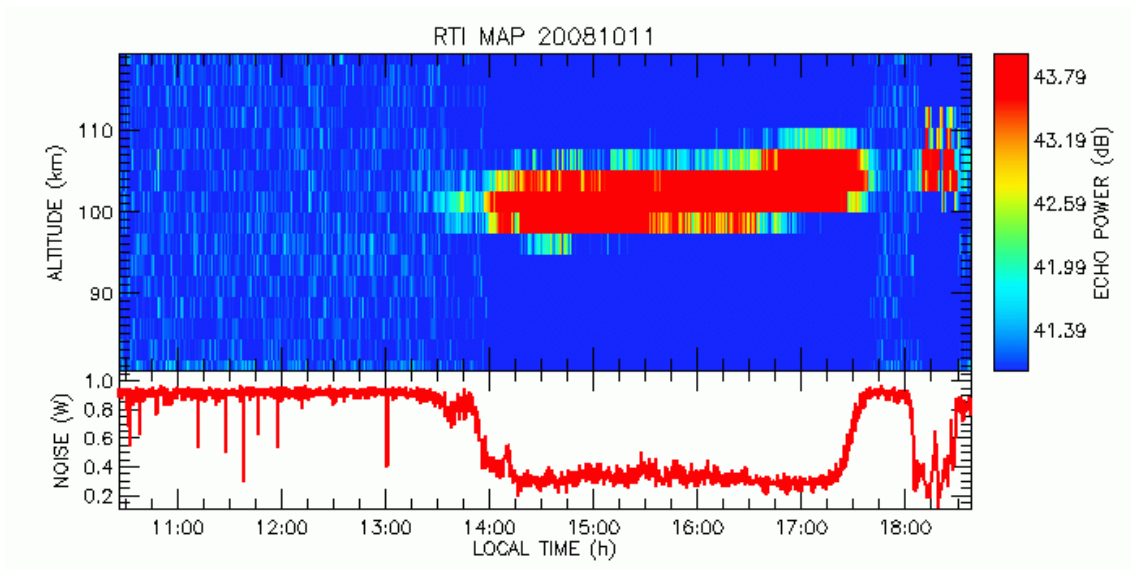


Fig. 5.22 – Mapa RTI (*Range Time Intensity*) obtido pelo radar RESCO no dia 11 de outubro de 2008. O painel superior mostra a altura do aparecimento das irregularidades retro-espalhadas em função da hora do dia. O painel inferior mostra a intensidade de ruído captada pelo radar no mesmo período.

A Figura 5.22 mostra a altura dos ecos retro-espalhados das irregularidades ionosféricas (painel superior) e o nível de ruído captado pelo radar, em função da hora do dia. Nele vemos a presença deo irregularidades que representam o EEJ a partir das 15:30. O centro das irregularidades iniciam em torno de 100 km de altura vão gradualmente se movimentando para cima, até próximo das 15:40, onde atinge aproximadamente 105 km.

Após às 18:10 as irregularidades voltam a aparecer, onde perduram até 18:30 Essa estrutura apareceu centrada em 106 km, aproximadamente. Interessante notar que a borda superior dessa estrutura sofre uma flutuação. Com isso ela chega a oscilar verticalmente 2 km (108 – 110 km).

Já no mapa montado por espectrogramas dessa mesma data (Figura 5.23) vemos algumas estruturas diferenciadas.

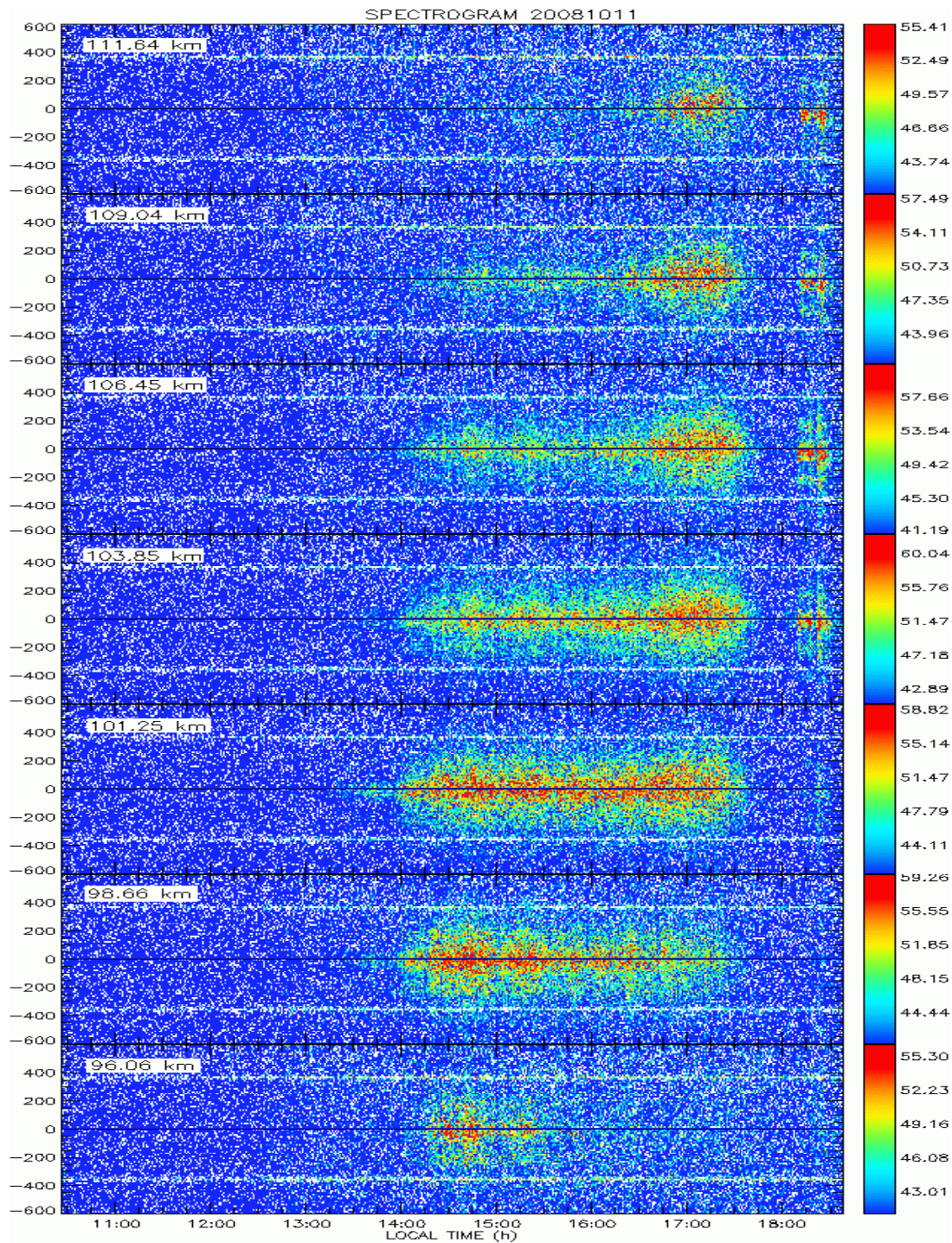


Fig. 5.23 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO no dia 11 de outubro de 2008. Cada painel representa uma altura cobrindo um total de 96 até 111 km de altura.

O mapa da Figura 5.23 mostra a variação da velocidade Doppler da irregularidade em função da hora do dia. Ele é separado por faixas de alturas específicas. Esse mapa de espectrogramas cobre a faixa de 96 a 111 km, referente aos Gates 7 a 13. Ele mostra um conjunto de irregularidades se movimentando positivamente (se afastando do radar) desde 14:00 até 17:40 LT, nos painéis referente a 98 até 109 km. Podemos notar que em

96 km de altura, essa mesma estrutura está presente até as 15:30, onde desaparece. Nos painéis de 106 e 109 km vemos essa estrutura com menor intensidade. A partir das 16:30, essa mesma estrutura também é vista no espectrograma de 111 km de altura.

Em seguida, podemos ver a formação de uma nova estrutura nas alturas de 103 até 111 km. Desta vez, essa estrutura possui velocidade Doppler negativa (aproximando do radar). Logo, podemos caracterizar um aparecimento de um CEJ neste horário. Essa estrutura dura cerca de 20 minutos, sendo iniciada às 18:10.

Como mencionado no capítulo anterior, utilizaremos a transformada contínua de ondeleta para observar possíveis oscilações presentes na região do EEJ. As figuras 5.24 e 5.25 representam a transformada de ondeleta da variação da altura do centro das irregularidades (EJC) e a variação da espessura das irregularidades (EJT), respectivamente.

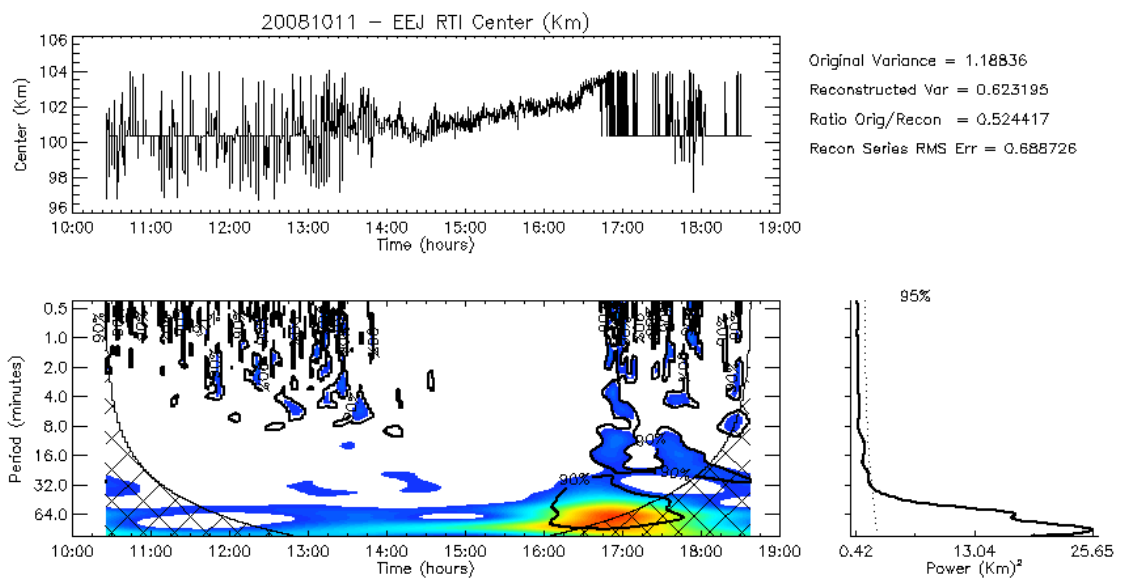


Fig. 5.24 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJC, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da altura do centro médio das irregularidades retro-espalhadas.

A Figura 5.24 mostra a variação da altura do centro das irregularidades (painel superior). No painel inferior, podemos ver um mapa com as periodicidades dominantes em função das horas do dia, relacionadas à variação da altura do centro das irregularidades. Neste gráfico vemos uma forte oscilação com período entre 32 e 64 minutos, entre às 16:00 e 17:45.

Em seguida, observamos outra oscilação, mas agora iniciando com uma periodicidade de 16 minutos, às 16:30. Com o passar do tempo, a periodicidade da oscilação vai aumentando, desaparecendo as 18:35 com o período de 32 minutos. Para o nosso estudo, esta oscilação é a mais importante pelo fato de ser durante o período da inversão da direção de movimentação das irregularidades.

Vamos analisar as oscilações da espessura das irregularidades, na Figura 5.25.

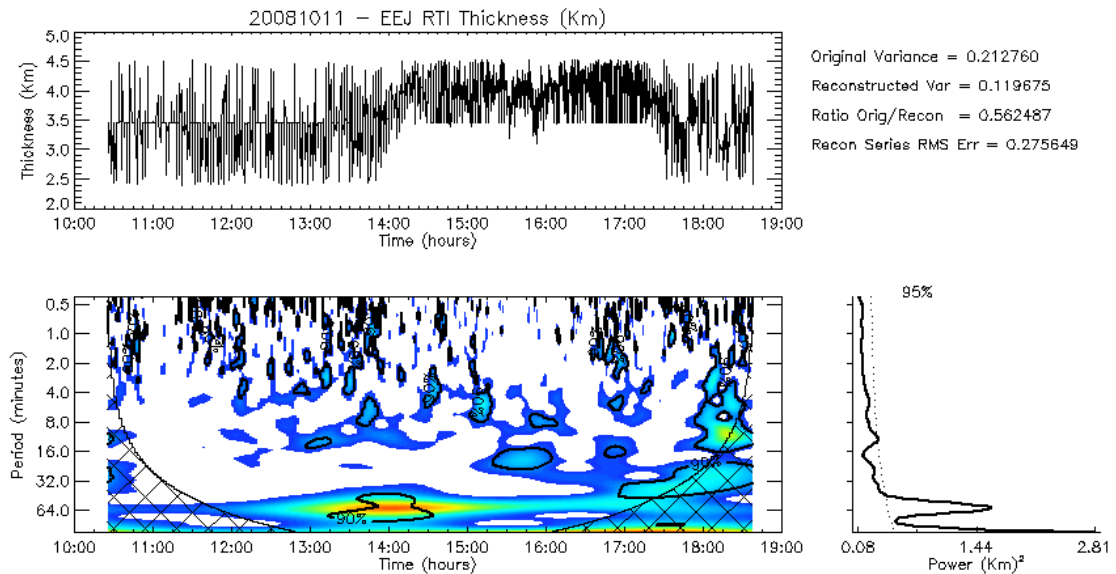


Fig. 5.25 – Gráfico das oscilações apresentadas pela transformada de ondeleta do parâmetro EJT, em função das horas do dia (gráfico inferior). O painel superior mostra a variação da espessura das irregularidades retro-espalhadas.

A Figura 5.25 mostra a variação da espessura das irregularidades (painel superior). No painel inferior, podemos ver um mapa com as periodicidades dominantes em função das horas do dia, relacionadas à variação de espessura das irregularidades. Neste gráfico vemos uma oscilação muito forte que começa com periodicidade de 64 minutos às 13:15 e desaparece as 14:40. Logo em seguida, podemos observar uma forte oscilação com período de 16 minutos entre 15:15 e 16:05.

No final da tarde, vemos uma oscilação se iniciando às 16:55 com período de 32 minutos. Esta oscilação dura até as 18:40. Este período cobre exatamente o horário em que o evento de CEJ ocorreu. Por volta de 17:50, podemos ver que o centro médio do EEJ oscila com uma somatória de várias frequências. Ele oscila com períodos desde 2 minutos até 8 minutos. Às 18:40 essa oscilação desaparece. Esta oscilação também é importante para o

nosso estudo, pois ocorre nas mesma hora do dia em que ocorre o CEJ, mostrado nos espectrogramas.

Após analisar todos os parâmetros desse dia, chegamos à conclusão que ocorreu um CEJ e que existem ondas compatíveis com o período de ondas de gravidade no mesmo faixa horária do evento de CEJ.

Contudo, Denardini et al. (2006) mostraram que os ecos retro-espalhados captados pelo radar RESCO a partir do horário do pôr-do-sol (*sunset*) em altitudes mais altas podem apresentar influência da conexão dos campos elétricos mapeados na região F. Denardini et al. (2006) cita que as correntes elétricas, logo após o pôr-do-sol, são mapeadas para a região F, que, por sua vez, requer um reforço do campo elétrico horizontal para mover a corrente para o lado diurno através da condutividade baixa do lado noturno. Essa corrente eventualmente volta para o lado diurno se juntando ao sistema Sq de corrente existente.

No entanto, Denardini et al. (2006) encontraram irregularidades no período após o pôr-do-sol com características diferentes das apresentadas nesta dissertação. As figuras 5.26 e 5.27 mostram os resultados apresentados por Denardini et al. (2006).

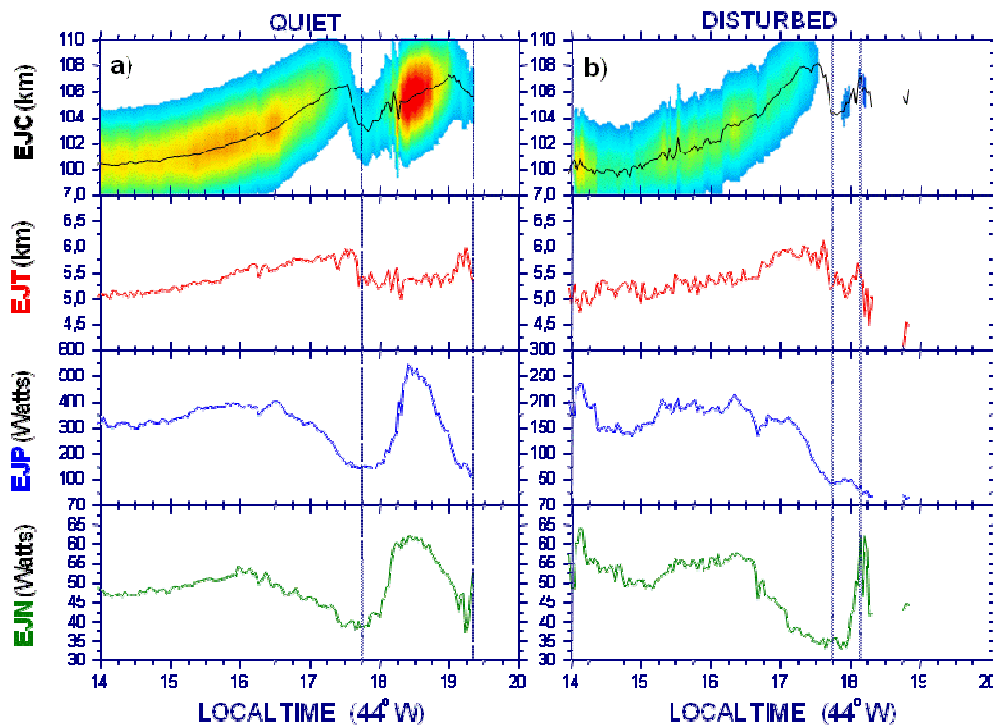


Fig. 5.26 – Grupo de gráficos que apresentam características dos parâmetros retirados do mapa RTI, obtidos por radar RESCO, separados em período magneticamente calmo (a) e perturbado (b).

FONTE: Denardini et al. (2006).

A figura 5.26 mostra um conjunto de gráficos representando os parâmetros que classificam as irregularidades, obtidas no mapa RTI. Os parâmetros estão separados em períodos calmos e perturbados, de acordo com o índice de perturbação magnética. O primeiro painel de cada coluna representa a altura média do centro do EEJ (EJC). O segundo representa a variação da espessura do EEJ (EJT). O terceiro painel de cada coluna representa a potência captada dos ecos retro espalhados do EEJ (EJP). O último representa o nível de ruído captado pelo radar (EJN). A linha vertical tracejada significa o horário em que anoiteceu. Neste grupo de gráficos Denardini et al. (2006) identificou que após o pôr-do-sol o radar RESCO captou alguns ecos retro-espalhados em uma alta região da ionosfera (~108 km), o que difere o nosso resultado encontrado em período magneticamente calmo. No nosso caso, o dia que analisamos foi classificado como magneticamente perturbado. Outra divergência entre os estudos foi com relação às análises das velocidades Doppler. Estas análises de Denardini et al. (2006) são exibidas nos espectrogramas da Figura 5.27.

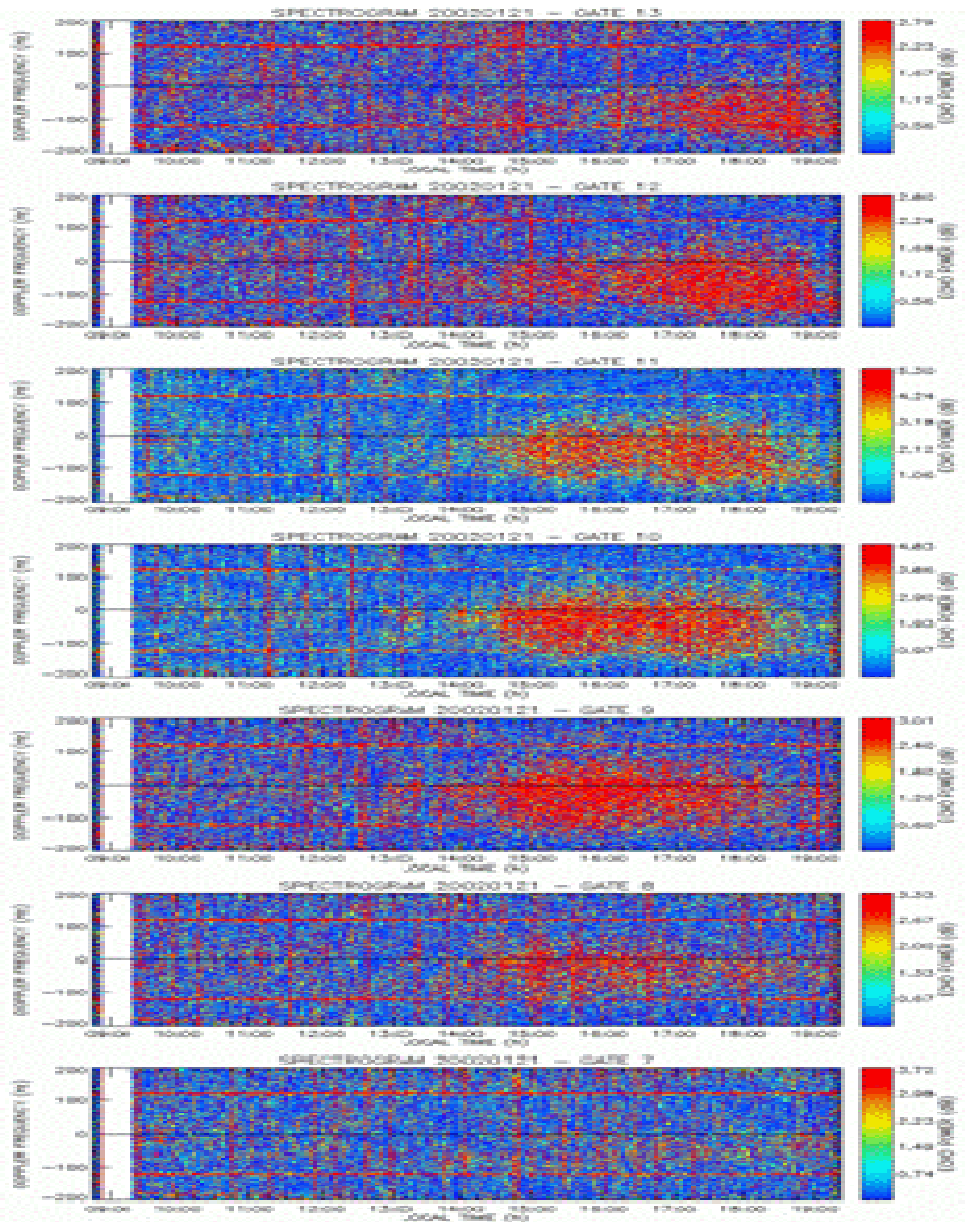


Fig. 5.27 – Espectrogramas obtidos pelo radar RESCO do dia 21 de janeiro de 2002. Cada painel representa a variação da velocidade Doppler das irregularidades retro-espalhadas para determinadas alturas.

FONTE: Denardini et al. (2006).

Na Figura 5.27 mostramos um conjunto de espectrogramas apresentando a velocidade Doppler das irregularidades de 3 metros, captadas pelo radar RESCO. Neste gráfico, Denardini et al. (2006) mostraram que as irregularidades estão se movimentando com velocidades negativa e ele afirmaram que os ecos captados após o pôr-do-sol continuam mantendo a mesma direção e sentido. No estudo escolhido para este trabalho vemos que os ecos das irregularidades, após o pôr-do-sol, apresentam uma inversão. Eles aparecem

com velocidade positiva na maioria do dia e, no horário após o pôr-do-sol, aparecem com velocidade negativa.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

As principais contribuições da pesquisa realizada no presente Trabalho de Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial no INPE/MCT, utilizando dados obtidos do radar RESCO, dados de magnetômetro de Eusébio e de São Luís, são listadas a seguir:

- a. desenvolvimento de uma metodologia de investigação da relação entre a ocorrência do CEJ e oscilações presentes na variação da altura de centro médio das irregularidades e presentes na variação da espessura do conjunto de irregularidades, compatíveis com ondas de gravidade na região E;
- b. aprimoramento das ferramentas de processamento de dados de magnetômetro do tipo “*Fluxgate*”, mesmo que estes não tenham tido seu potencial apresentado plenamente neste trabalho;
- c. processamento dos dados do Radar RESCO e dos magnetômetros de Eusébio, São Luís e Vassouras, utilizado neste trabalho e em proveito do grupo de pesquisa; e
- d. identificação de oscilações de pequena escala utilizando a análise espectral sobre os dados do radar RESCO, as quais são creditadas a interação de ondas de gravidade com relação a atmosfera ionizada nas alturas da região E.

Como principais conclusões da pesquisa e nas discussões apresentadas no capítulo anterior, ressaltam-se alguns tópicos apresentados a seguir.

O evento de CEJ é raro, pois houve apenas 13 casos consideráveis dentro de 137 dias em que o radar operou, cobrindo a faixa temporal de dezembro de 2007 até agosto de 2009.

Com relação à condição magnética na qual foram observados os eventos de CEJ, podemos afirmar que a maioria dos casos registrados ocorreu em um grau de perturbação considerado fraco (0 a -20 nT).

Na análise dos dados do radar RESCO relatamos que a maioria dos ecos captados estão entre 09:00 e 16:00, em cujo período as irregularidades são vistas entre 90 e 106 km de altura.

Com relação à sazonalidade das observações de CEJ, vimos que nos meses D e J ocorrem mais eventos de CEJ do que nos meses E. Eles ocorrem no período da tarde, entre 14:00 e 19:00. Mais de 60% dos CEJ analisados tem curta duração, entre 10 e 30 minutos.

No que diz respeito às oscilações vistas pelos parâmetros EJC e EJT verificou-se que os mesmos não seguem um padrão ao longo do dia, apresentando uma distribuição homogênea. Essas oscilações costumam durar entre 40 minutos e 1 hora. A periodicidade dominante no parâmetro EJC é centrada entre 8 minutos e 16 minutos, enquanto no parâmetro EJT os períodos predominantes de oscilação são de 16 minutos e 64 minutos. Cabe ressaltar que tanto o parâmetro EJC como o EJT são muito importantes na tentativa de detectar oscilações na região do EEJ. Segundo o nosso estudo, o parâmetro EJT é o mais indicado para fazer essa correlação.

Na análise do dia 16/12/2008 pudemos ver ondas preenchendo o mesmo horário em que houve o enfraquecimento do EEJ. Neste horário vimos oscilações de 8, 16 e 32 minutos no parâmetro EJC e 4, 8 e 16 minutos no parâmetro EJT.

No estudo do dia 19/12/2007 pudemos ver ondas com períodos entre 16 e 32 minutos, aparecendo imediatamente antes da inversão da direção da corrente elétrica do EEJ, utilizando o parâmetro EJC. Já na análise da transformada do EJT, vimos ondas com período de 64 minutos, oscilando exatamente no mesmo horário do evento de CEJ. Com isso, podemos supor que estes parâmetros podem estar diretamente ligados a inversão da corrente, ou podem favorecer ou intensificar a inversão, quando ocorrida.

No caso do dia 11/10/2008 pudemos perceber a influência do pôr-do-sol (*sunset time*), em um período geomagneticamente perturbado e as irregularidades apresentaram direção e sentido contrários à velocidade Doppler das outras estruturas observada no mesmo dia. O mesmo tipo de evento foi constatado por Denardini et al. (2007). Eles identificaram esta influência do pôr-do-sol, porém em condição geomagneticamente calma e os ecos das irregularidades apresentaram velocidade com mesmo sentido dos anteriores captados.

Ao final, ressalta-se que o trabalho de Dissertação mostra o potencial que dados de radares coerentes podem propiciar para o estudo de fenômenos na região equatorial. Este fato nos permite sugerir tópicos de pesquisa considerados promissores para serem explorados em trabalhos futuros. São eles:

- a. proceguir com este tipo de estudo utilizando um novo radar coerente com características mais modernas em termos de potência e resolução em altura, nos moldes do radar que será implantado em Belém, no Pará;
- b. estender o presente estudo para correlações entre campo magnético e acoplamento da atmosfera neutra utilizando dados de magnetômetros, para efetivamente, medir ao nível do solo correntes do EEJ, além do campo elétrico observado pelo radar na altura da região E;
- c. aumentar o campo de análise envolvendo outros radares e magnetômetros, como por exemplo, radar de Jicamarca e os magnetômetros de Jicamarca e Huancayo; e
- d. continuar os estudos onde se observa uma influência do efeito do pôr-do-sol em período magneticamente perturbado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKASOFU, S. I.; CHAPMAN, S. *Solar-terrestrial physics*. Oxford: Oxford University Press, 1972.

ANDREWS, D.G.; HOLTON, J.R.; LEOVY, C.B. *Middle atmosphere dynamics*. New York: Academic Press, 1987.

BALSLEY, B. B. Electric fields in the equatorial ionosphere: a review of techniques and measurements. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, v. 35, p. 1035–1044, 1973.

BALSLEY, B. B.; GAGE, K. S. The MST radar technique: potential for middle atmosphere studies. *Pure and Applied Geophysics*, v. 118, p. 452–493, 1980.

BANKS, P. M; KOCKARTS, G. *Aeronomy - Part B*. London : Academic Press, 1973.

BEER, T. *Atmospheric Waves*. London: Adam Hilger, 1974.

BRASSEUR, G. P.; SOLOMON, S. *Aeronomy of the middle atmosphere - chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere*. Dordrecht:Springer, 2005. 651 p. ISBN 978-1-4020-3824-1.

BROCHE, P.; CROCHET, M.; GAGNEPAIN, J. Neutral winds and phase velocity of the instabilities in the equatorial electrojet. *Journal of Geophysical Research*, v. 83, p. 1145-1146, 1978.

CAMPBELL, W. H. *Introduction to geomagnetic fields*. New York: Cambridge University Press, 1997.

CARTER, D.A.; BALSLEY, B.B.; ECKLUND, W.L.E. VHF Doppler radar observations of African equatorial electrojet. *Journal of Geophysical Research*, v. **81**, p. 2786–2794, 1976.

COHEN, R.; K. L. BOWLES. Secondary irregularities in the equatorial electrojet. *J. Geophys. Res.*, 72, 885, 1967.

DENARDINI, C. M. *Desenvolvimento de um sistema de correcao de fase para o radar ionosferico de Sao Luis do Maranhao*. 1999. 137 p. (INPE-7174-TDI/676). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose Campos, 1999. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/09.09.16.34>>. Acesso em: 02 ago. 2011.

DENARDINI, C. M. *Estimação de parâmetros de dados físicos*. São José dos Campos: INPE, 2003. 45 p. (INPE-10047-PUD/130). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/marciana/2003/11.11.07.42>>. Acesso em: 02 ago. 2011.

DENARDINI, C. M. *Estudo da eletrodinâmica da ionosfera equatorial durante o período de máxima atividade solar (1999-2002)*. 2003. 282 p. (INPE-10554-TDI/941). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/12.09.11.16>>. Acesso em: 02 ago. 2011.
DENARDINI, C.M.; ABDU, M.A.; PAULA, E.R.; WRASSE, C.M.; SOBRAL, J.H.A. VHF radar observations of the dip equatorial E-region during sunset in the Brazilian sector. *Ann. Geophys.* p. 1617-1623, 2006.

DENARDINI, C. M. A Conductivity Model for the Brazilian Equatorial E-Region: Initial Results. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 25, Supl. 2, p. 87-94, 2007.

FARGE, M., Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, v. 24, p. 395-397, 1992.

FAYNBERG, E.B. Separation of the geomagnetic field into a normal and an anomalous part. *Geomagn. Aeron.*, p 117-121, 1975.

Fejer, B. G.; KELLEY, M. C. Ionospheric irregularities. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v. 18, n. 2, p. 401-454, 1980.

FEJER, B.G.; FARLEY, D.T.; BALSLEY B.B.; WOODMAN, R.F. Vertical structure of vhf backscattering region in equatorial electrojet and gradient drift instability. *J. Geophys. Res.*, p 1313-1324, 1975.

FORBES, J. M. The equatorial electrojet. *Reviews of Space Geophysics and Space Physics*, v. 19, n. 3, p. 469-504, 1981.

FRITTS, D. C.; ALEXANDER, M. J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, v. 41, n. 1, 1003, doi: 10.1029/2001RG000106, 2003.

GAGE, K. S.; BALSLEY, B. B. Doppler radar probing of the clear atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 59, p. 1074-1093, 1978.

GOUIN, P. Reversal of the magnetic daily variations at addis ababa, *Nature*, v.139, p. 1145 - 1146, 1962.

GOUIN, P.; MAYAUD, P.N. A propose de l'existence possible d'un contre electrojet aux latitudes magnetiques equatoriales. *Ann. Geophys.* v. 23, p. 41-47, 1967.

GURUBARAN, S. The equatorial counter electrojet: Part of a worldwide current system?. *Geophys. Res. Lett.*, doi 10.1029/2001GL014519, 2002.

HANUISE, C.; MAZAUDIER, C.; VILA, P.; BLANC M.; CROCHET M. Global dynamo simulation of ionospheric currents and their connection with the equatorial electrojet and counter electrojet: A case study. *J. Geophys. Res.*, v. 88, p. 253-270, 1983.

HARGREAVES, J. K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

HEELIS, R.A. Electrodynamics in the low and middle latitude ionosphere: a tutorial. *J. Atmos. Terr. Phys.*, p. 825-838, 2004.

HINES, C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Canadian Journal of Physics*, v. 38, p. 1441-1481, 1960.

JANARDHANAN, K. V. *A coherent VHF backscatter radar for INPE*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1983. 58 p.

LIMA, L. M. ; BATISTA, P. P. ; CLEMESHA, B. R. ; TAKAHASHI, H. The 6.5-day oscillations observed in meteor winds over Cachoeira Paulista (22.7 aS). *Advances in Space Research*, Oxford, v. 36, n. 11, p. 2212-2217, 2005.

MAEDA, K. Conductivity and drifts in the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 39, p. 1041-1053, 1977.

MAYAUD, P.N. The equatorial counter electrojet-a review of its geomagnetic aspects. *J. Atmos. Terr. Phys.*, p 1055-1070, 1977.

McLANDRESS, C. On the importance of gravity waves in the middle atmosphere and their parameterization in general circulation models. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 60, n. 14, p. 1357-1383, 1998.

RAGHAVARAO, R.; ANANDARAO. B.G. Equatorial electrojet and counter electrojet. *Indian J. Radio and Space Phys.*,p 54-75, 1987.

RASTOGI, R. G. Sudden disappearance of E_{sq} and the reversal of the equatorial electric fields. *Annales de Géophysique*, v. 28, Fasc. 4, p. 717-727, 1972.

REDDY, C. A. The equatorial electrojet and the associated plasma instabilities. *Journal of Scientific & Industrial Research*, v. 36, n. 11, p. 580-589, 1977.

RICHMOND, A. D.; Equatorial electrojet .1. development of a model including winds and instabilities. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.6, n.35, 1083-1103 p., 1973.

RICHMOND, A. D. Equatorial electrojet – development of a model including winds and instabilities. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 35, n. 6, p. 2835-2838, 1975.

- ROGISTER, A.; D'ANGELO, N. Type II irregularities in the equatorial electrojet. *Journal of Geophysical Research*, v. 75, n. 19, p. 3879-3887, 1970.
- SATO, T. Neutral winds and electrojet irregularities. *Journal of Geophysical Research*, v. 80, n. 19, p. 2835-2838, 1975.
- SKOLNIK, M. I. *Introduction to radar systems*. New York: McGraw Hill, 1962.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, p 61-78, 1998.
- VADAS, S. L.; FRITTS, D. C. The Importance of spatial variability in the generation of secondary gravity waves from local body forces. *Geophys. Res. Lett.*, v. 29, n.20 10.1029/2002GL015574, 2002.
- WOODMAN, R.F.; CHAU, J.L. First Jicamarca radar observations of two-stream E region irregularities under daytime counter equatorial electrojet conditions. *Journal of Geophysical Research*, 107 (A12), A12S1482, doi:10.1029/2002JA009362, 2002.
- WRASSE, C. M. *Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas*. 2004. 253 p. (INPE-12249-TDI/978). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/05.24.10.59>>. Acesso em: 02 ago. 2011.

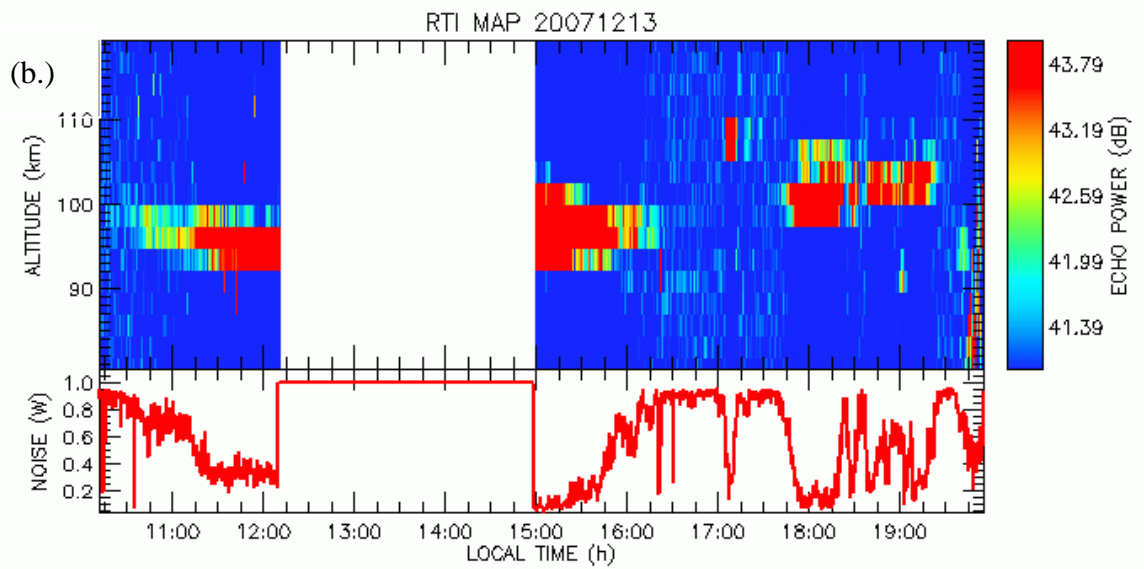
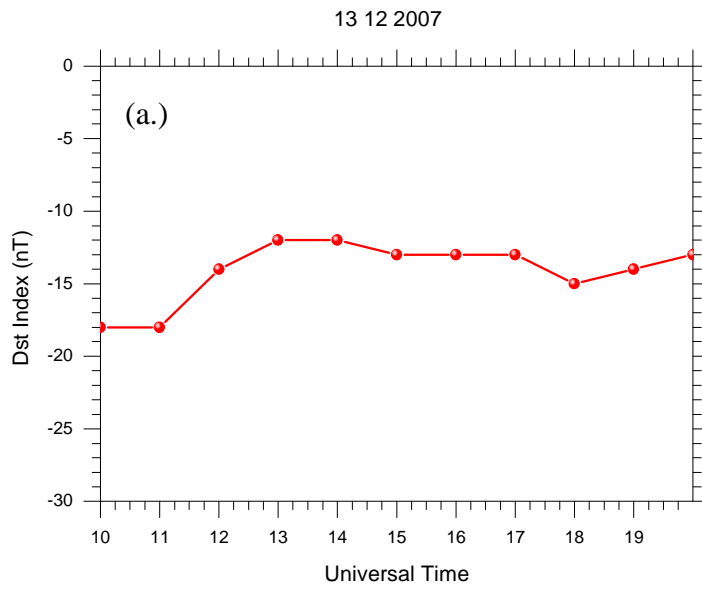
APÊNDICE A

Neste apêndice mostraremos o resumo das características de todos os dias analisados. Os dias apresentados a seguir estão separados da mesma forma que os utilizados no corpo do texto, exemplificado no tópico 4.1.2., página 44.

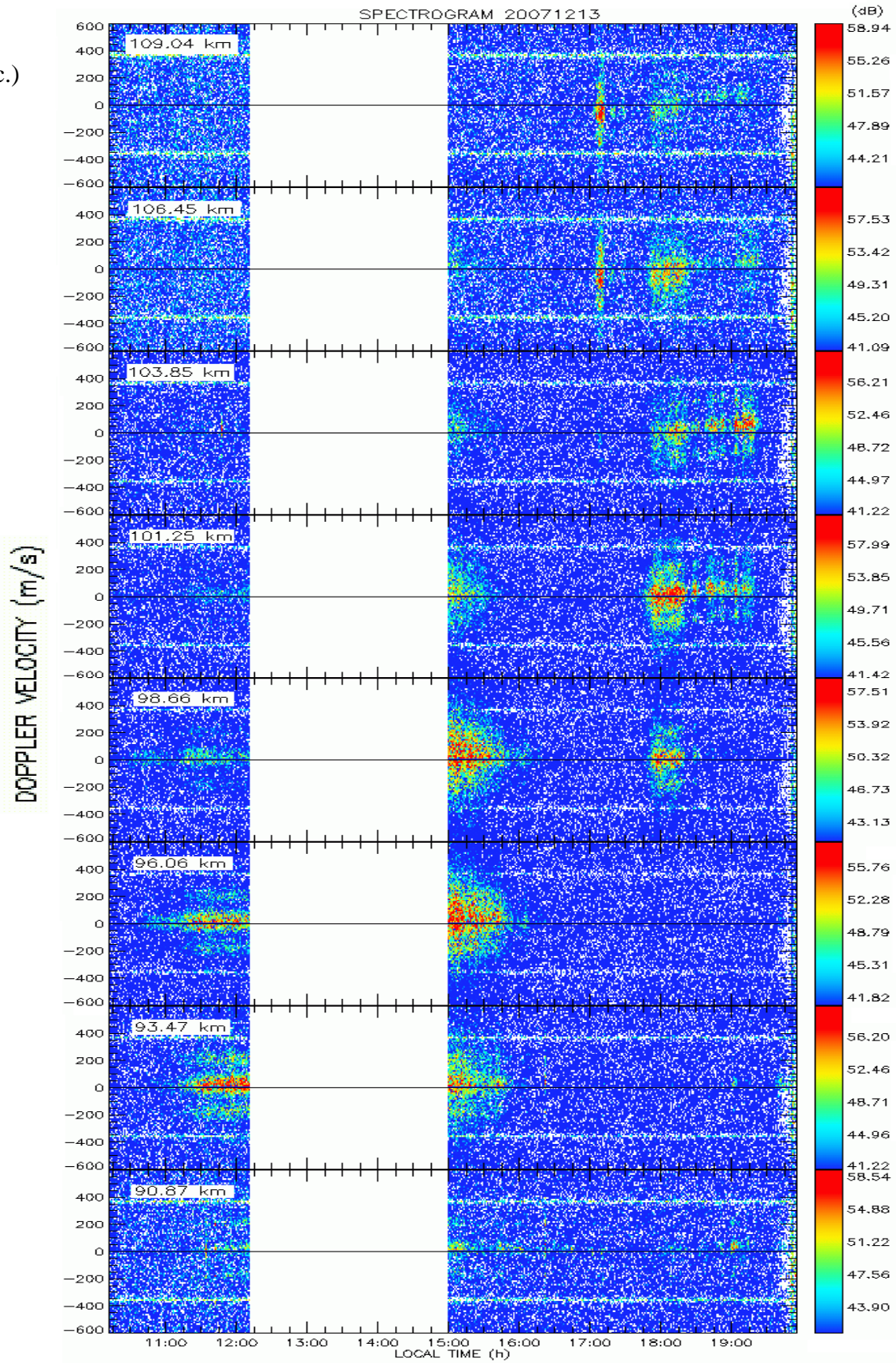
A figura representada pela letra (a.) é referente á variação de perturbação magnética utilizando como base o índice Dst. O mapa RTI, representado pela letra (b.), é o mapa que mostra os ecos retro-espalhados das irregularidades ionosféricas (mapa de cores) e o nível de ruído captado pelo radar (painel inferior) durante a operação ao longo do dia. A figura da letra (c.) representa o conjunto de espectrogramas. Nele temos a variação da velocidade Doppler das irregularidades em função das horas do dia, divididas em faixas específicas de altura. Nas figuras de letras (d.) e (e.) representam a transformada de ondeleta da variação da altura média do centro das irregularidades (EJC) e a variação da espessura das irregularidades (EJT), respectivamente. Nestes mapas temos a variação linear (painel superior) de cada parâmetro e o mapa de cores da transformada de ondeleta (painel inferior) referente ao mesmo. Após a apresentação de todos os gráficos, temos uma tabela resumindo as principais ocorrências em cada parâmetro observado.

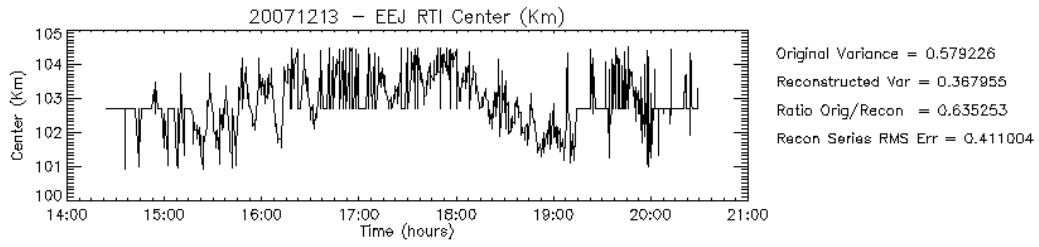
Esta mesma estrutura utilizada para este dia analisado é aplicada para os demais dias apresentados neste apêndice.

Resumo das Características do dia 13/12/2007

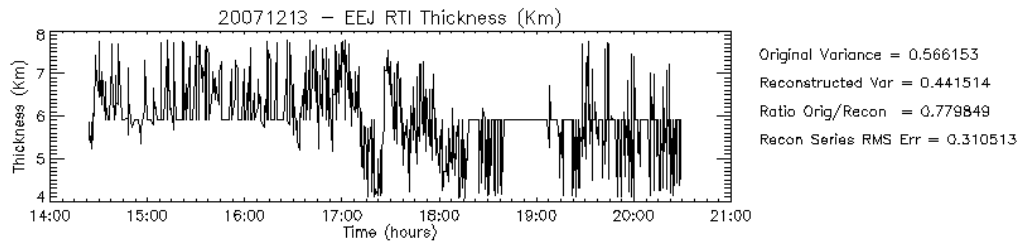
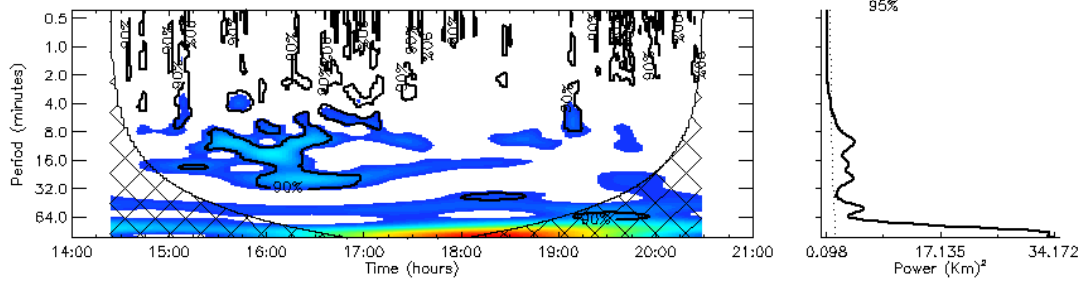


(c.)

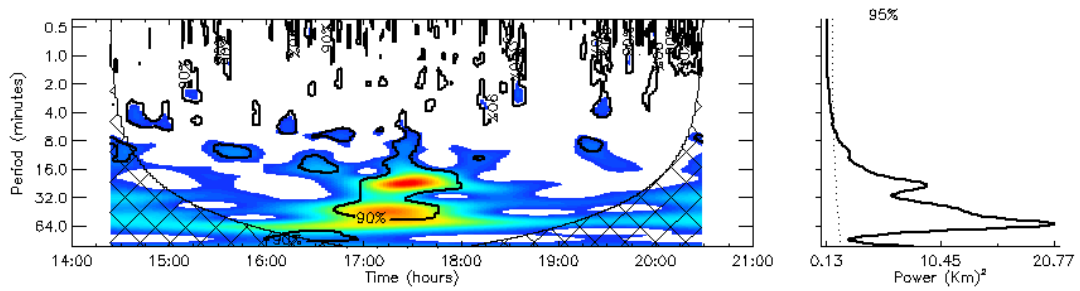




(d.)



(e.)



Data: 13 de dezembro de 2007

Início de Operação: 10:10

Fim de Operação: 19:50

Variação do Dst: -18 a -11 nT

Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	10:45	16:15	95 km
2	17:45	19:30	103 km
3	17:00	17:15	108 km

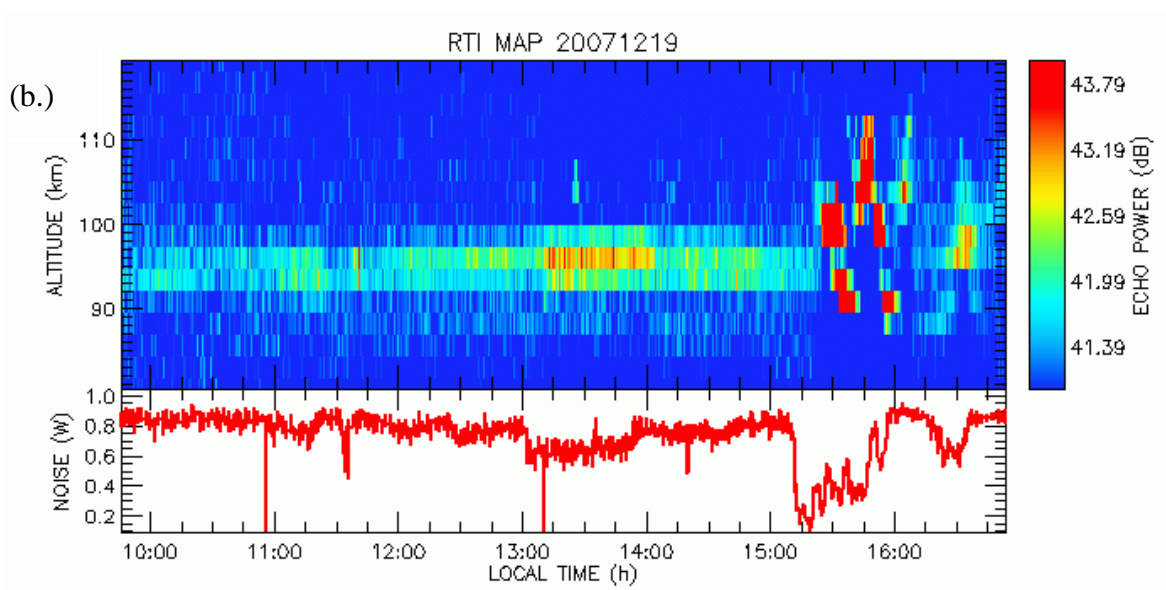
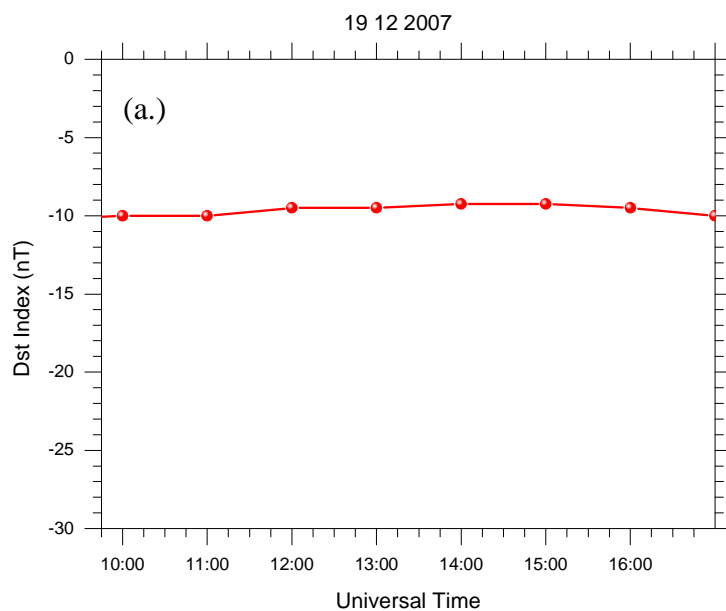
Comportamento no Espectrograma:

	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final:	Sentido:
1	11:15	15:45	93 km	98 km	Positivo
2	17:45	18:20	98 km	106 km	Positivo
3	17:45	19:20	101 km	103 km	Positivo
4	17:00	17:15	106 km	109 km	Negativo

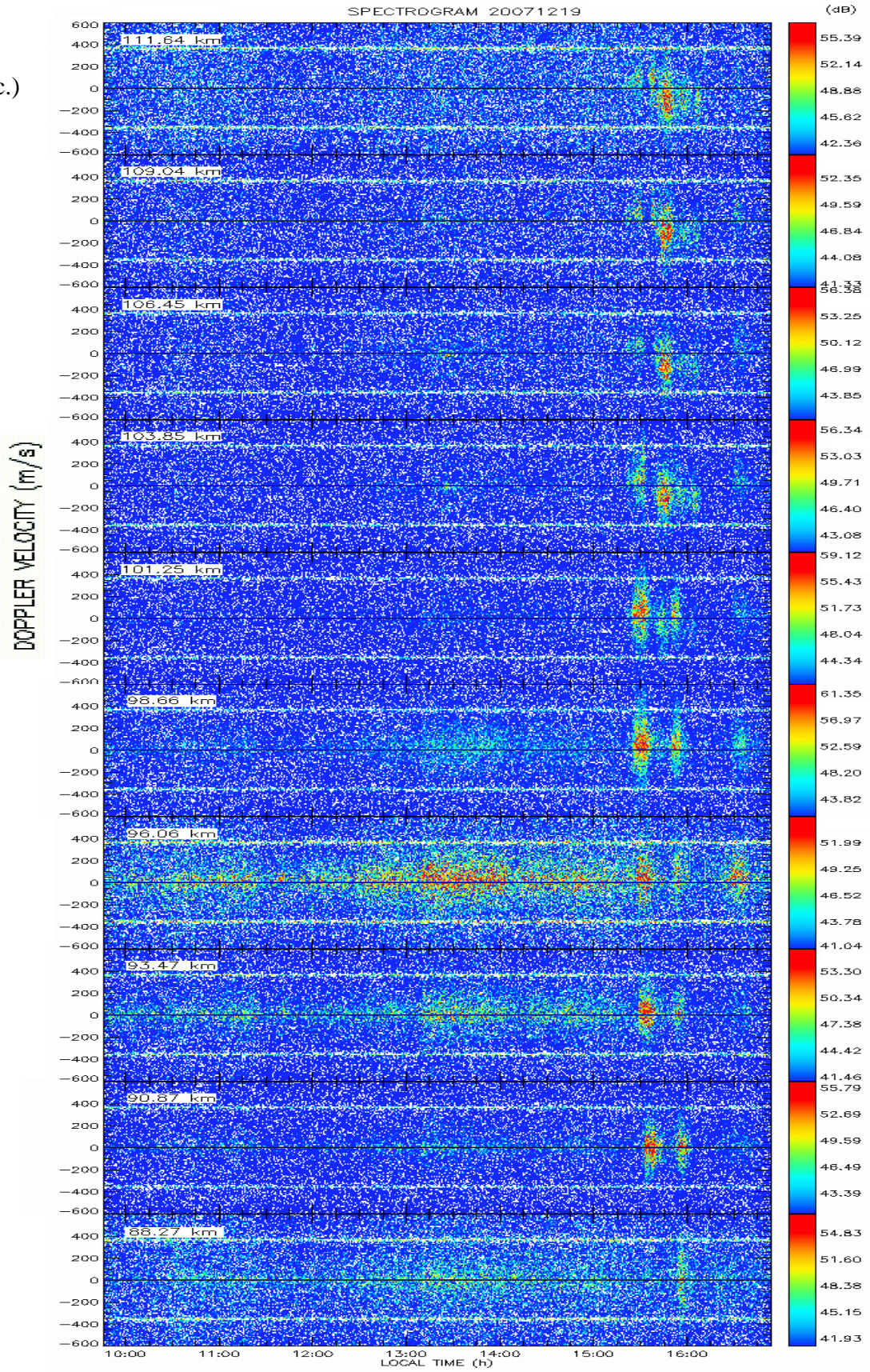
1) Ondeleta:

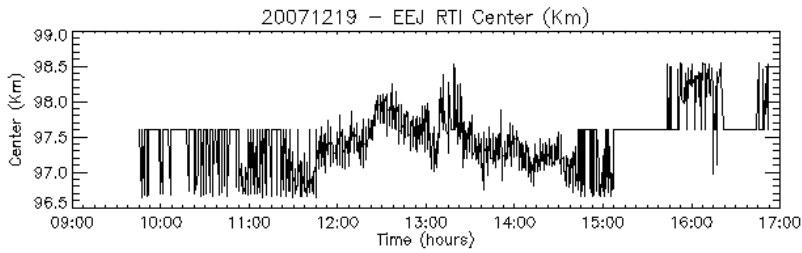
	Início:	Término:	Período (min):
EJC	15:20	16:40	08, 16
	15:50	17:00	32
	19:00	19:15	8
EJT	16:40	17:45	32, 64
	17:00	18:00	16, 32

Resumo das Características do dia 19/12/2007



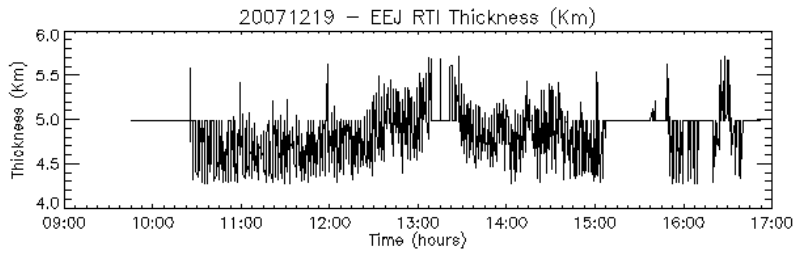
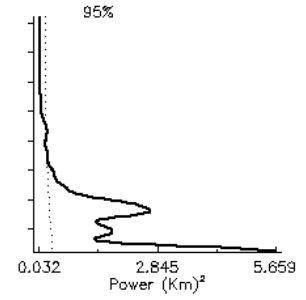
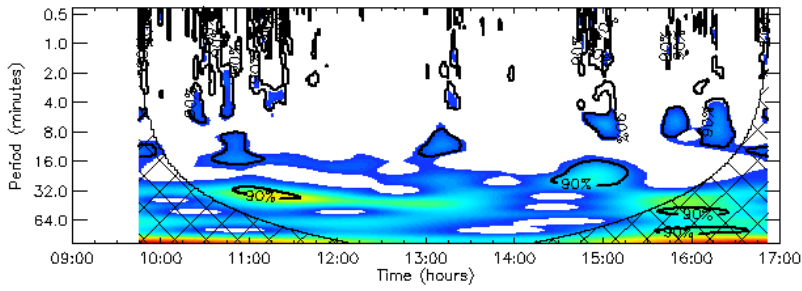
(c.)





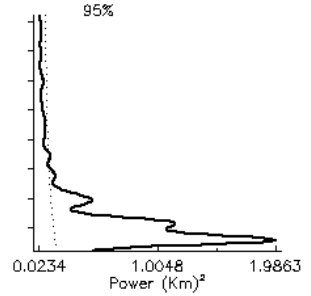
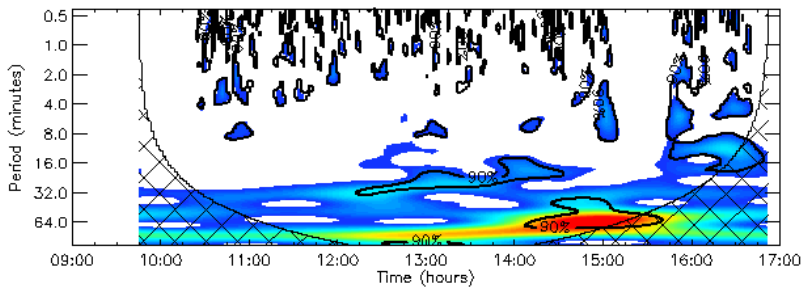
Original Variance = 0.146619
 Reconstructed Var = 0.0771922
 Ratio Orig/Recon = 0.526482
 Recon Series RMS Err = 0.245255

(d.)



Original Variance = 0.0680742
 Reconstructed Var = 0.0432224
 Ratio Orig/Recon = 0.634930
 Recon Series RMS Err = 0.141819

(e.)



Data: 19 de dezembro de 2007

Início de Operação: 09:50

Fim de Operação: 17:00

Variação do Dst: -10 nT

4) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	09:50	15:15	95 km
2	15:30	16:10	100 km **
3	16:20	16:45	98 km

** apresenta oscilações (90km a 103km).

5) Comportamento no Espectrograma:

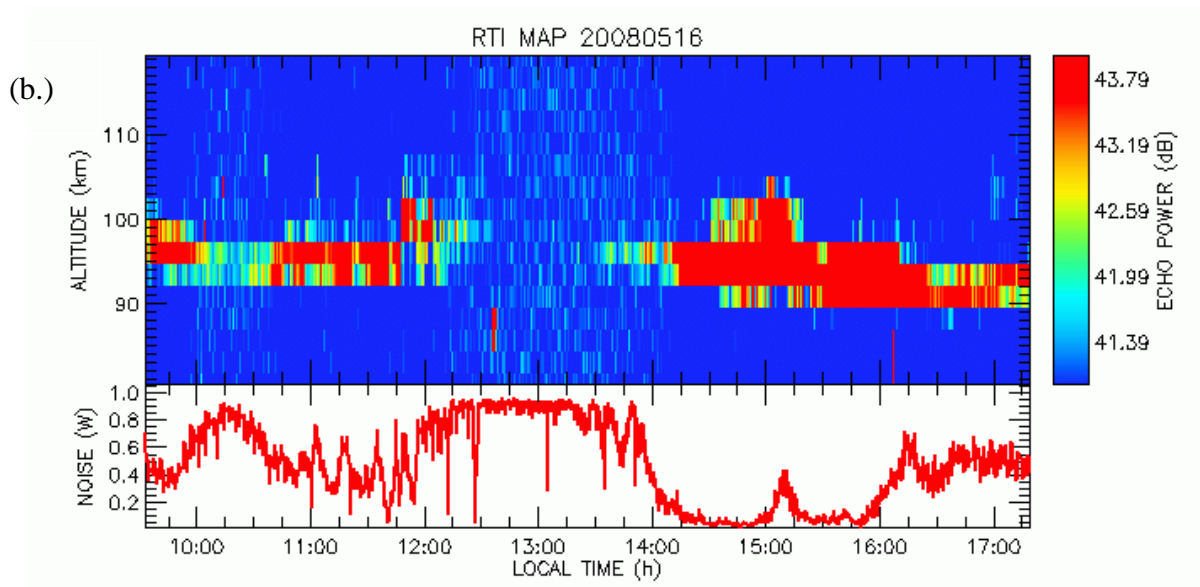
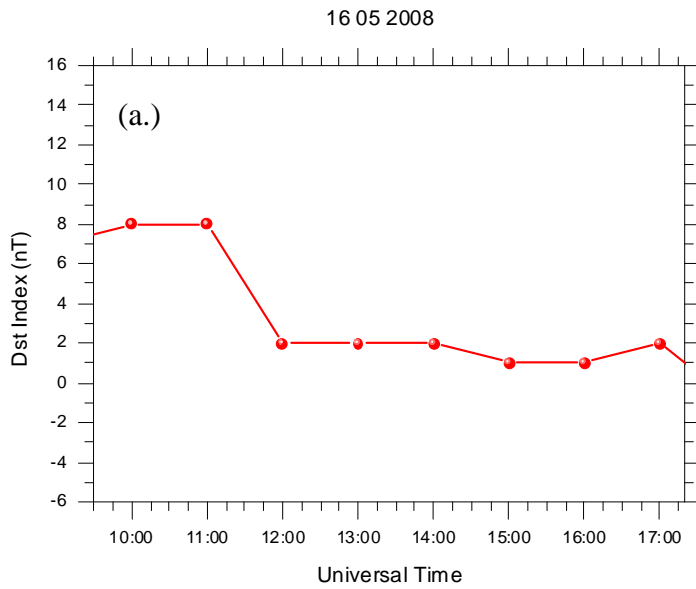
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	10:00	15:15	93 km	96 km	positivo
2	15:20	15:40	90 km	101 km	Positivo
3	15:40	16:00	88 km	101 km	positivo
4	15:40	15:50	103 km	108 km	negativo
5	16:20	16:40	96 km	98 km	positivo

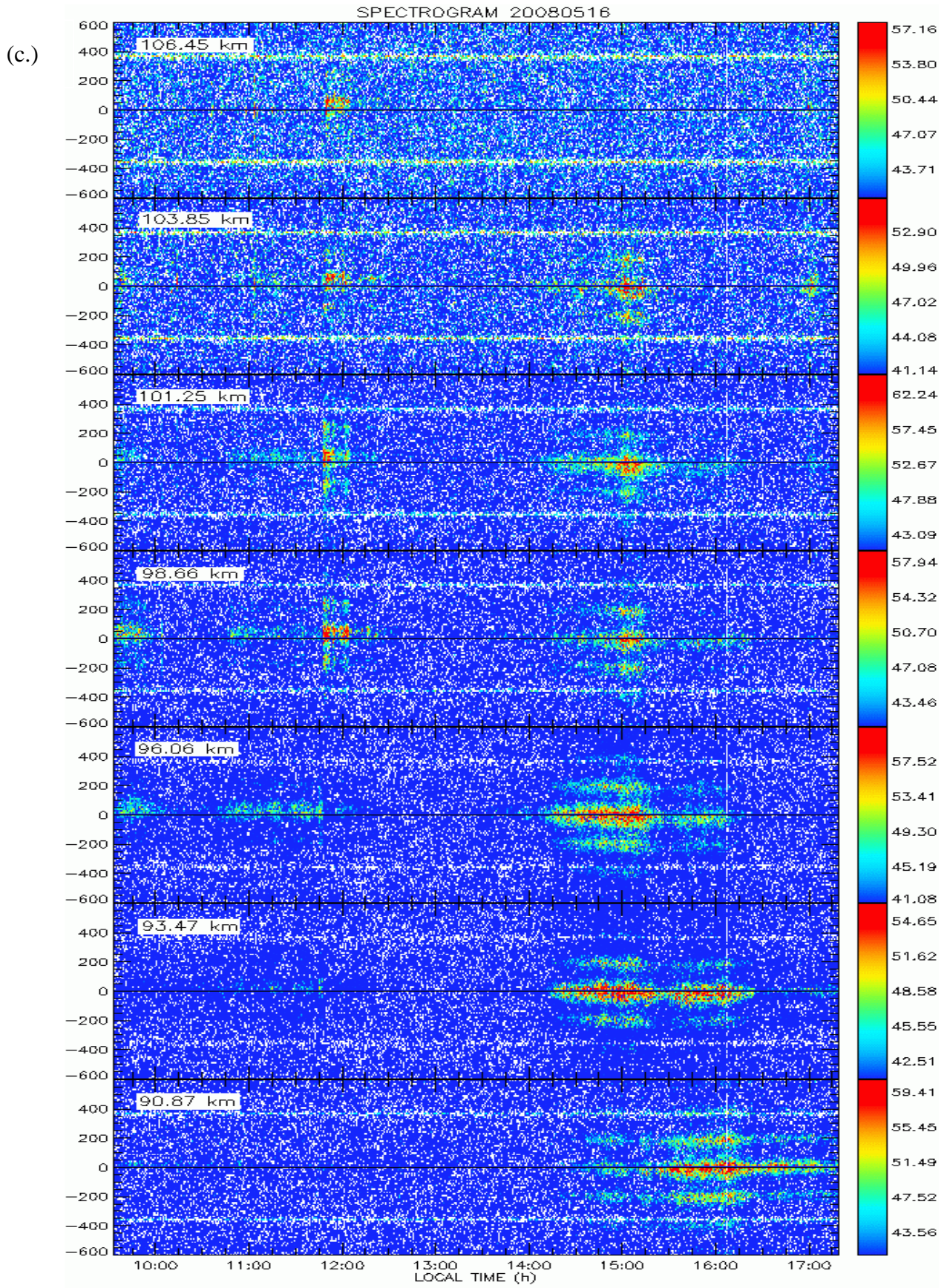
6) Ondeleta:

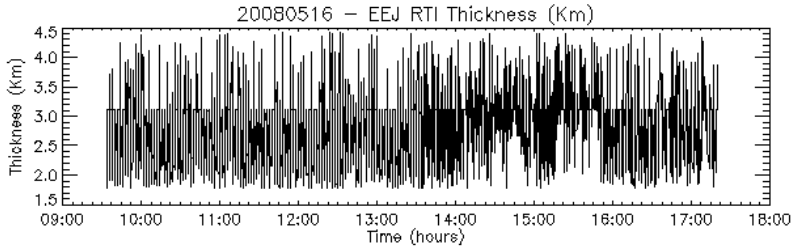
	Início:	Término:	Período (min):
EJC	10:45	11:35	32
	14:15	15:15	16 e 32
EJT	12:10	14:30	16 e 32
	14:00	15:40	64 *

* afetado pelo cone de influência.

Resumo das Características do dia 16/05/2008

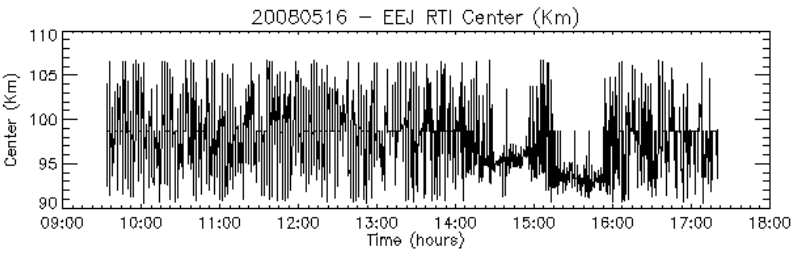
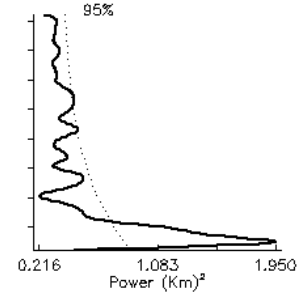
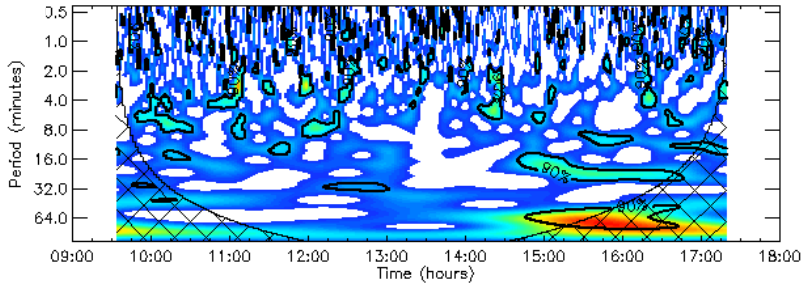






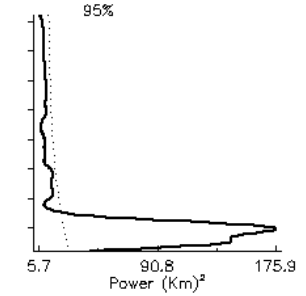
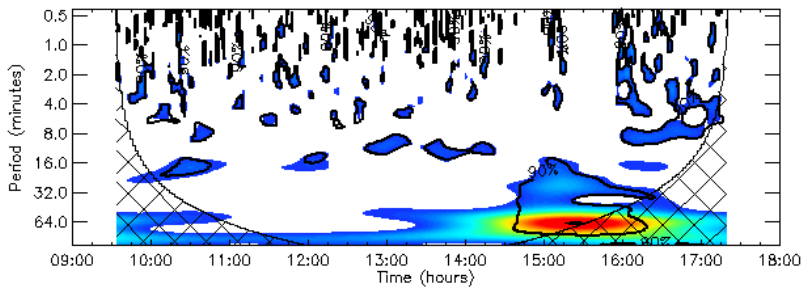
Original Variance = 0.376562
 Reconstructed Var = 0.303253
 Ratio Orig/Recon = 0.805320
 Recon Series RMS Err = 0.170250

(d.)



Original Variance = 11.3731
 Reconstructed Var = 8.32264
 Ratio Orig/Recon = 0.731785
 Recon Series RMS Err = 1.41589

(e.)



Data: 16 de maio de 2008

Início de Operação: 09:40

Fim de Operação: 17:20

Variação do Dst: 0 a 8 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	09:30	12:15	98 km
2	14:00	15:30	95 km
3	15:30	17:20	92 km

2) Comportamento no Espectrograma:

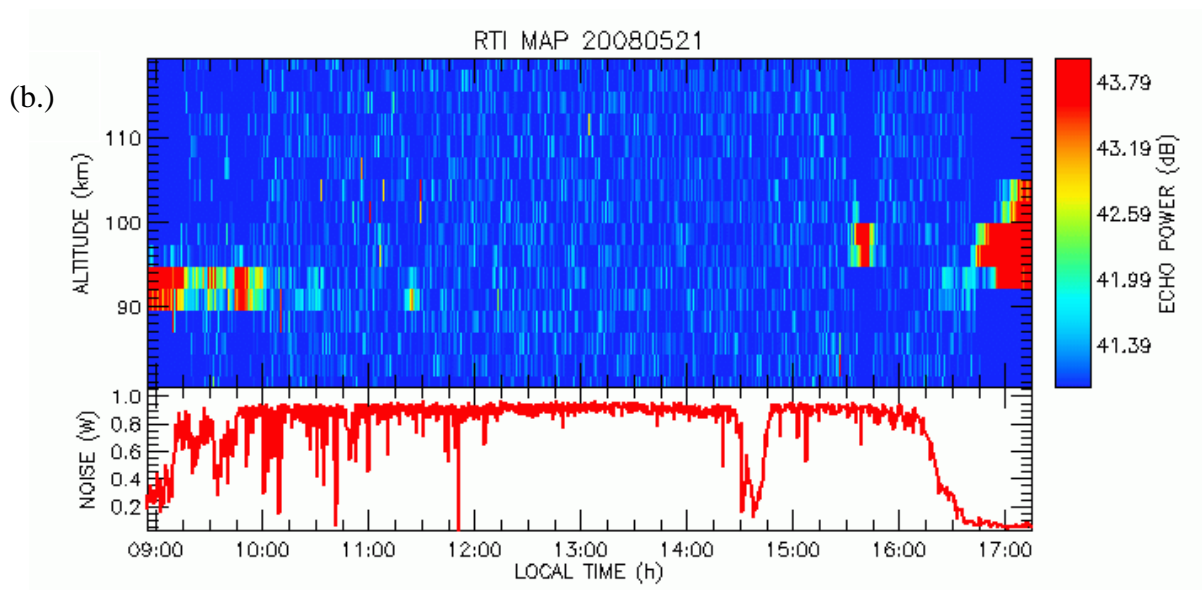
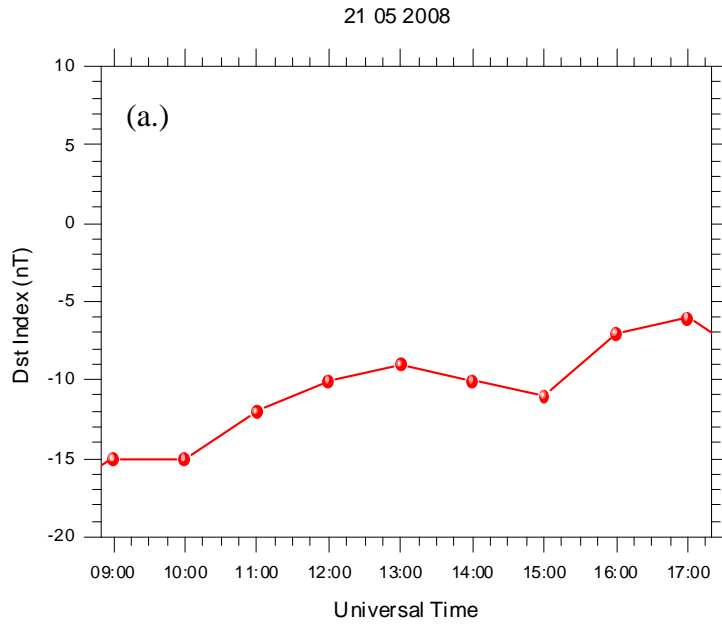
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	11:40	12:05	98 km	106 km	Positivo
2	14:15	16:20	93 km	103 km	Negativo
3	15:15	17:20	90 km	90 km	Negativo

3) Ondeleta:

	Início:	Término:	Período (min):	
EJC	14:50	16:30	64 *	
	14:35	16:45	16, 32	
EJT	14:50	16:30	32	64*

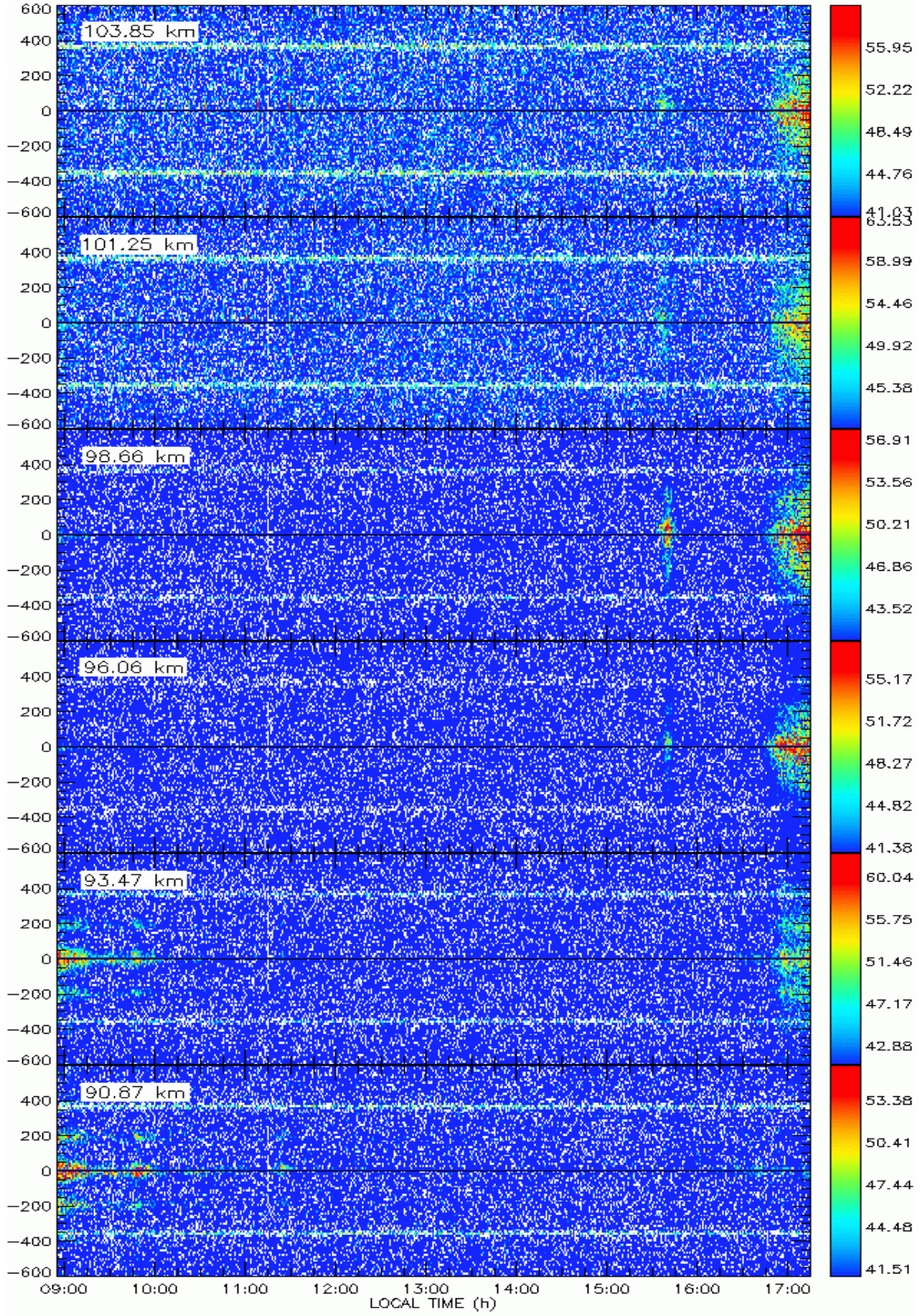
* afetado pelo cone de influência.

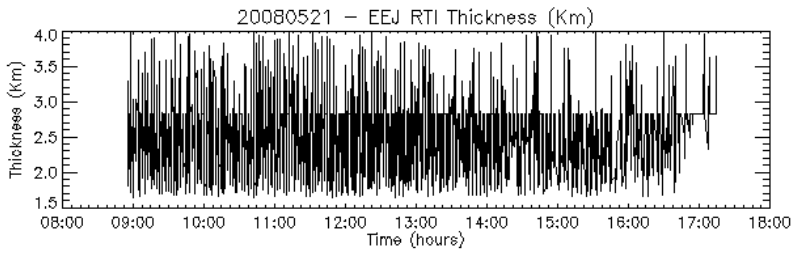
Resumo das Características do dia 21/05/2008



SPECTROGRAM 20080521

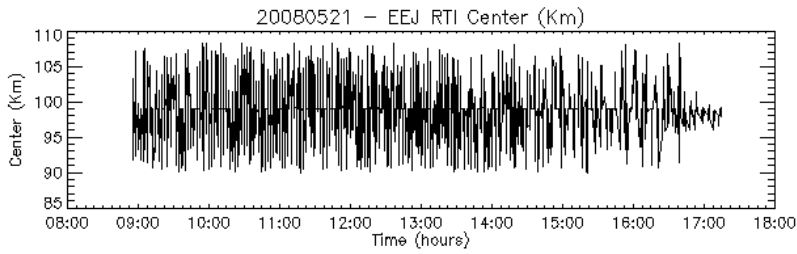
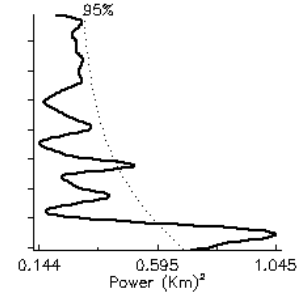
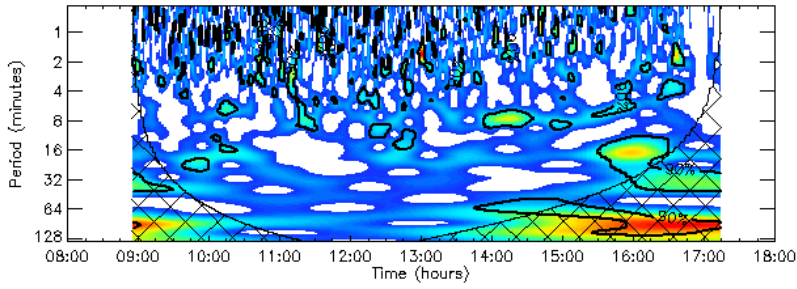
(c.)





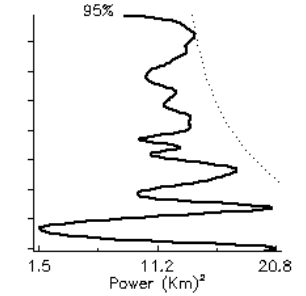
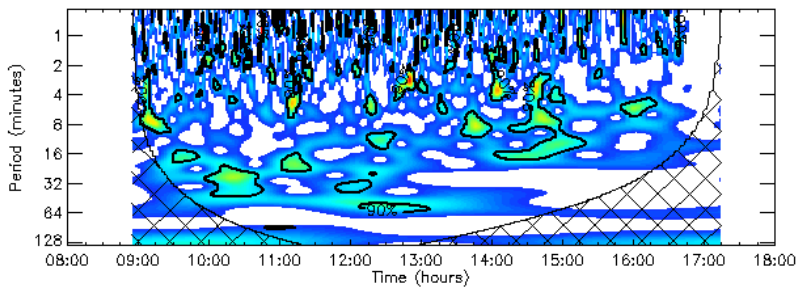
Original Variance = 0.289712
 Reconstructed Var = 0.239225
 Ratio Orig/Recon = 0.825733
 Recon Series RMS Err = 0.114018

(d.)



Original Variance = 12.9403
 Reconstructed Var = 10.8161
 Ratio Orig/Recon = 0.835845
 Recon Series RMS Err = 0.756125

(e.)



Data: 21 de maio de 2008

Início de Operação: 09:00

Fim de Operação: 17:10

Variação do Dst: -15 a -5 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	09:00	10:00	92 km
2	15:30	15:45	96 km
3	16:45	17:15	96 km

2) Comportamento no Espectrograma:

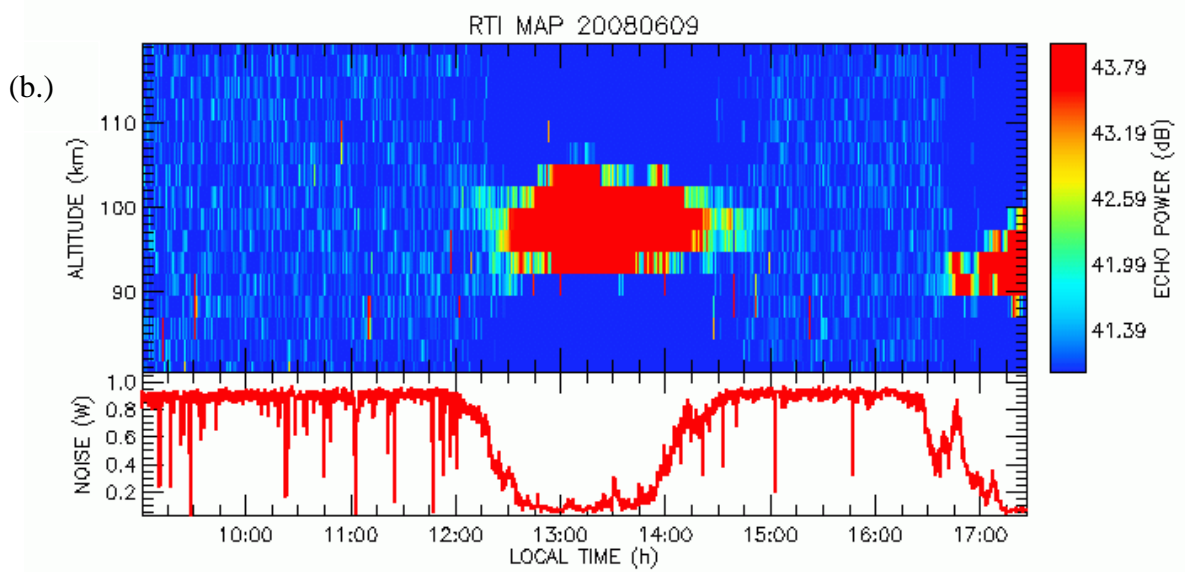
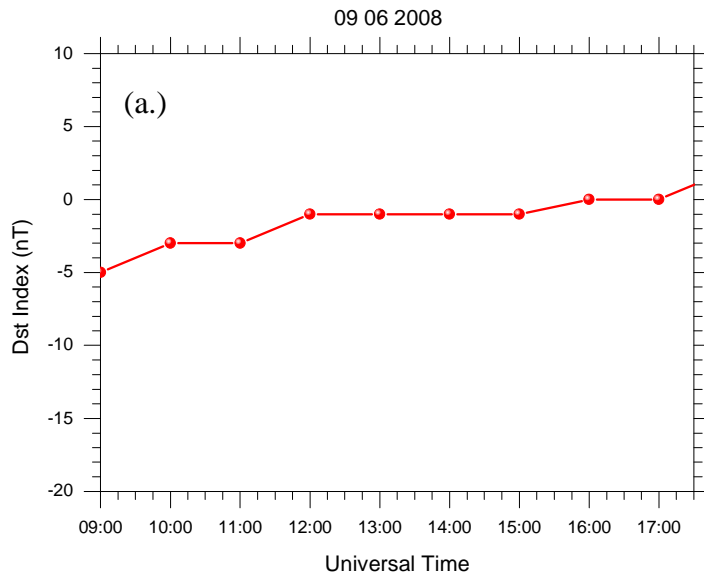
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	09:00	10:00	90 km	93 km	Negativo
2	15:30	15:45	98 km	98 km	Positivo
3	16:45	17:15	93 km	103 km	Negativo

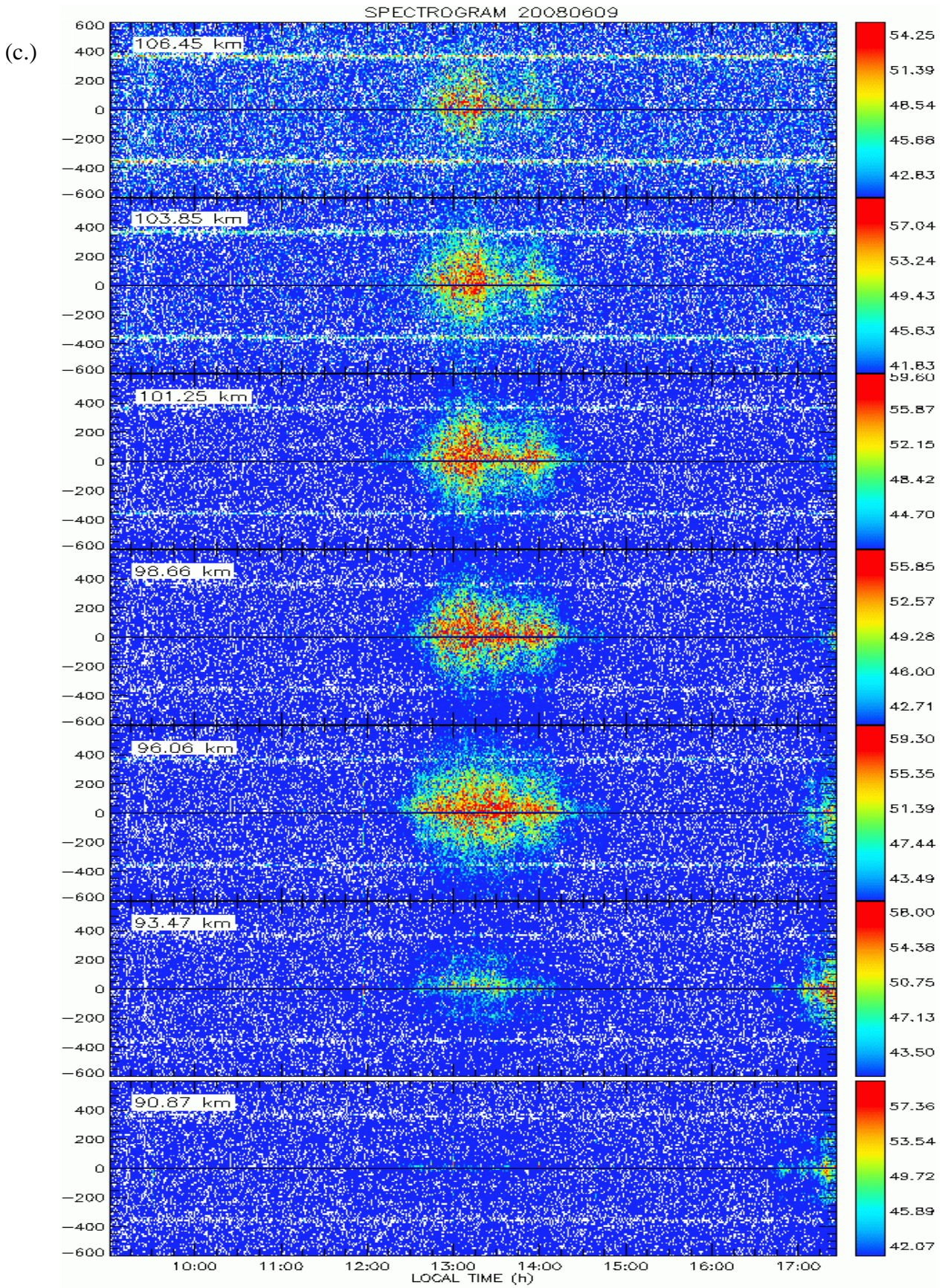
3) Ondeleta:

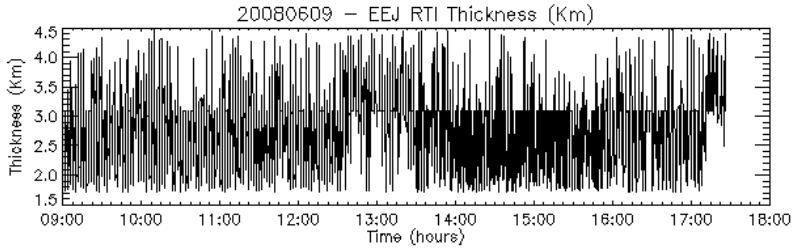
	Início:	Término:	Período (min):	
EJC	13:50	14:20	8	
	15:30	16:30	16 *	
EJT	09:55	10:45	32	
	09:30	09:50	16	
	11:00	11:30	16	
	12:00	13:30	64	
	13:30	14:00	8	
	14:00	15:15	8	16

* afetado pelo cone de influência

Resumo das Características do dia 09/06/2008

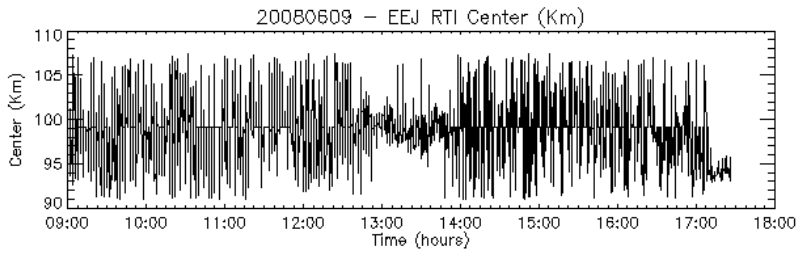
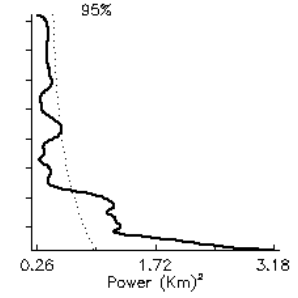
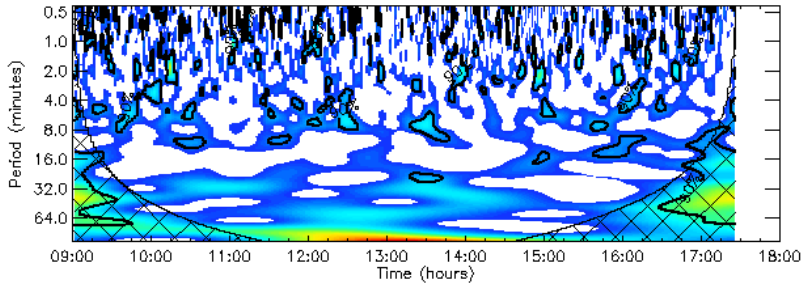






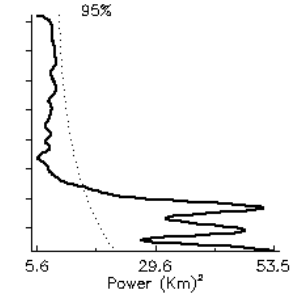
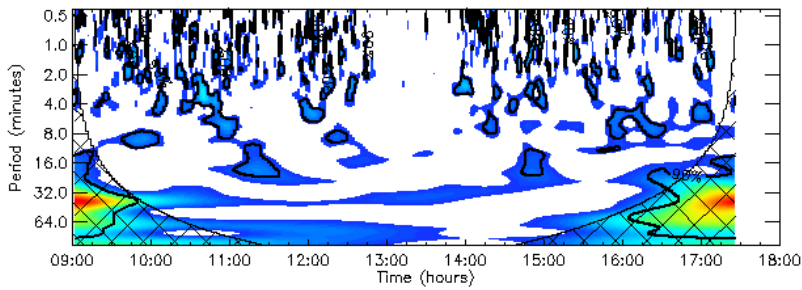
Original Variance = 0.423863
 Reconstructed Var = 0.338295
 Ratio Orig/Recon = 0.798123
 Recon Series RMS Err = 0.190980

(d.)



Original Variance = 9.29111
 Reconstructed Var = 7.61562
 Ratio Orig/Recon = 0.819668
 Recon Series RMS Err = 0.794896

(e.)



Data: 09 de junho de 2008

Início de Operação: 09:00

Fim de Operação: 17:20

Variação do Dst: -5 a 2 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	12:30	14:30	98 km
2	16:40	17:20	92 km

2) Comportamento no Espectrograma:

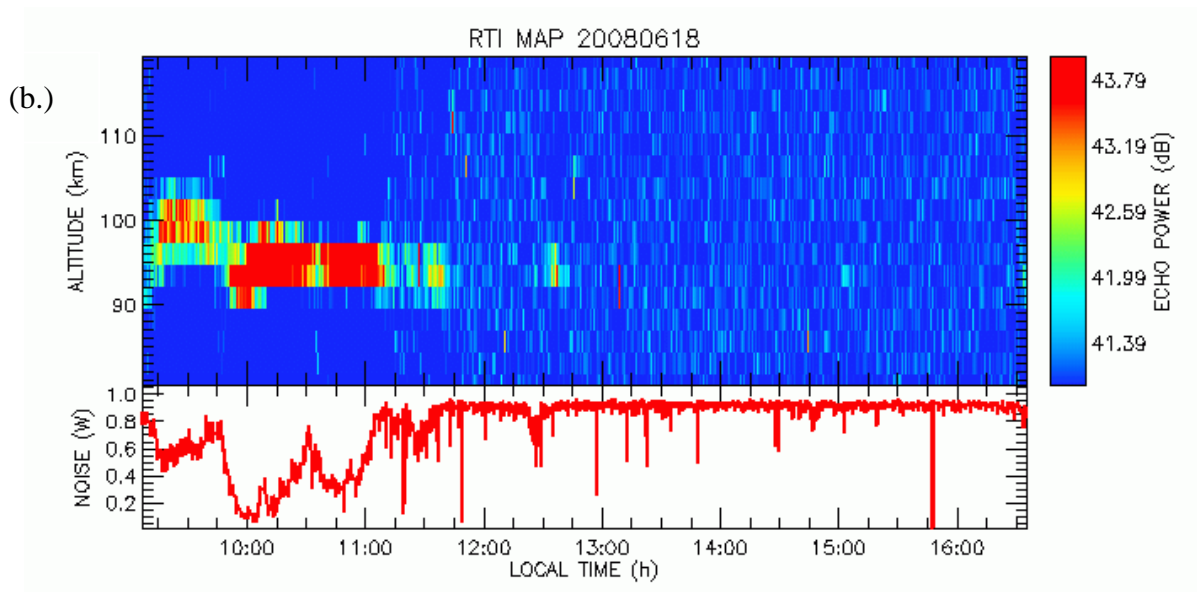
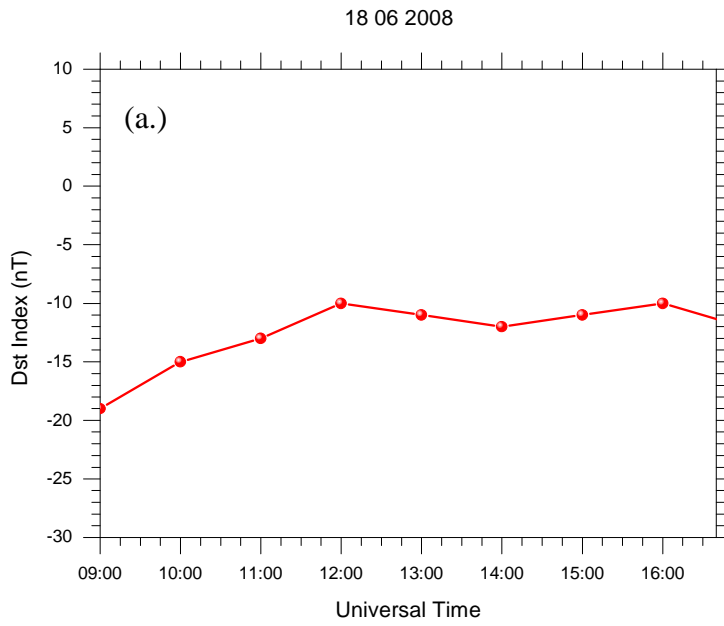
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	12:30	14:30	93 km	106 km	Positivo
2	17:00	17:20	90 km	96 km	Negativo

3) Ondeleta:

	Início:	Término:	Período (min):
EJC	13:20	13:45	8
EJT	09:00	09:45	32*
	11:00	11:40	16
	14:45	15:00	16
	16:00	17:20	16, 32, 64*

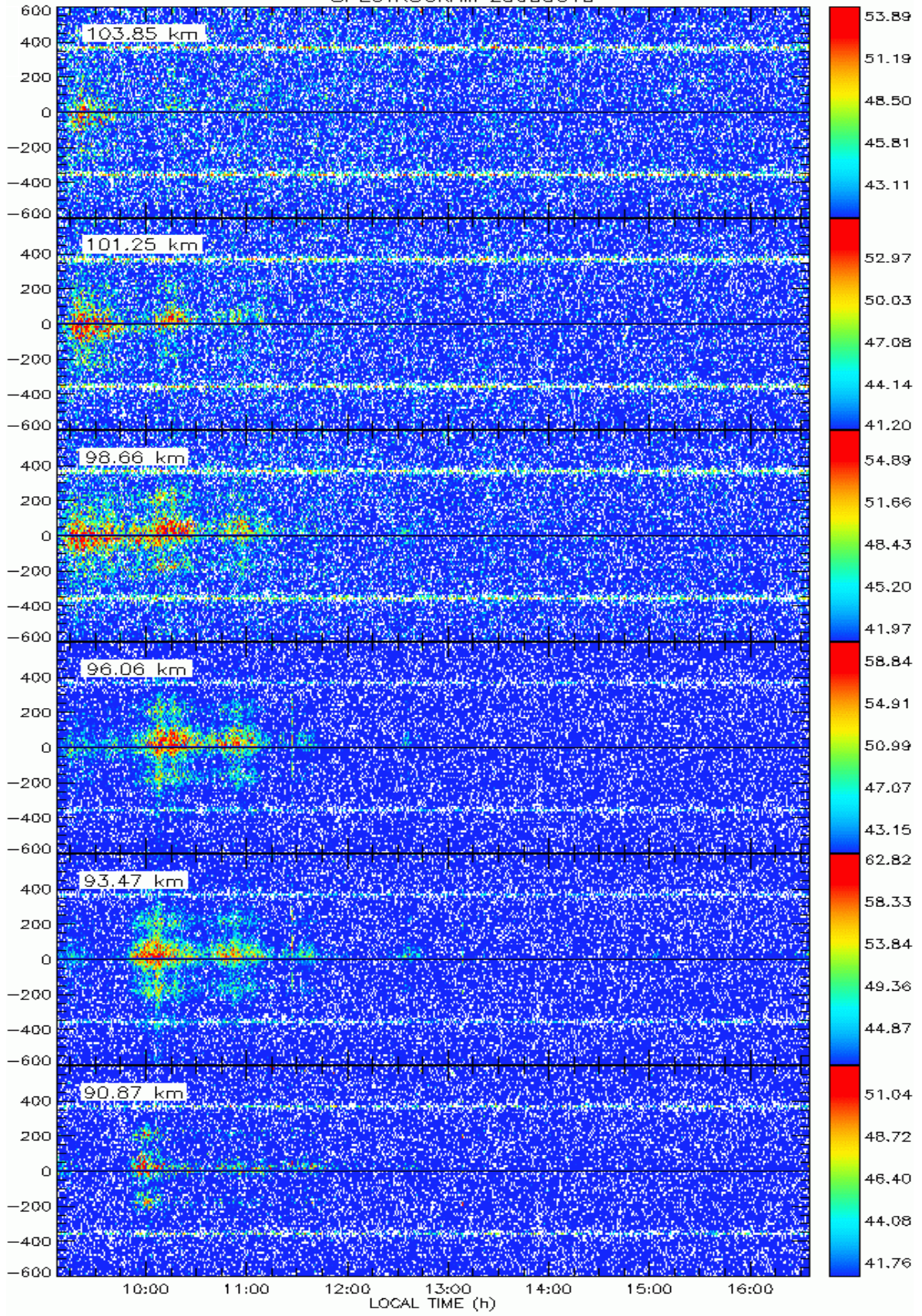
*afetado pela zona de influência.

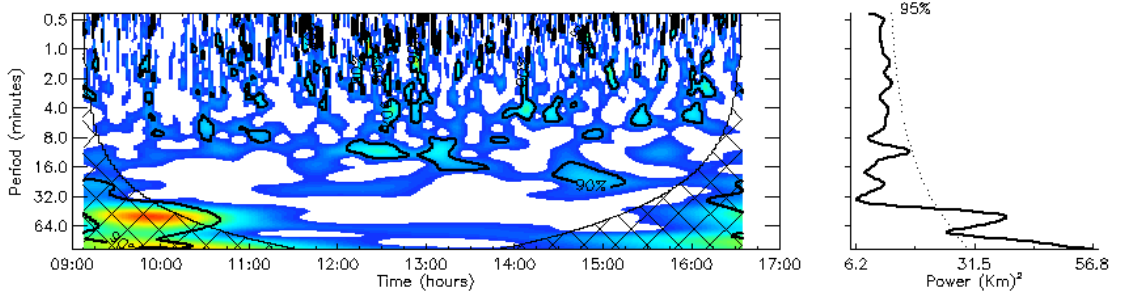
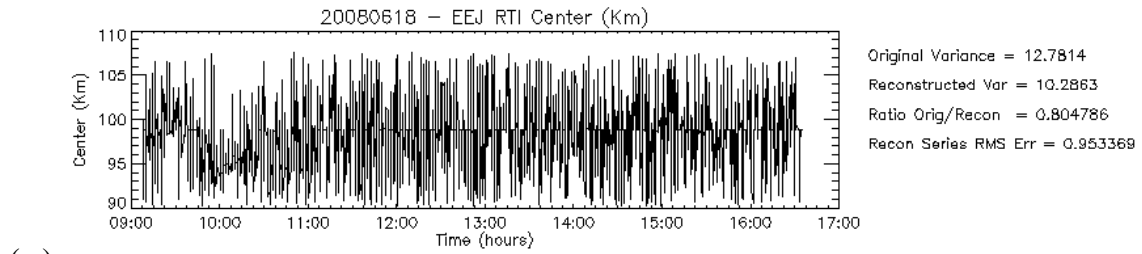
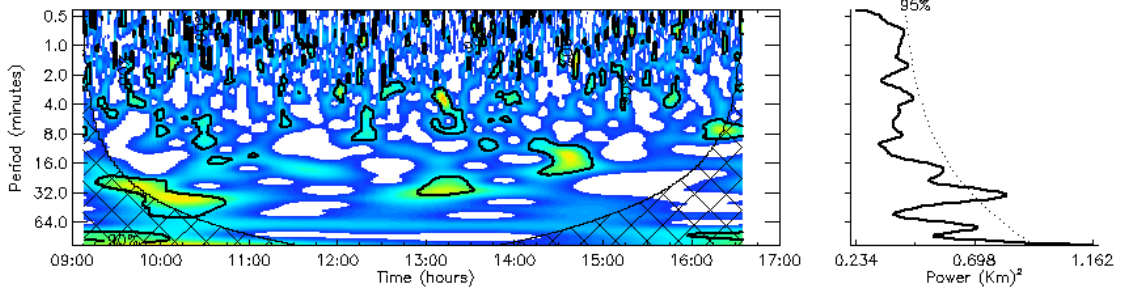
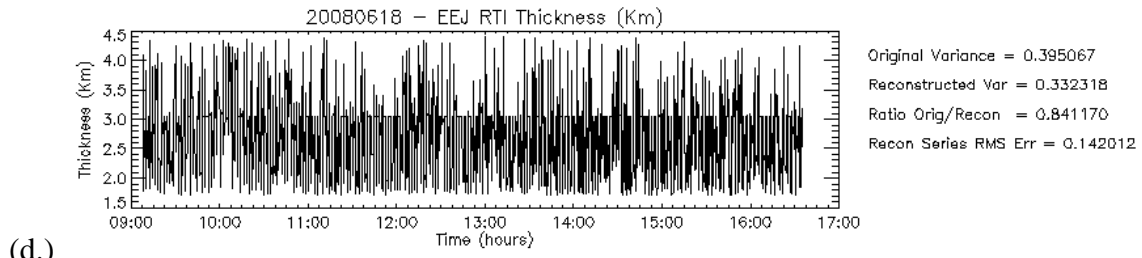
Resumo das Características do dia 18/06/2008



SPECTROGRAM 20080618

(c.)





Data: 18 de junho de 2008

Início de Operação: 09:00

Fim de Operação: 16:30

Variação do Dst: -19 a -8 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	09:15	09:50	100 km
2	09:50	11:10	95 km

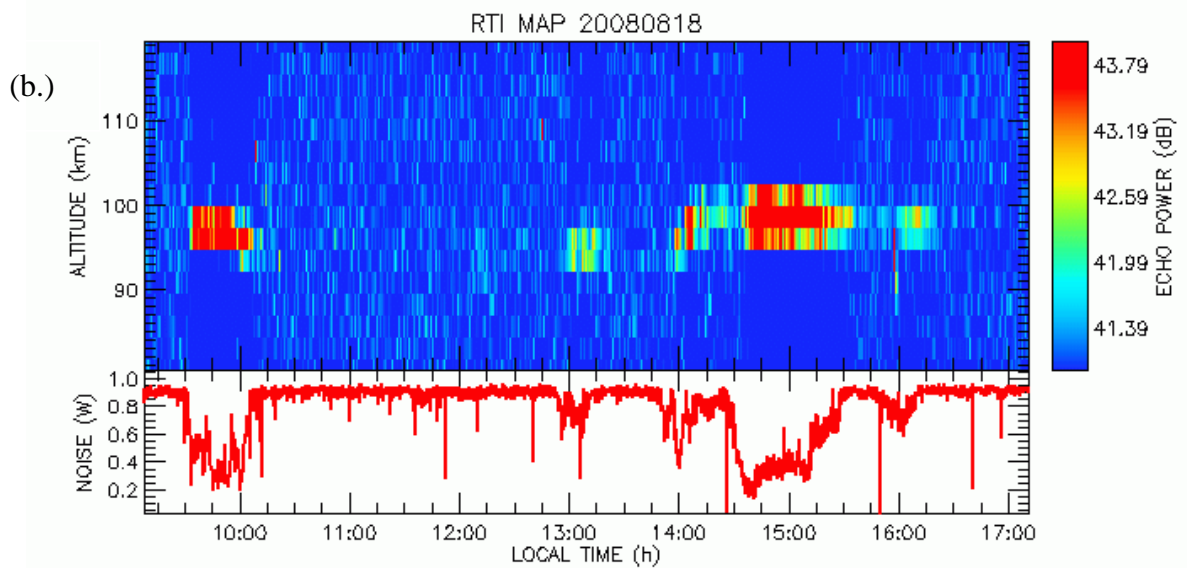
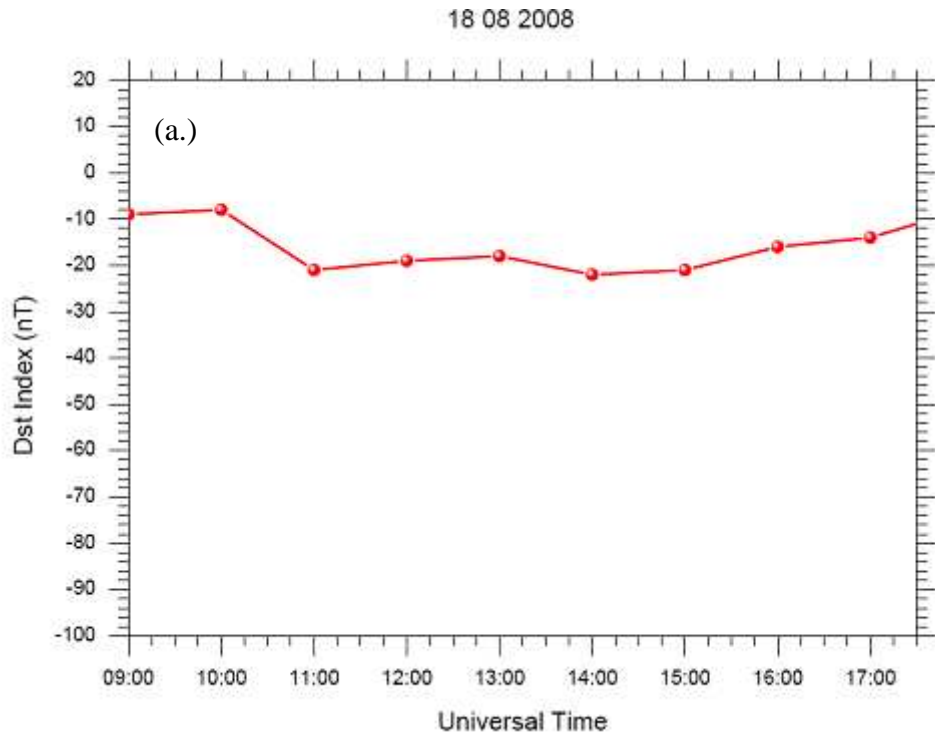
2) Comportamento no Espectrograma:

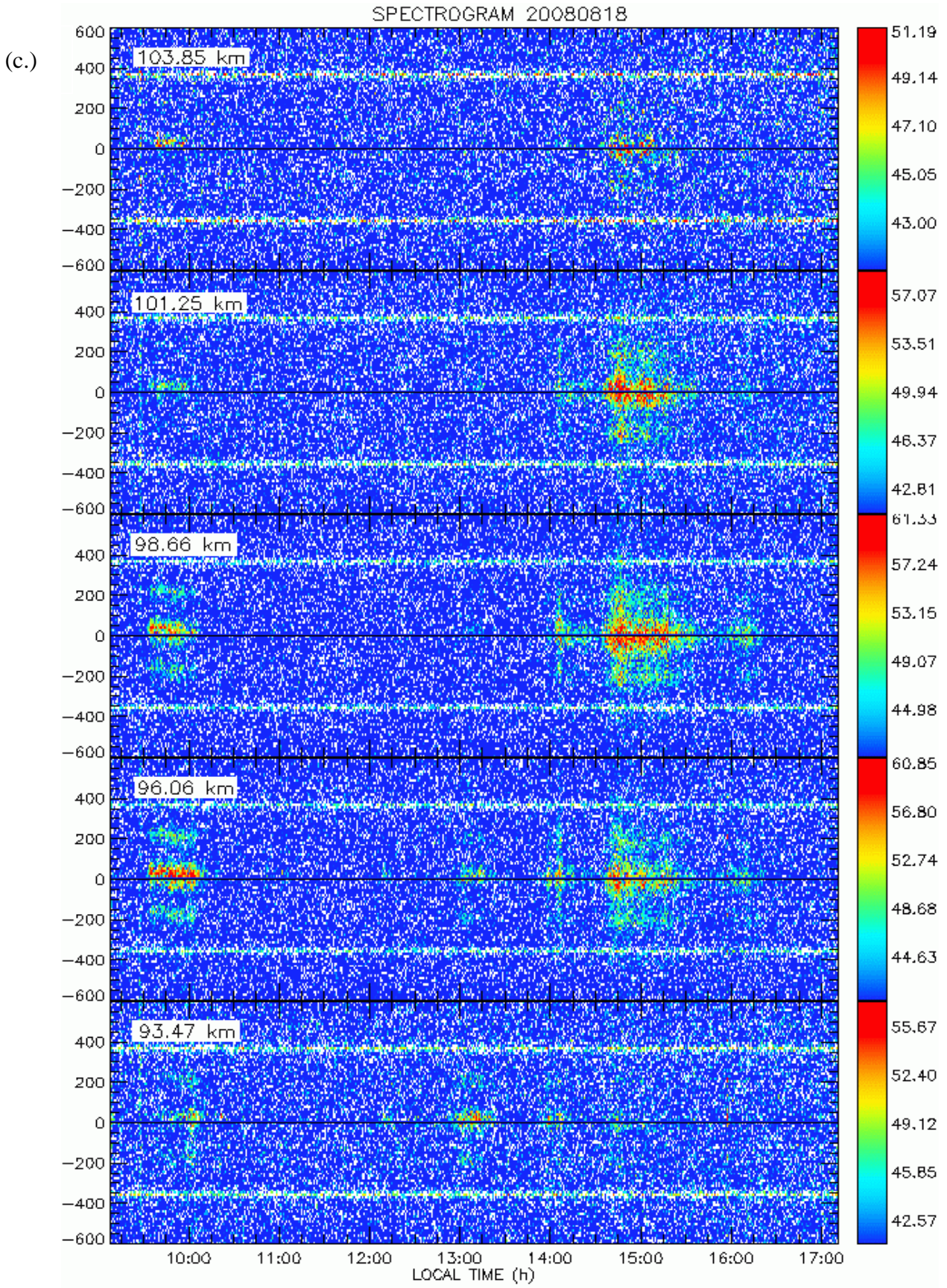
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	09:15	10:45	103 km	103 km	Negativo
2	09:50	11:30	90 km	101 km	Positivo
3	09:15	11:15	90 km	96 km	Positivo

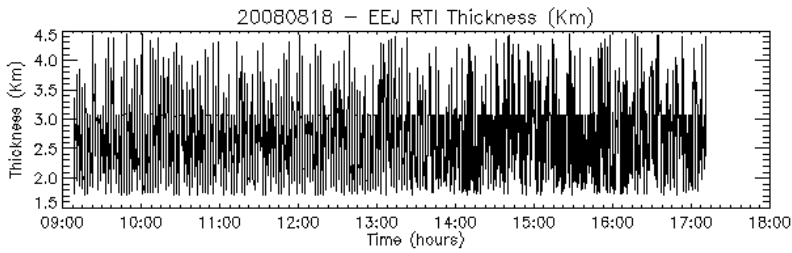
3) Ondeleta:

	Início:	Término:	Período (min):
EJC	09:15	10:45	32, 64*
	12:50	13:45	32
	14:10	14:55	16
EJT	09:00	10:40	64*
	12:05	12:45	8
	12:50	13:40	16
	14:25	15:15	16

Resumo das Características do dia 18/08/2008

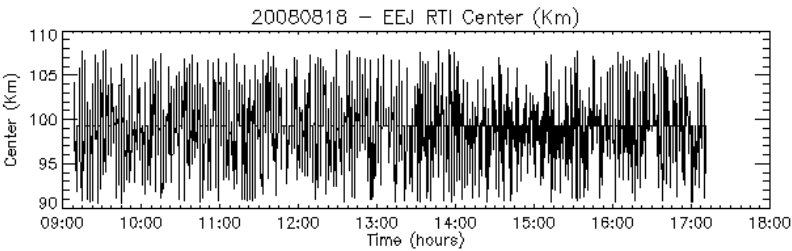
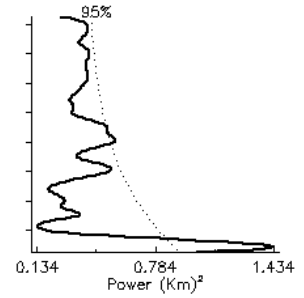
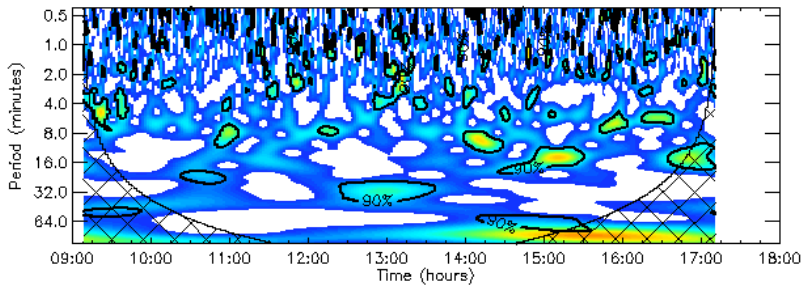






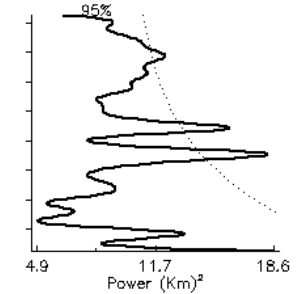
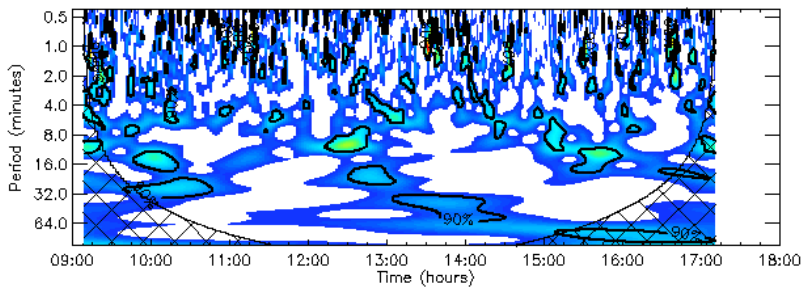
Original Variance = 0.399583
 Reconstructed Var = 0.334357
 Ratio Orig/Recon = 0.836763
 Recon Series RMS Err = 0.130254

(d.)



Original Variance = 10.2989
 Reconstructed Var = 8.74016
 Ratio Orig/Recon = 0.848649
 Recon Series RMS Err = 0.638574

(e.)



Data: 18 de agosto de 2008

Início de Operação: 09:00

Fim de Operação: 17:00

Varição do Dst: -21 a -8 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	09:30	10:15	97 km
2	14:30	15:40	97 km
3	13:00	13:20	94 km
4	14:00	14:20	97 km

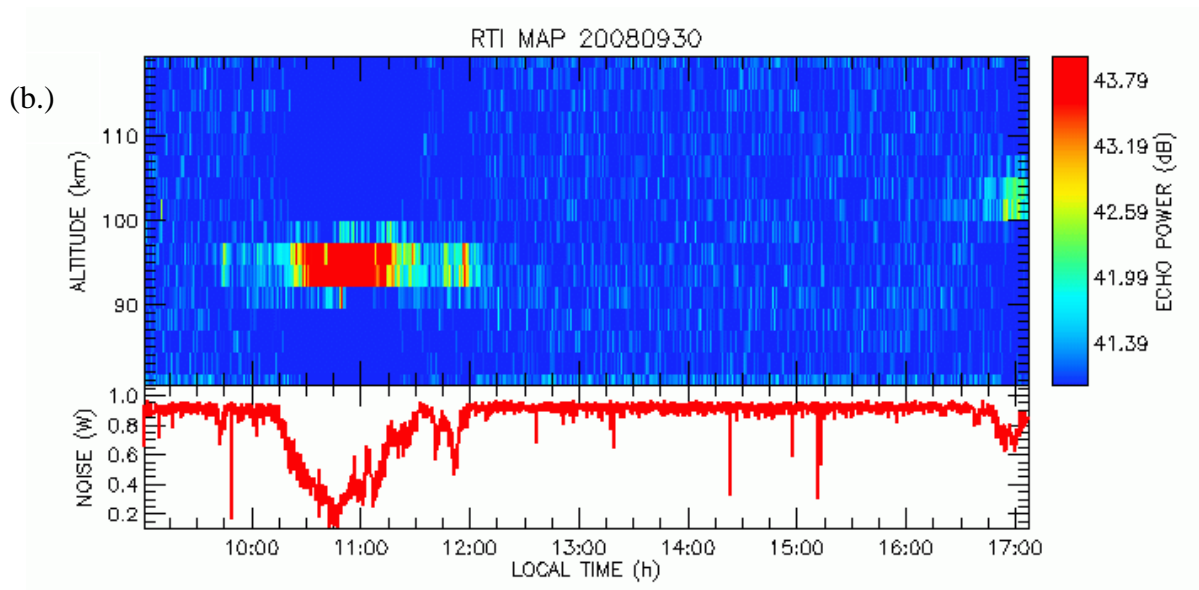
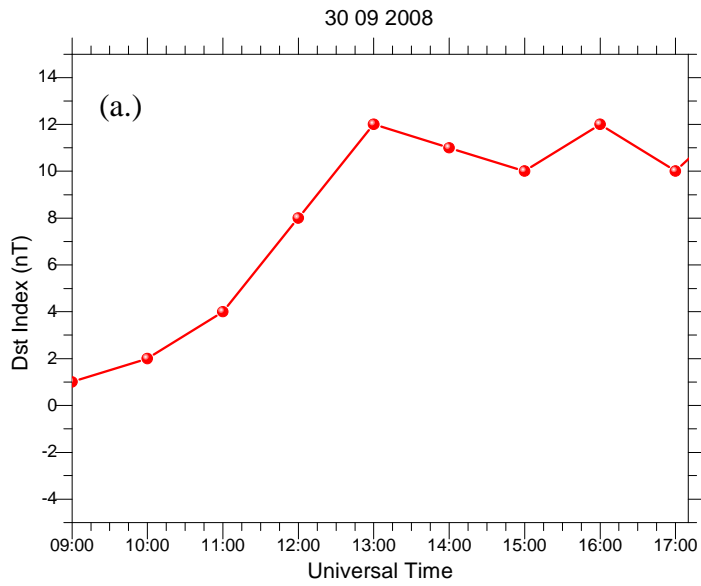
2) Comportamento no Espectrograma:

	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	09:30	10:10	93 km	103 km	Positivo
2	14:35	15:30	96 km	101 km	Negativo
3	12:50	13:20	93 km	96 km	Positivo
4	13:50	14:10	93 km	98 km	Positivo

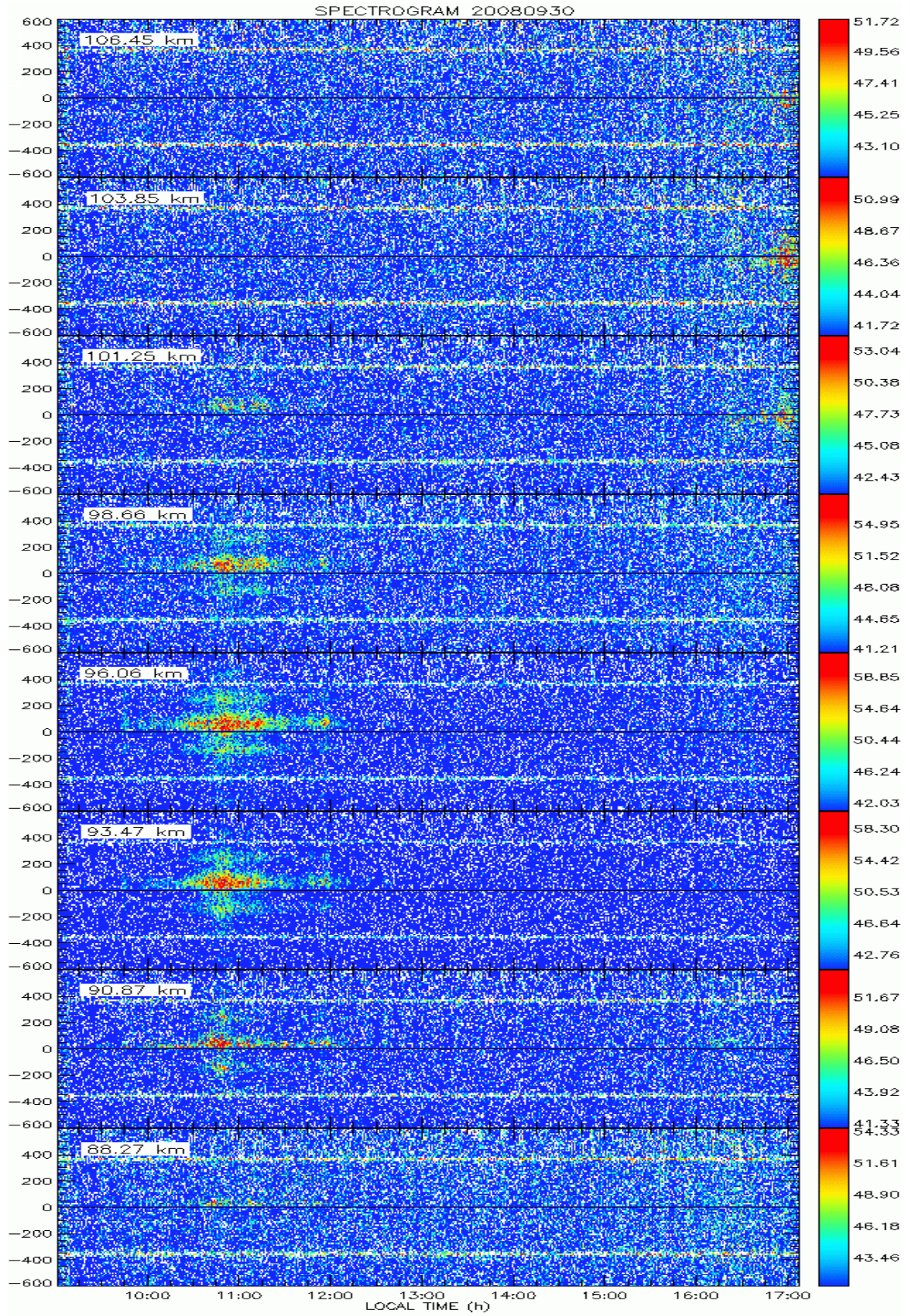
3) Ondeleta:

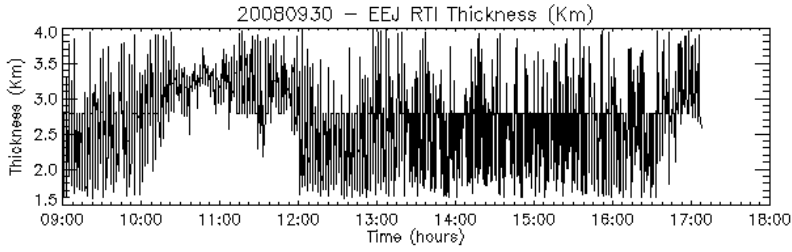
	Início:	Término:	Período (min):
EJC	10:15	11:00	16
	10:45	11:10	8
	12:20	13:40	32
	13:55	14:30	8
	14:25	15:30	16
	14:10	15:40	64*
	15:45	16:00	4; 8
	16:10	16:35	4; 8
EJT	09:40	10:45	32*
	09:45	10:20	16
	12:15	12:45	8
	12:30	13:10	16; 32
	13:10	14:35	32; 64
	15:00	15:20	8
	15:25	16:00	16

Resumo das Características do dia 30/09/2008



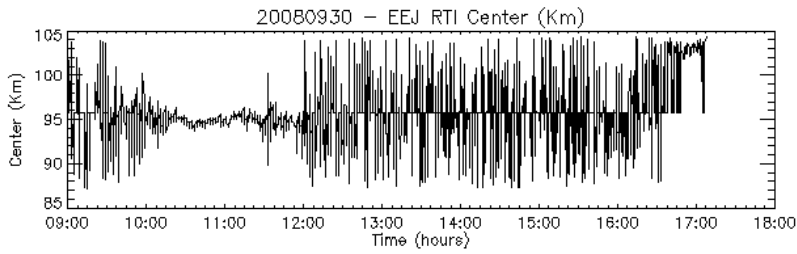
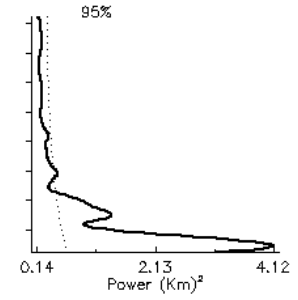
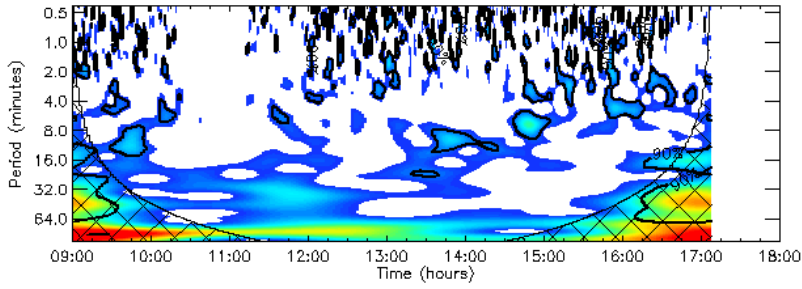
(c.)





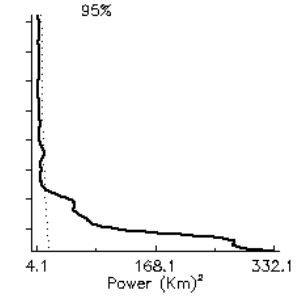
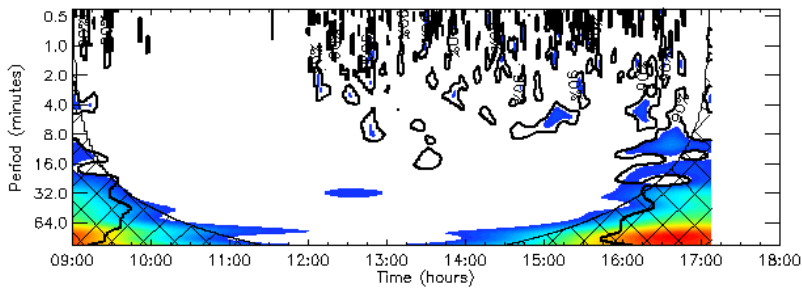
Original Variance = 0.274858
 Reconstructed Var = 0.188976
 Ratio Orig/Recon = 0.687542
 Recon Series RMS Err = 0.241868

(d.)



Original Variance = 8.85726
 Reconstructed Var = 6.43336
 Ratio Orig/Recon = 0.726338
 Recon Series RMS Err = 1.19752

(e.)



Data: 30 de setembro de 2008

Início de Operação: 09:00

Fim de Operação: 17:10

Variação do Dst: 1 a 13 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	10:20	12:00	95 km
2	16:50	17:10	102 km

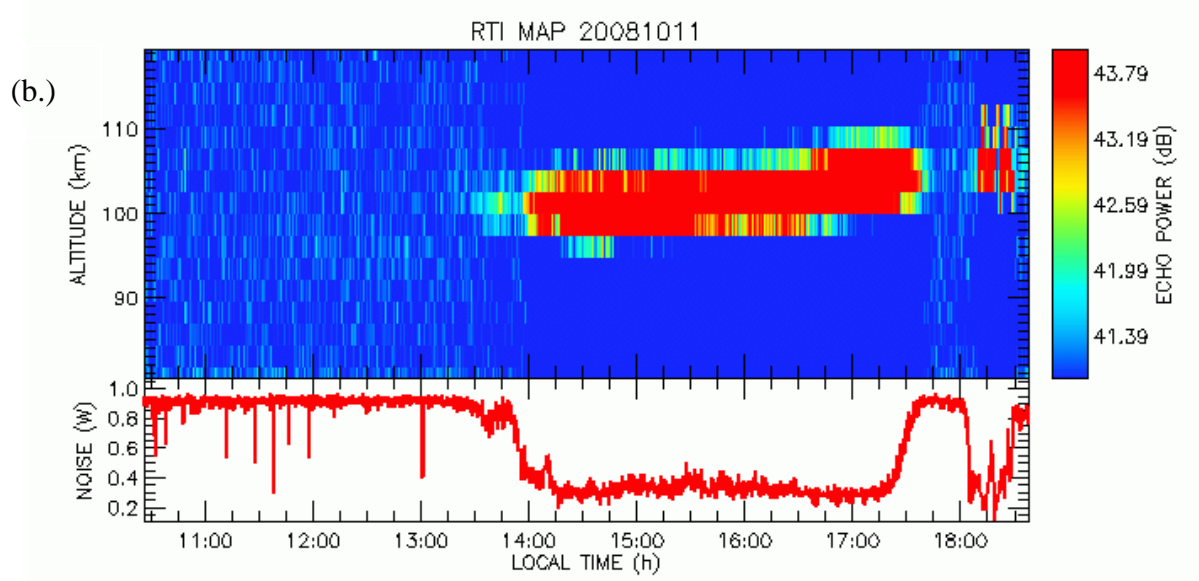
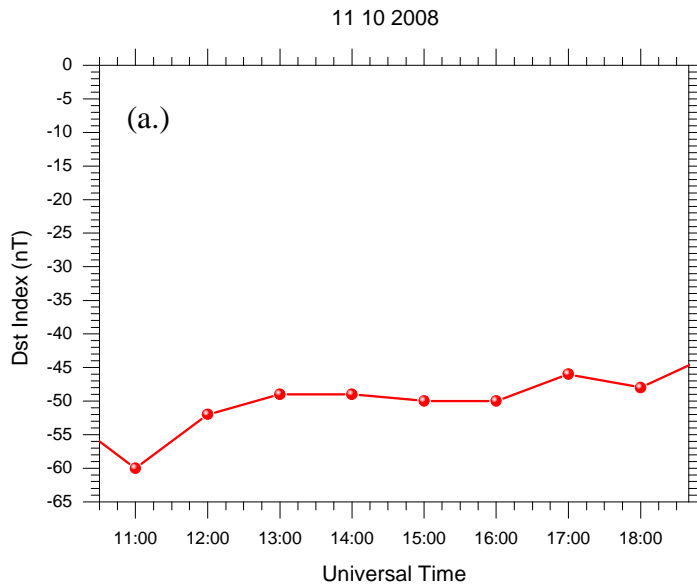
2) Comportamento no Espectrograma:

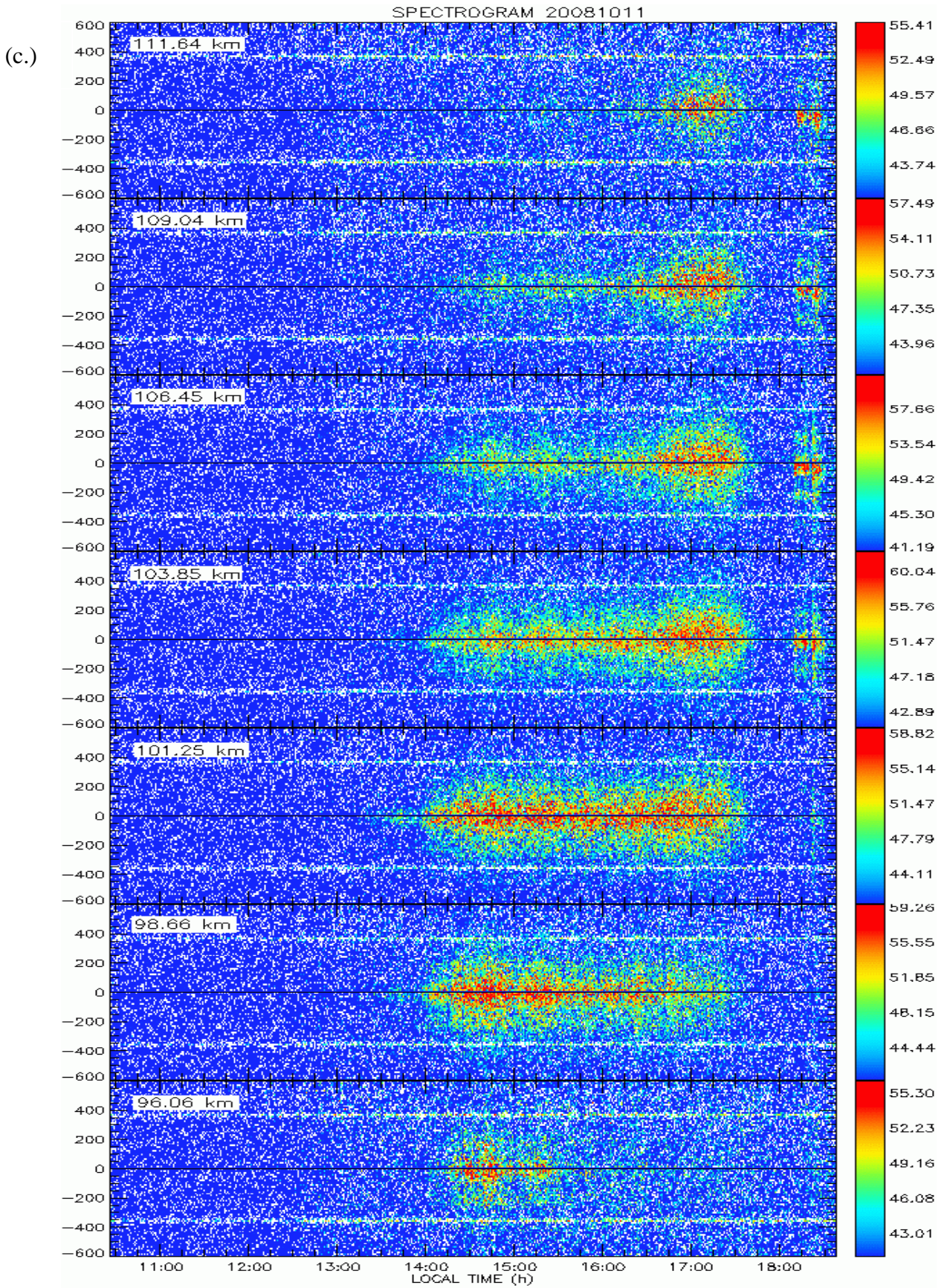
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	10:15	12:00	90 km	101 km	Positivo
2	16:30	17:10	101 km	106 km	Negativo

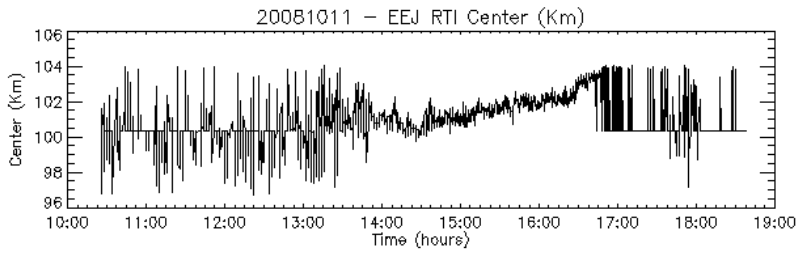
3) Ondeleta:

	Início:	Término:	Período (min):
EJC	13:20	13:40	16
	13:35	14:20	8
	14:35	15:00	4; 8
EJT	13:20	13:45	8; 16

Resumo das Características do dia 11/10/2008

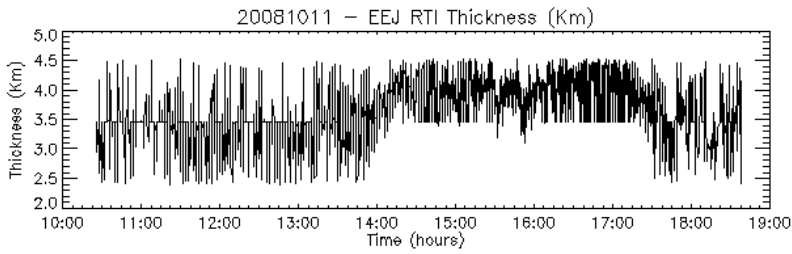
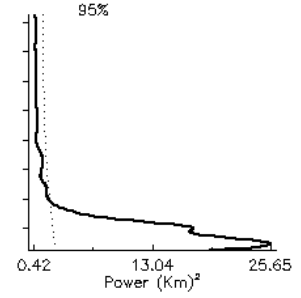
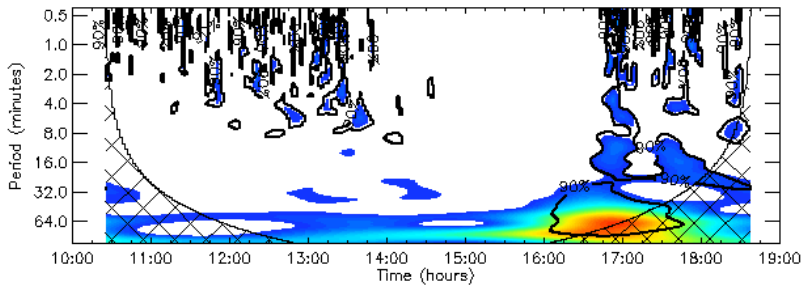






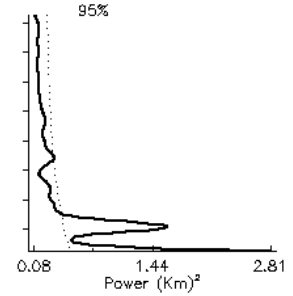
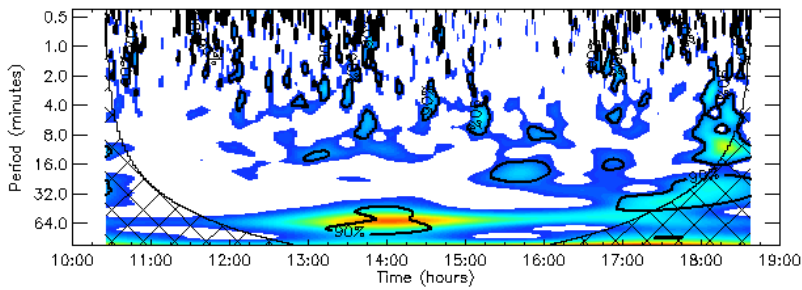
Original Variance = 1.18836
 Reconstructed Var = 0.623195
 Ratio Orig/Recon = 0.524417
 Recon Series RMS Err = 0.688726

(d.)



Original Variance = 0.212760
 Reconstructed Var = 0.119675
 Ratio Orig/Recon = 0.562487
 Recon Series RMS Err = 0.275649

(e.)



Data: 11 de outubro de 2008

Início de Operação: 10:30

Fim de Operação: 18:30

Varição do Dst: -60 a -45 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	13:45	15:30	100 km
2	15:30	17:40	103 km
3	18:10	18:30	107 km**

** apresenta oscilações.

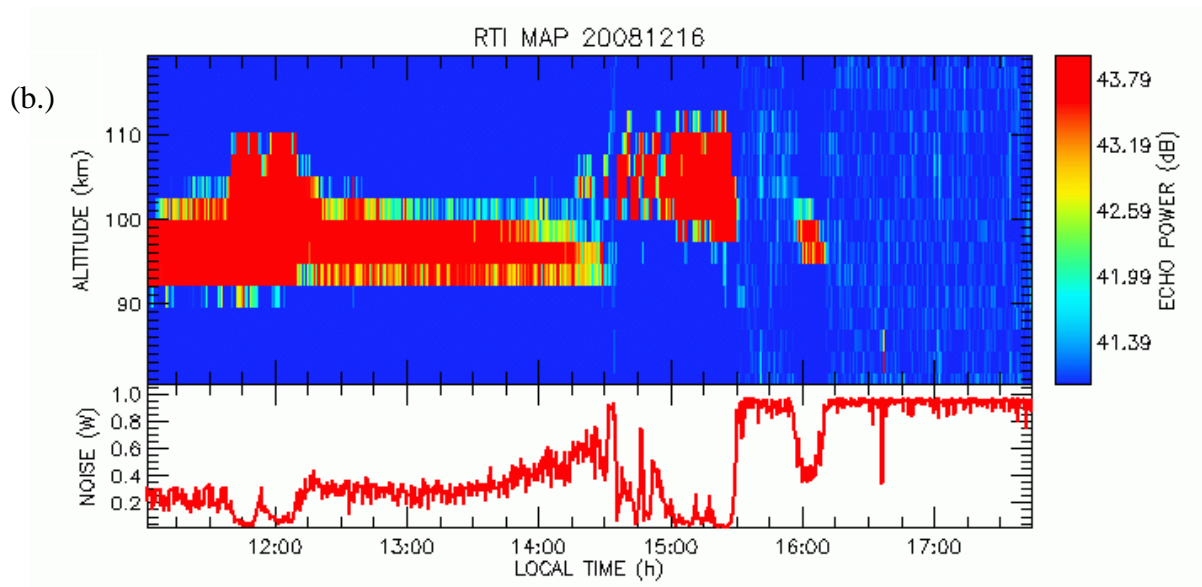
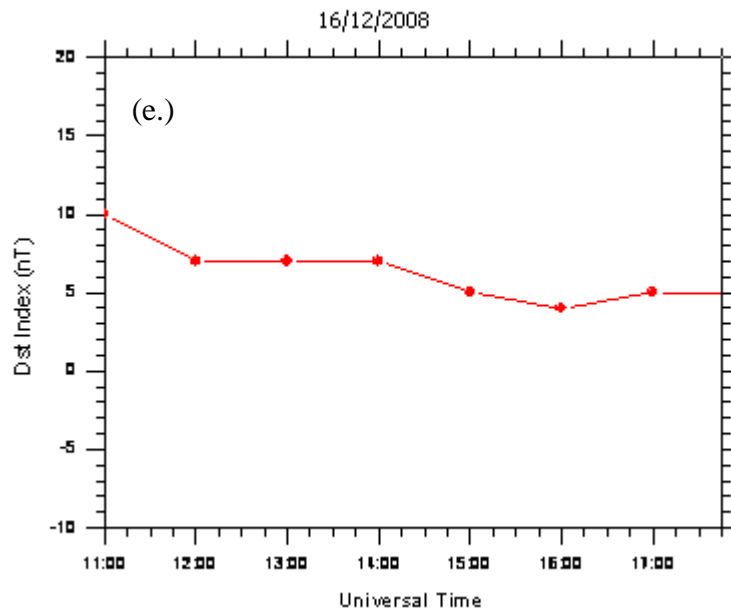
2) Comportamento no Espectrograma:

	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	14:00	15:30	96 km	98 km	Positivo
2	14:00	17:40	98 km	109 km	Positivo
3	18:10	18:30	103 km	111 km	Negativo
4	16:30	17:40	109 km	111 km	Positivo

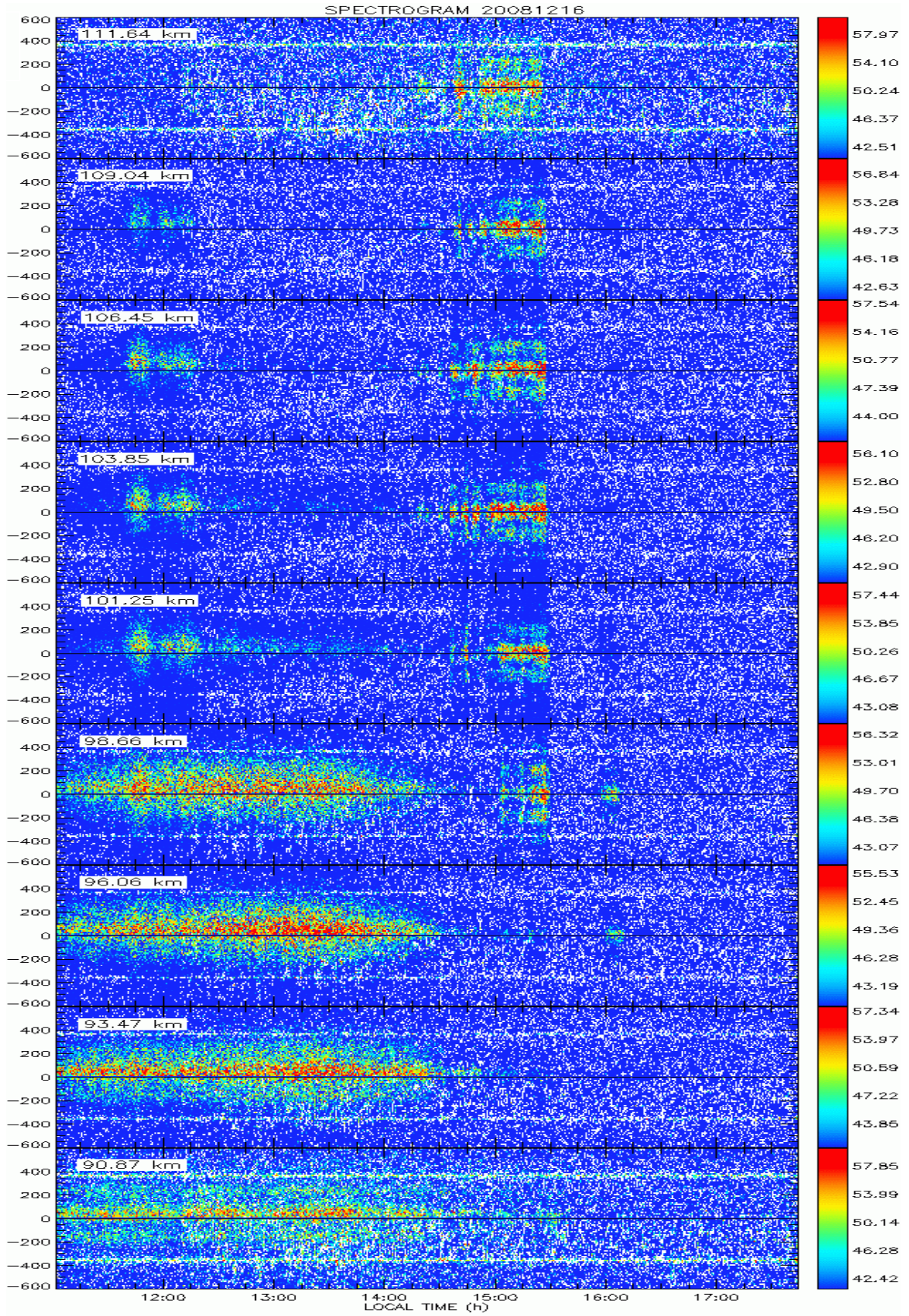
3) Ondeleta:

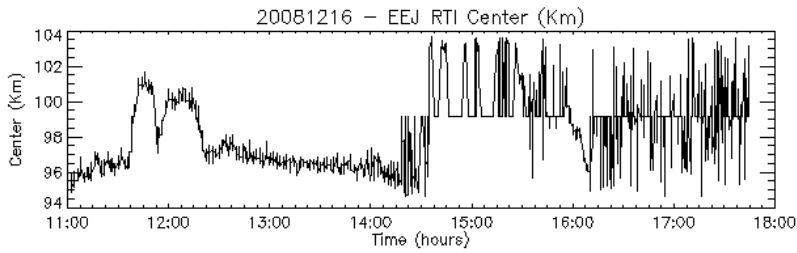
	Início:	Término:	Período (min):		
EJC	16:00	17:45	64*		
	16:30	18:35	16; 32	16	8
EJT	13:15	14:40	64		
	15:15	16:05	16		
	16:55	18:40	32*		
	17:50	18:40	4; 8*		

Resumo das Características do dia 16/12/2008



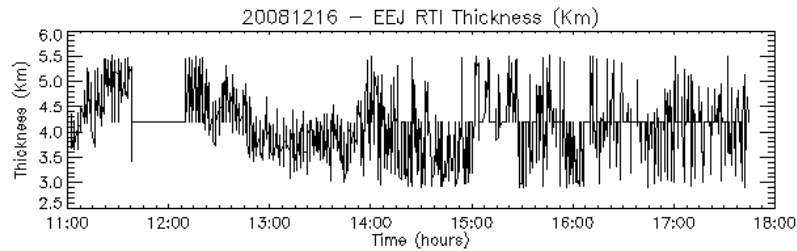
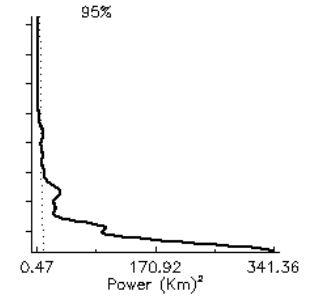
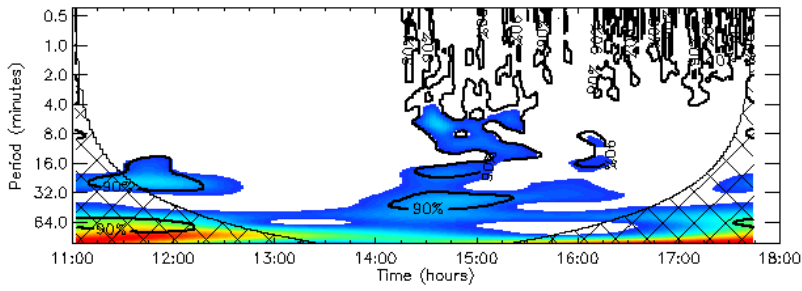
(c.)





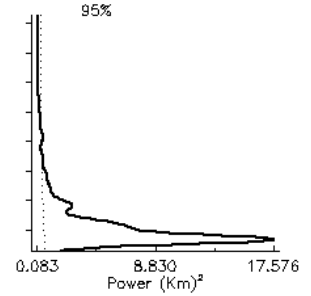
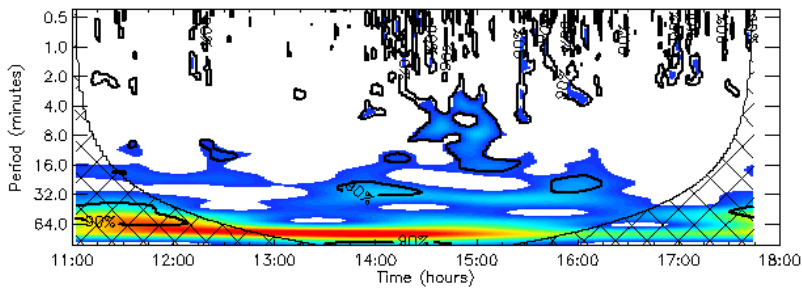
Original Variance = 3.85250
 Reconstructed Var = 2.00412
 Ratio Orig/Recon = 0.520212
 Recon Series RMS Err = 1.23985

(d.)



Original Variance = 0.265958
 Reconstructed Var = 0.204297
 Ratio Orig/Recon = 0.768158
 Recon Series RMS Err = 0.212287

(e.)



Data: 16 de dezembro de 2008

Início de Operação: 11:00

Fim de Operação: 17:40

Variação do Dst: 4 a 10 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	11:00	14:30	96 km
2	14:30	15:30	105 km
3	15:55	16:15	97 km

2) Comportamento no Espectrograma:

	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	11:00	14:30	90 km	98 km	Positivo
2	14:30	15:30	98 km	111 km	Negativo**
3	11:40	12:20	101 km	109 km	Positivo

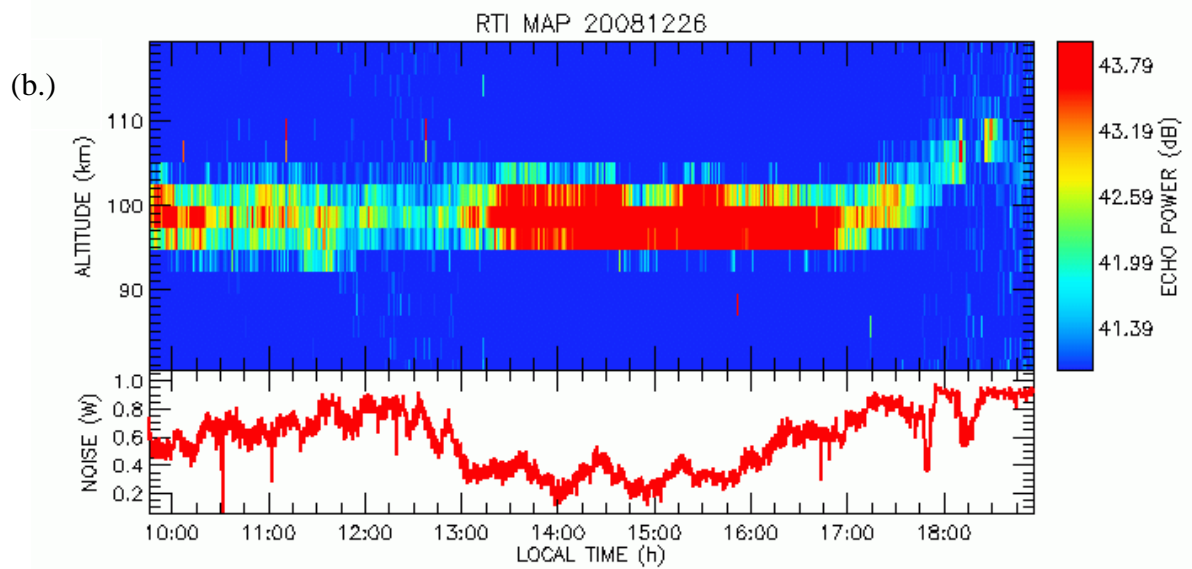
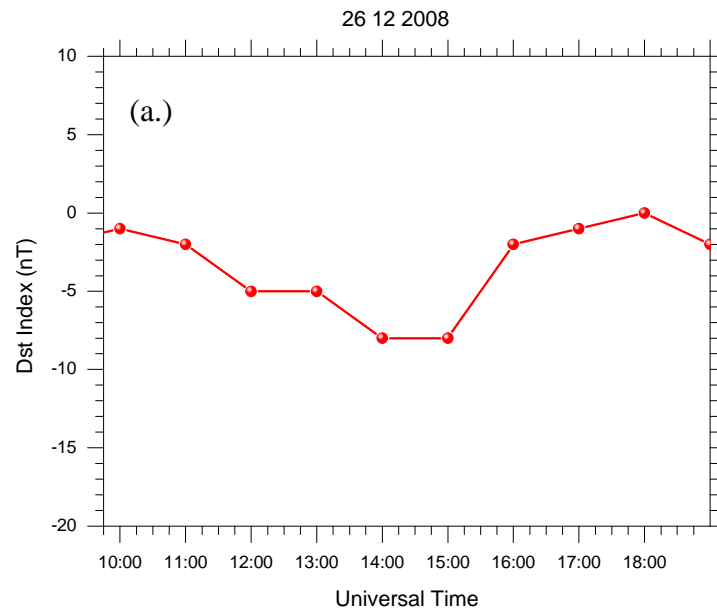
3) Ondeleta:

	Início:	Término:	Período (min):
EJC	11:00	13:00	64*
	14:10	15:20	32
	11:00	12:20	16; 32
	14:25	15:40	4; 8; 16
	16:00	16:20	8
EJT	11:00	15:45	64 *
	13:30	14:30	16
	14:20	15:30	4; 8; 16
	15:45	16:15	16; 32

* afetado pelo cone de influência.

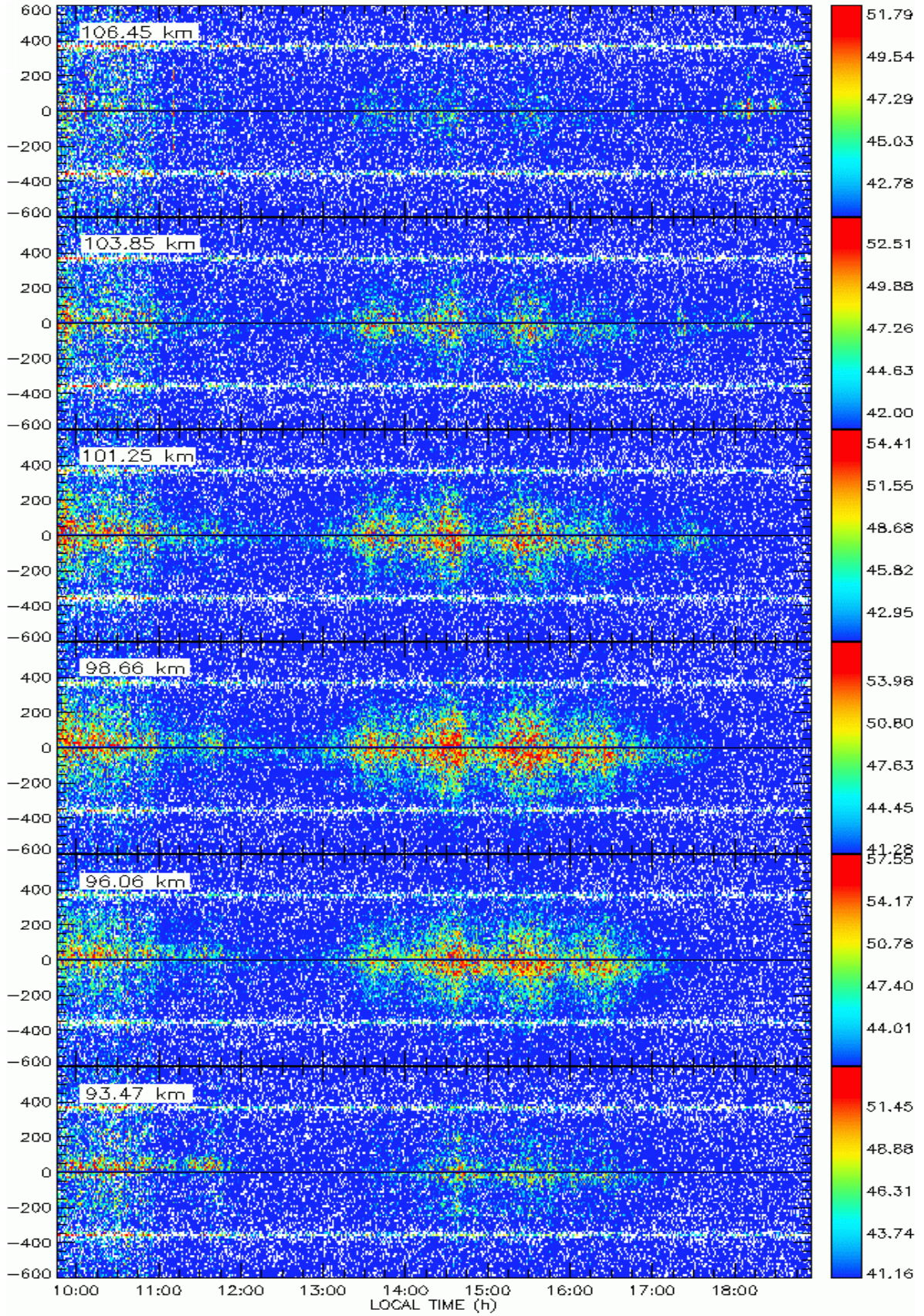
** apresenta oscilações.

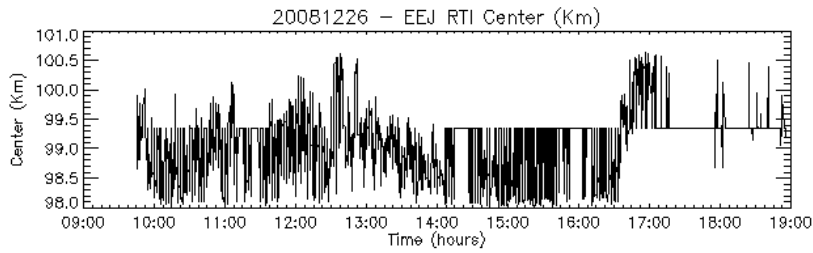
Resumo das Características do dia 26/12/2008



SPECTROGRAM 20081226

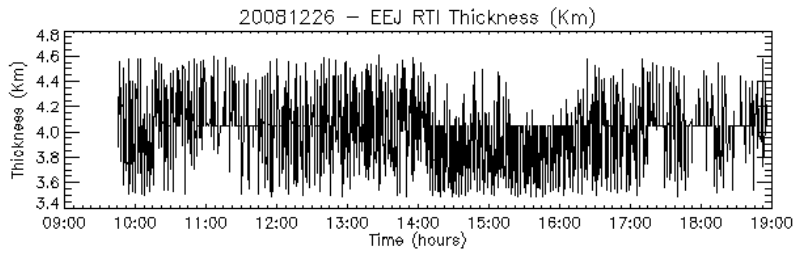
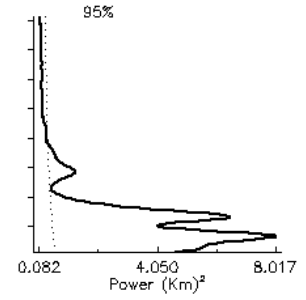
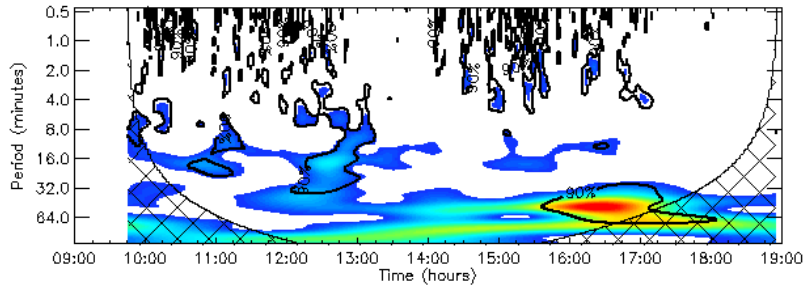
(c.)





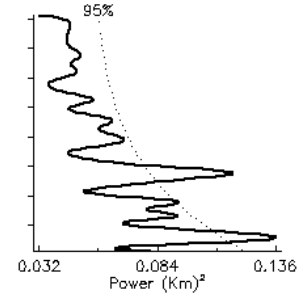
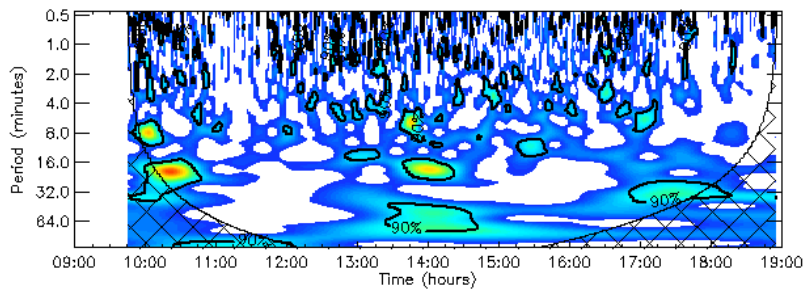
Original Variance = 0.265321
 Reconstructed Var = 0.197017
 Ratio Orig/Recon = 0.742563
 Recon Series RMS Err = 0.225298

(d.)



Original Variance = 0.0537903
 Reconstructed Var = 0.0401752
 Ratio Orig/Recon = 0.746885
 Recon Series RMS Err = 0.0886390

(e.)



Data: 26 de dezembro de 2008

Início de Operação: 09:50

Fim de Operação: 19:00

Variação do Dst: -8 a 2 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	09:50	17:15	98 km
2	17:15	18:30	105 km **

** apresenta oscilações (99 km a 108 km).

2) Comportamento no Espectrograma:

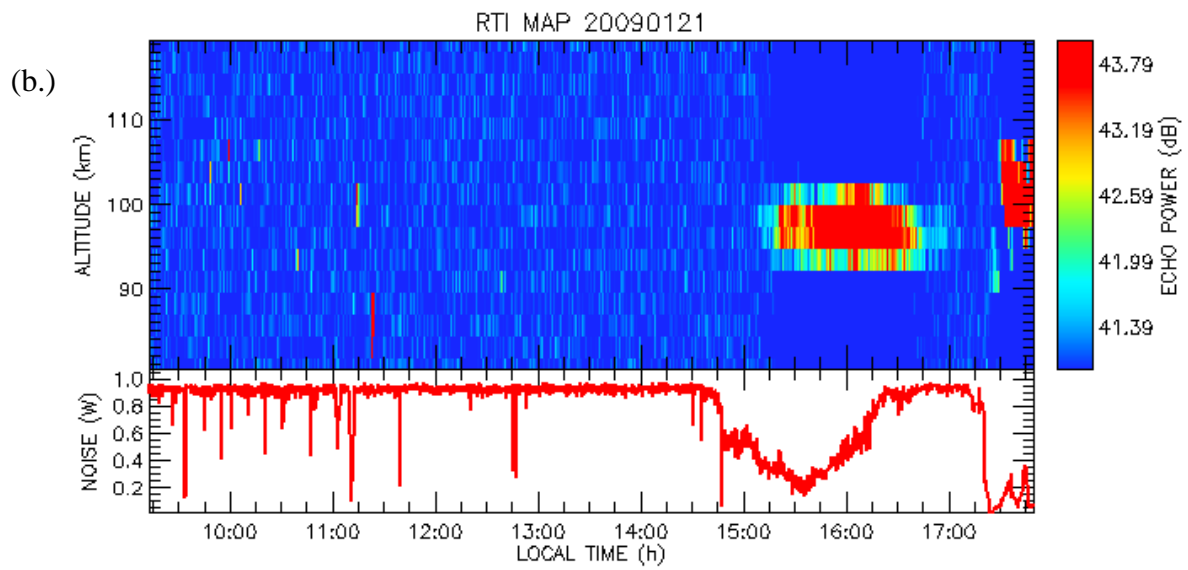
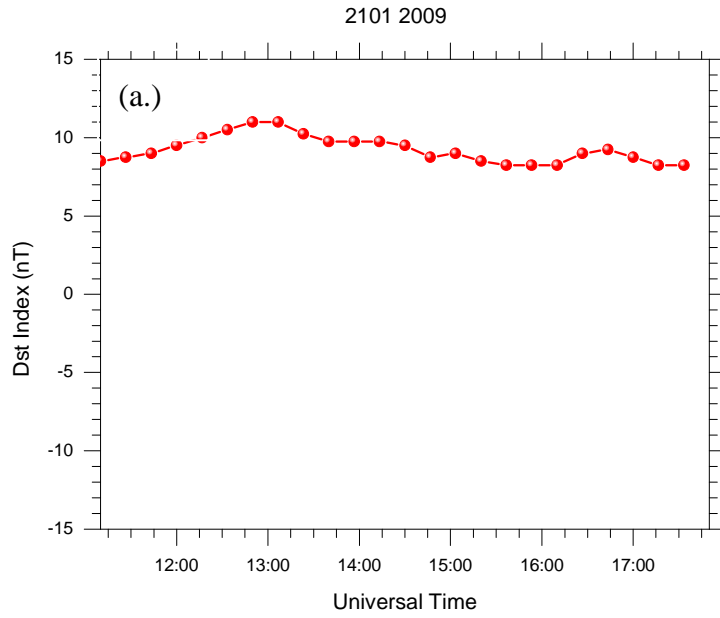
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	09:50	11:45	93 km	106 km	Positivo
2	13:15	17:00	96 km	103 km	Positivo
3	18:10	18:30	106 km	106 km	Negativo

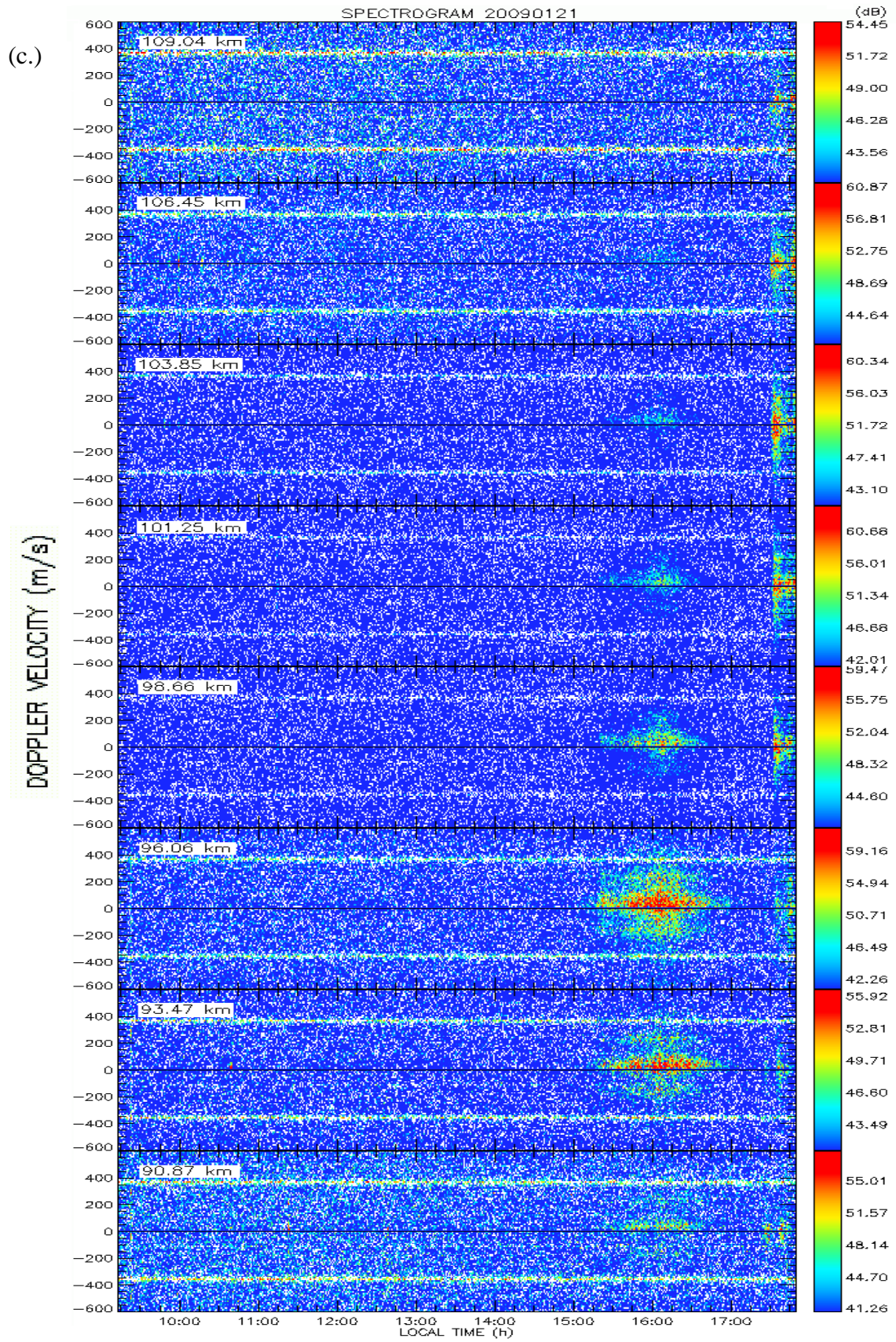
** apresenta oscilações.

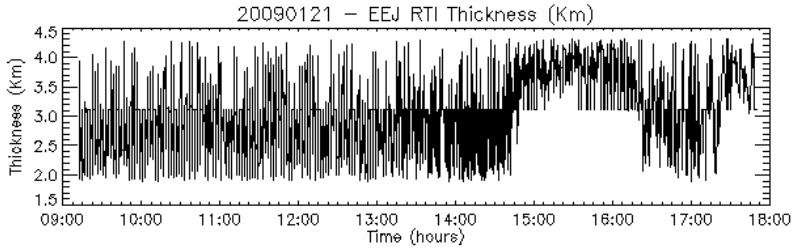
3) Ondeleta:

	Início:	Término:	Período (min):
EJC	12:00	13:15	4; 8; 16; 32
	10:40	11:15	16
	11:00	11:30	8; 16
	15:30	18:00	32*
EJT	09:50	10:45	16; 32*
	13:10	14:45	64
	13:20	14:20	16

Resumo das Características do dia 21/01/2009

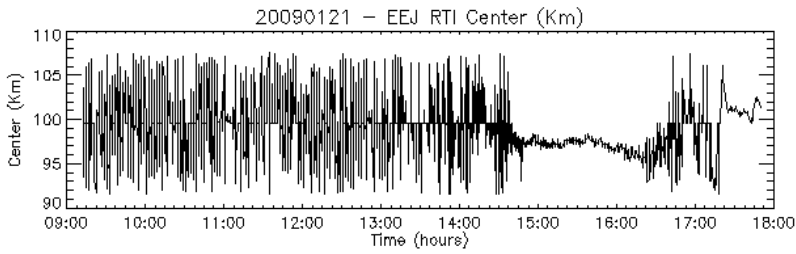
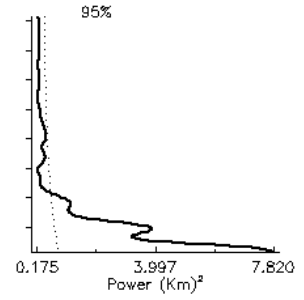
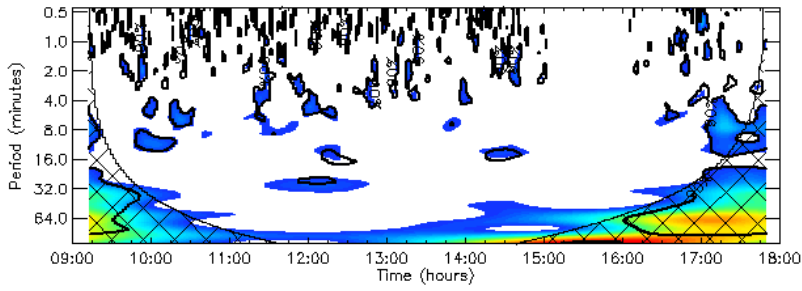






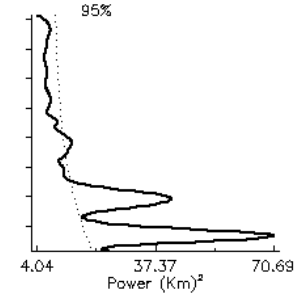
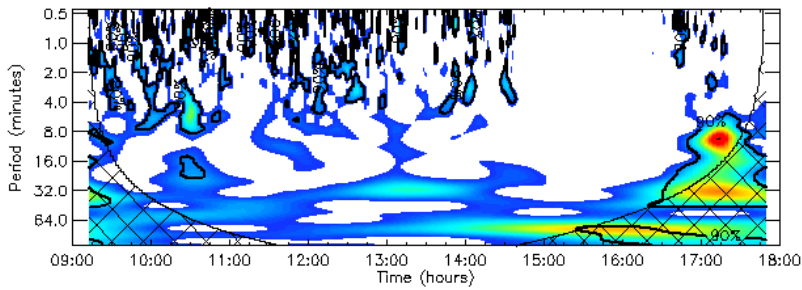
Original Variance = 0.370539
 Reconstructed Var = 0.232714
 Ratio Orig/Recon = 0.628042
 Recon Series RMS Err = 0.317867

(d.)



Original Variance = 8.51173
 Reconstructed Var = 6.46355
 Ratio Orig/Recon = 0.759370
 Recon Series RMS Err = 1.12085

(e.)



Data: 21 de janeiro de 2009

Início de Operação: 09:15

Fim de Operação: 17:50

Variação do Dst: 8 a 12 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	15:15	16:45	98 km
2	17:30	17:50	101 km

2) Comportamento no Espectrograma:

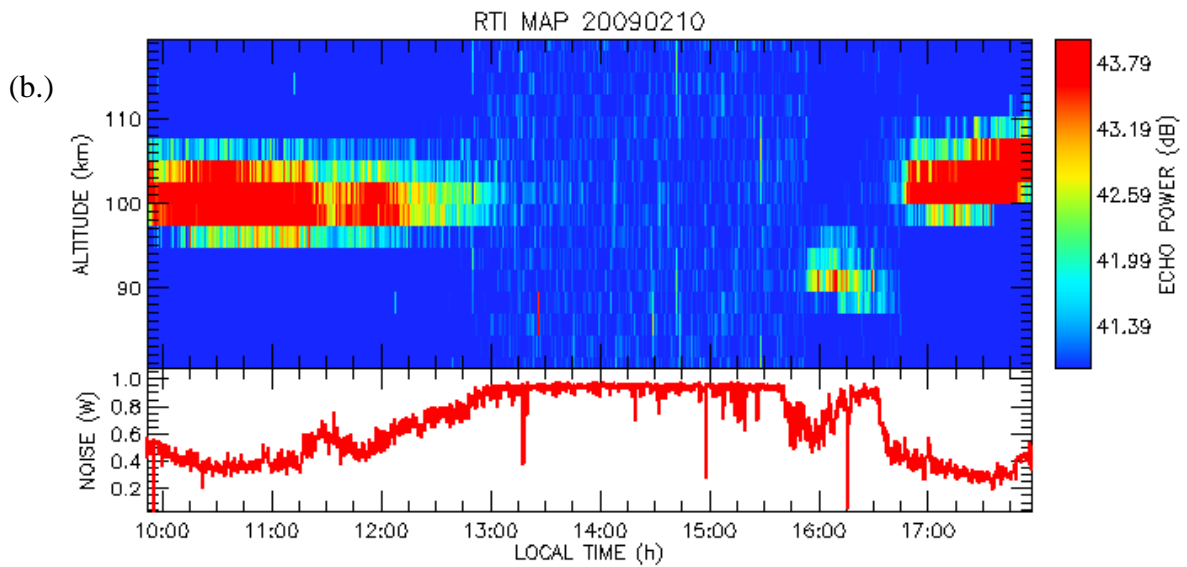
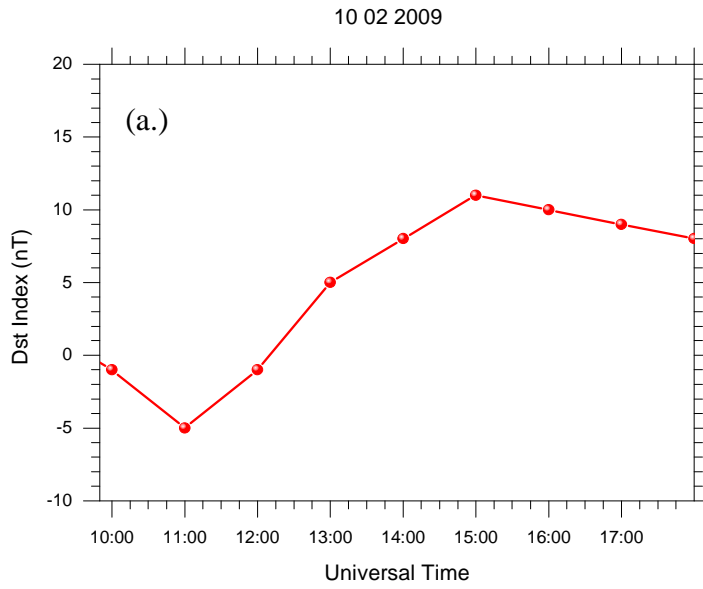
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	15:15	16:45	90 km	101 km	Positivo
2	17:30	17:50	98 km	109 km	Negativo

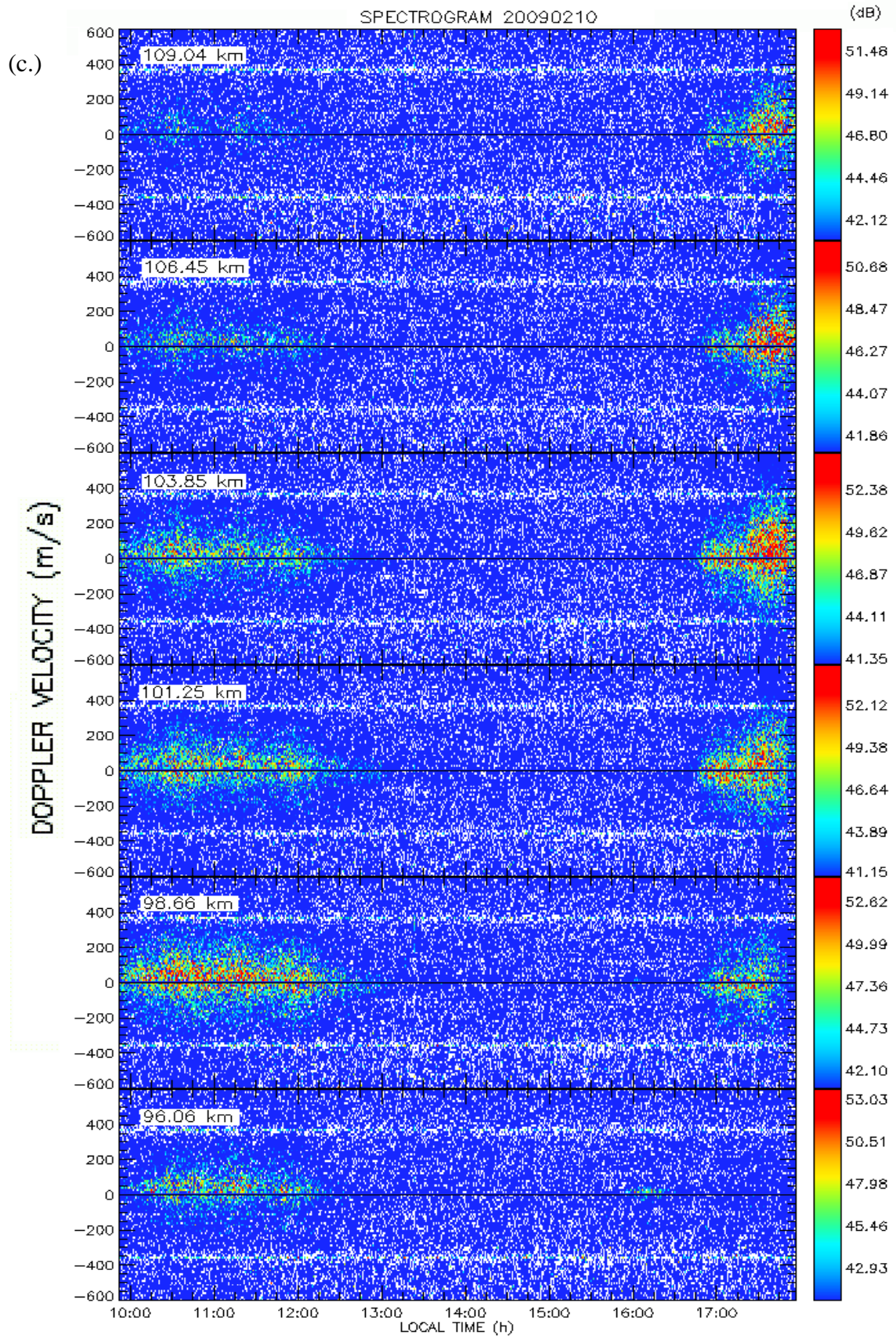
3) Ondeleta:

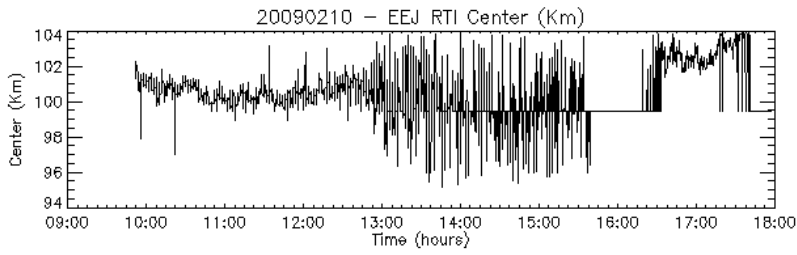
	Início:	Término:	Período (min):
EJC	11:15	12:45	16; 32
	12:10	12:35	8; 16
	14:10	14:45	8; 16
	16:00	17:50	64*
	17:00	17:50	8; 16*
EJT	10:20	10:40	16
	15:30	17:50	64*
	16:30	17:50	32*
	16:45	17:30	8; 16*

* afetado pelo cone de influência

Resumo das Características do dia 10/02/2009

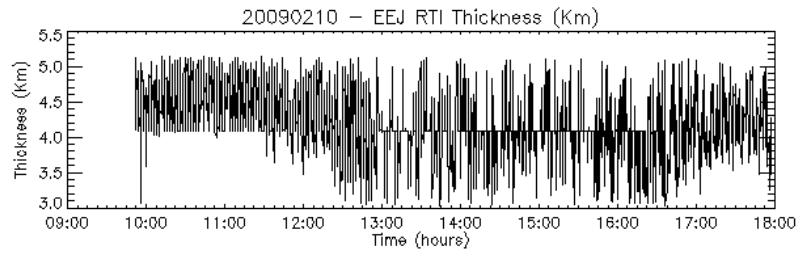
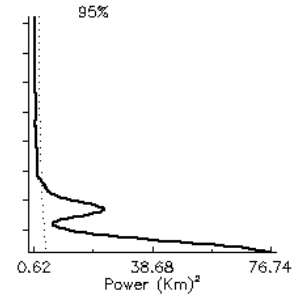
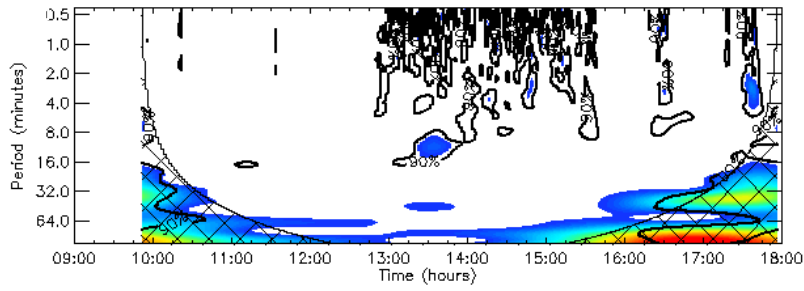






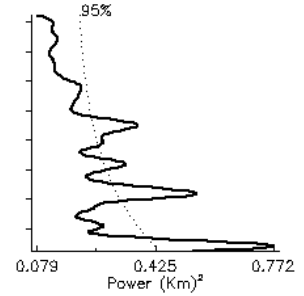
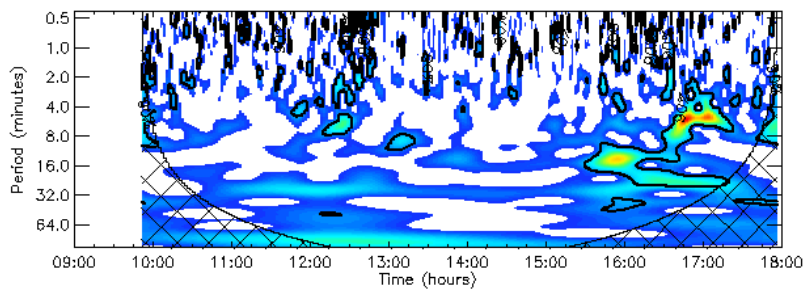
Original Variance = 1.85565
 Reconstructed Var = 0.991523
 Ratio Orig/Recon = 0.534326
 Recon Series RMS Err = 0.831809

(d.)



Original Variance = 0.188979
 Reconstructed Var = 0.129384
 Ratio Orig/Recon = 0.684646
 Recon Series RMS Err = 0.212015

(e.)



Data: 10 de fevereiro de 2009

Início de Operação: 10:00

Fim de Operação: 18:00

Variação do Dst: -6 a 14 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	10:00	13:00	102 km
2	15:50	16:30	90 km
3	16:30	18:00	104 km

2) Comportamento no Espectrograma:

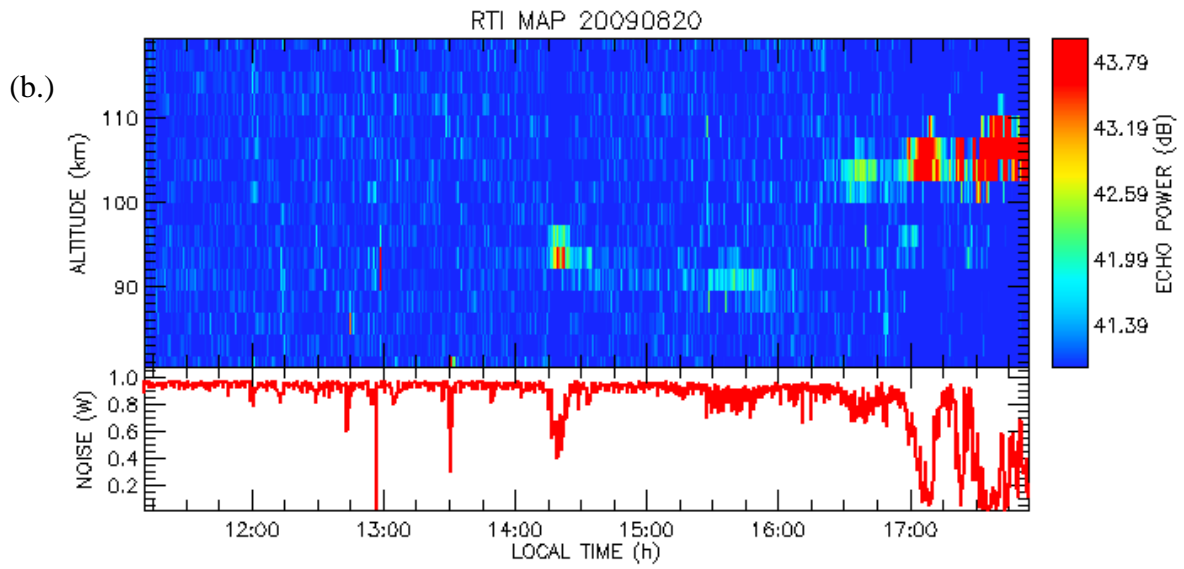
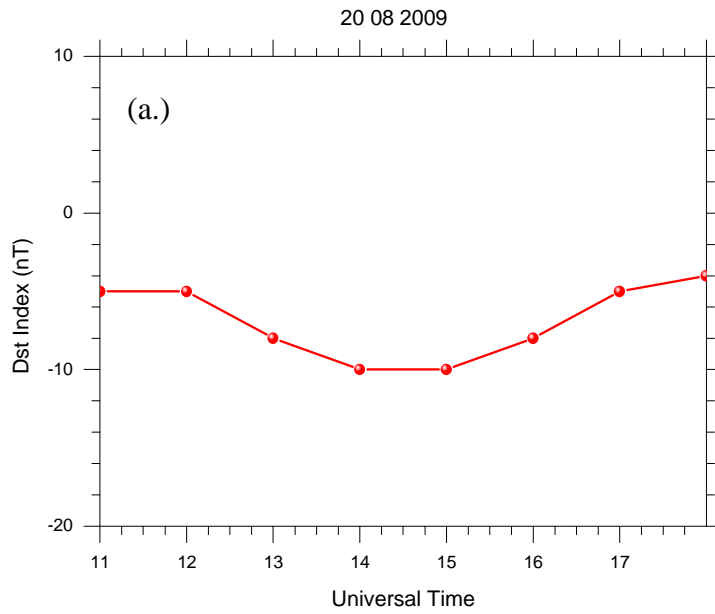
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	10:00	12:30	96 km	103 km	Positivo
2	16:45	18:00	98 km	109 km	Negativo

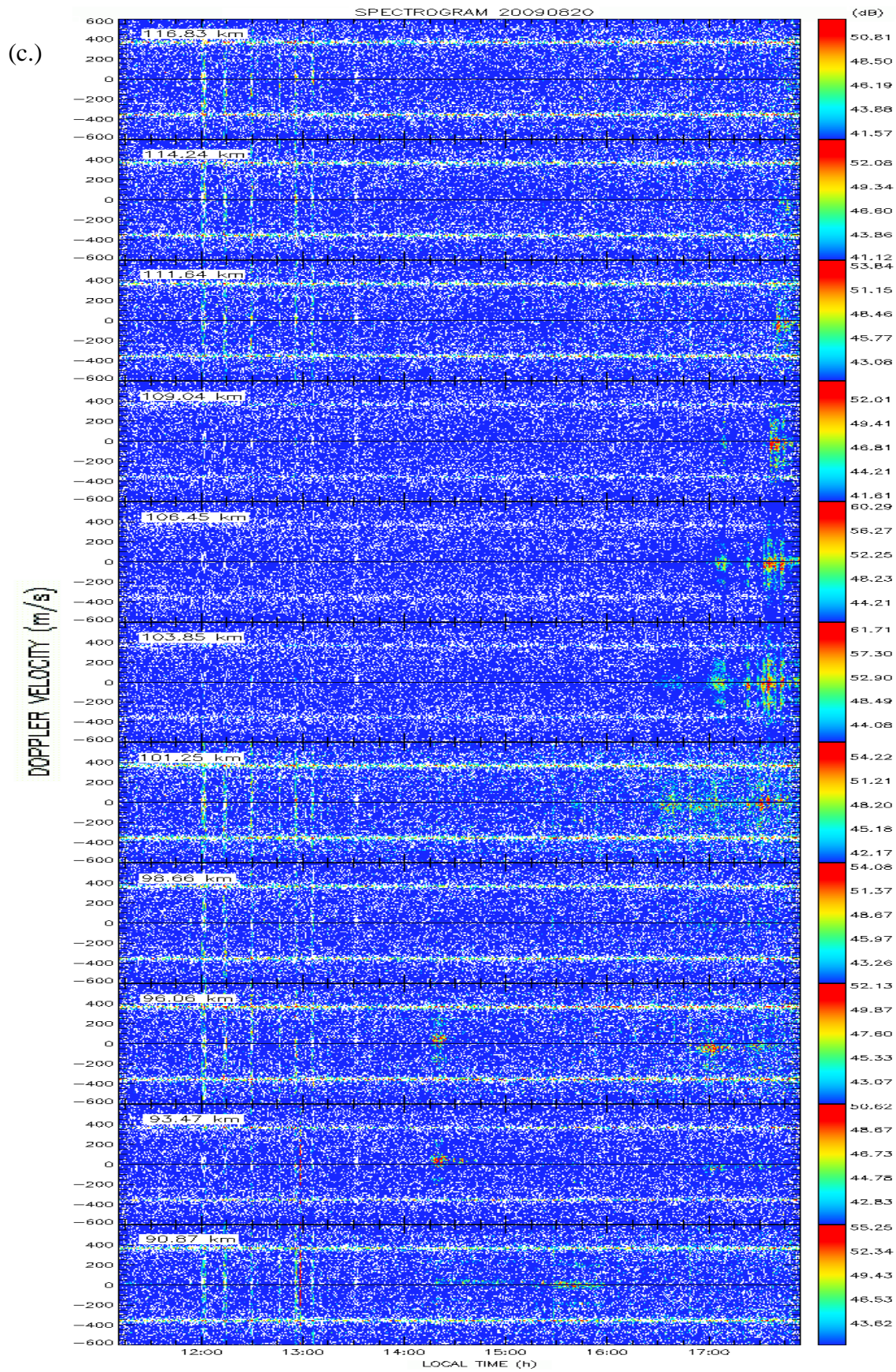
3) Ondeleta:

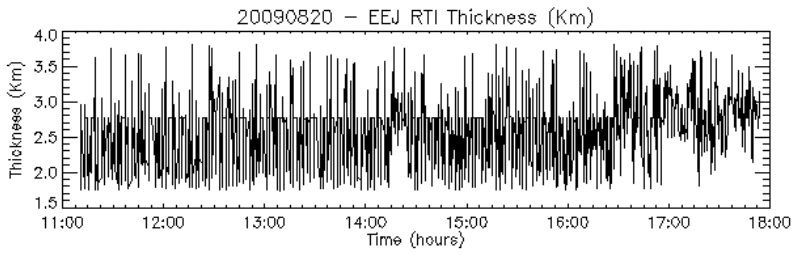
	Início:	Término:	Período (min):
EJC	13:00	14:00	8
EJT	15:30	17:15	16 *

* afetado pelo cone de influência

Resumo das Características do dia 20/08/2009

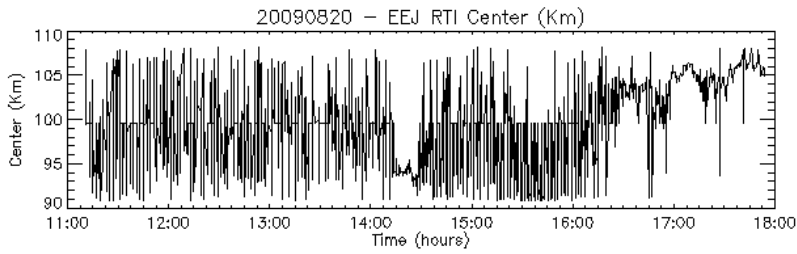
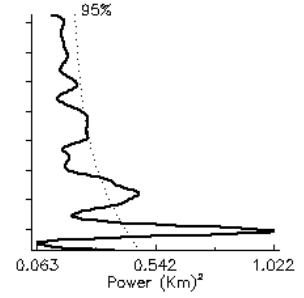
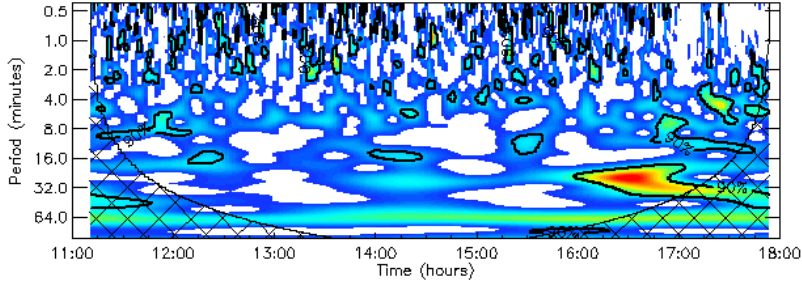






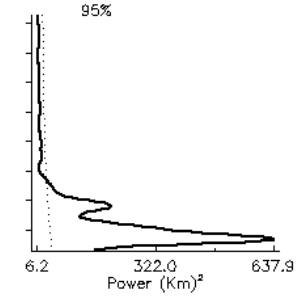
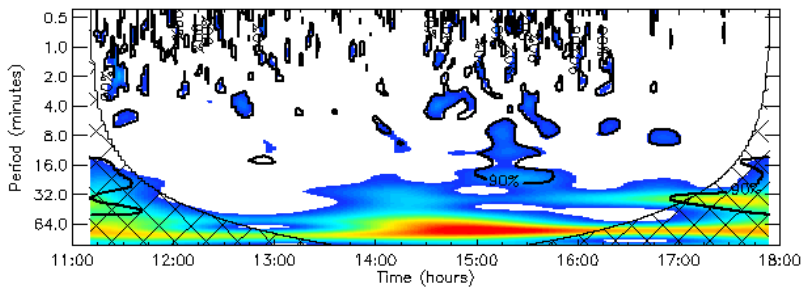
Original Variance = 0.200004
 Reconstructed Var = 0.155509
 Ratio Orig/Recon = 0.777529
 Recon Series RMS Err = 0.150371

(d.)



Original Variance = 18.5868
 Reconstructed Var = 11.3854
 Ratio Orig/Recon = 0.612554
 Recon Series RMS Err = 2.43189

(e.)



Data: 20 de agosto de 2009

Início de Operação: 11:00

Fim de Operação: 18:00

Varição do Dst: -10 a 5 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	14:15	14:30	95 km
2	17:00	18:00	105 km**

** apresenta oscilações.

2) Comportamento no Espectrograma:

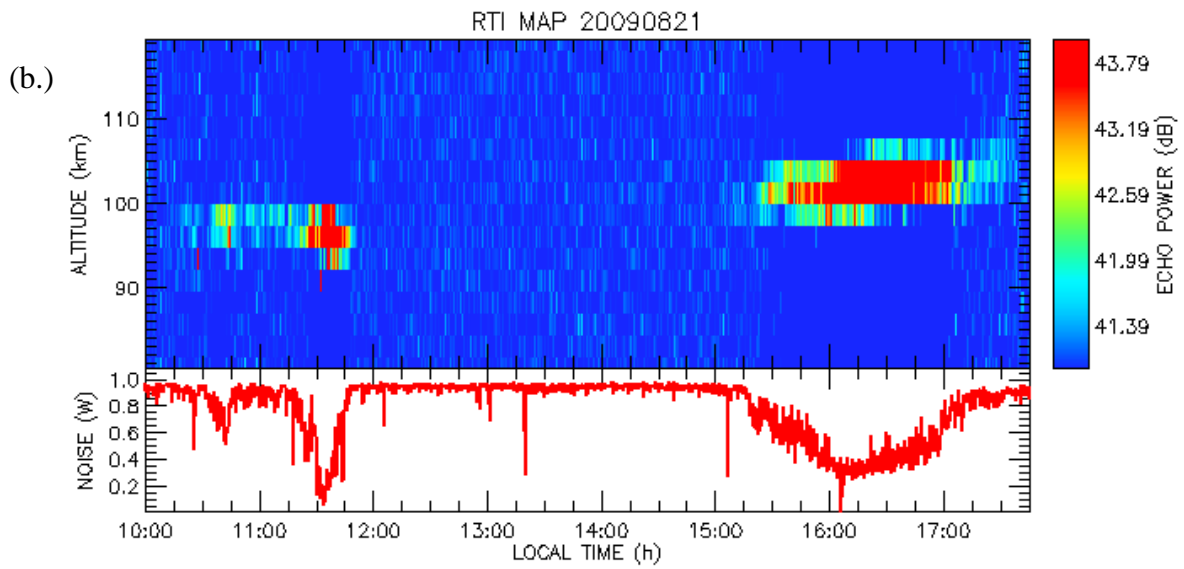
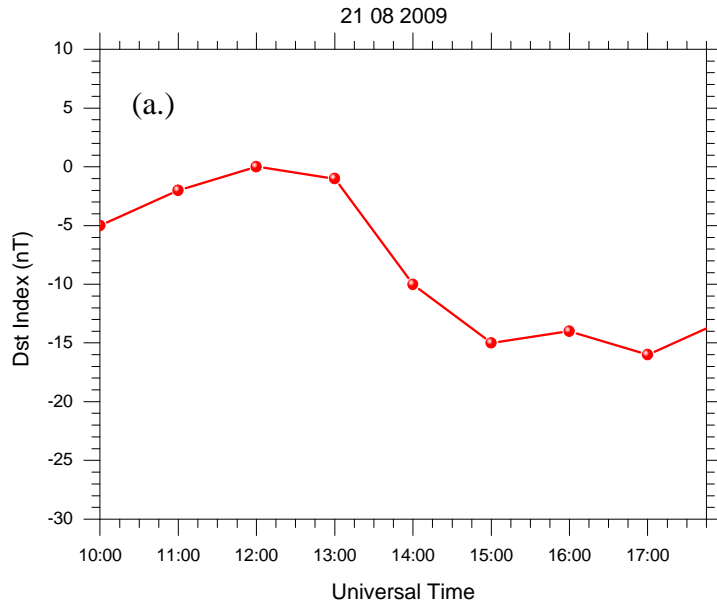
	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	14:15	14:30	93 km	96 km	Positivo
2	16:50	17:20	96 km	96 km	Negativo
3	17:20	17:45	101 km	111 km	Negativo

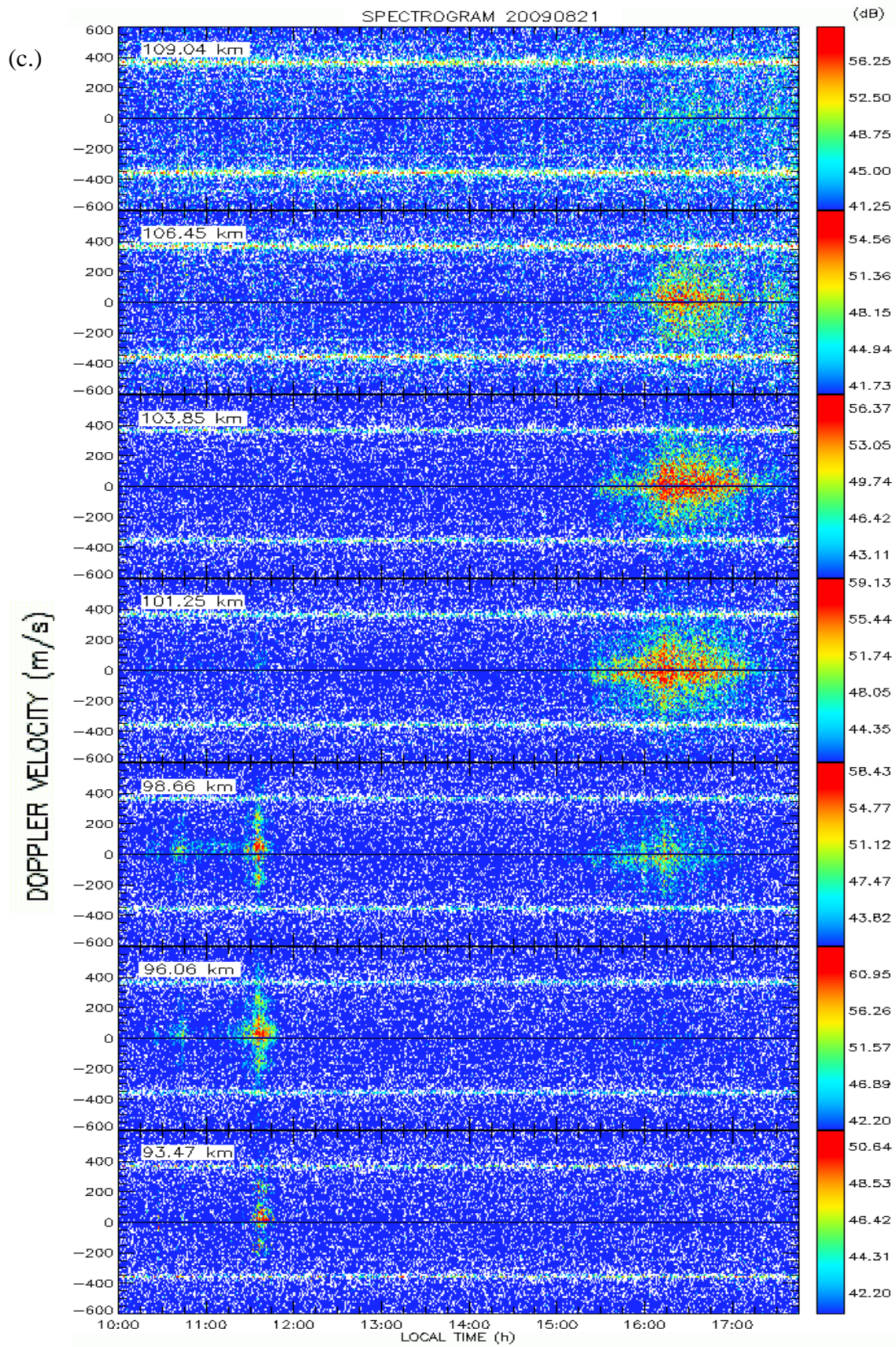
3) Ondeleita:

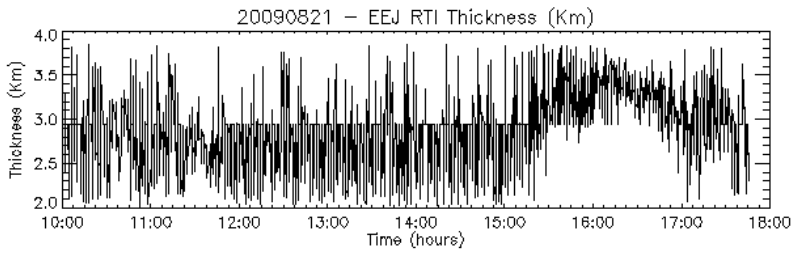
	Início:	Término:	Período (min):	
EJC	11:15	12:10	8*	
	12:10	12:30	16	
	13:50	14:30	16	
	15:20	15:45	8	
	16:00	17:50	16; 32*	
	16:45	17:45	8; 16*	
EJT	13:20	17:50	64*	
	14:55	15:45	16	8

* afetado pelo cone de influência

Resumo das Características do dia 21/08/2009

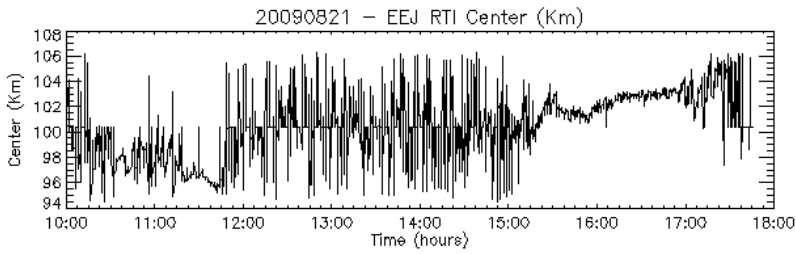
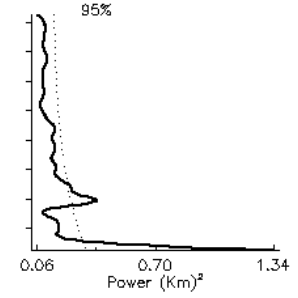
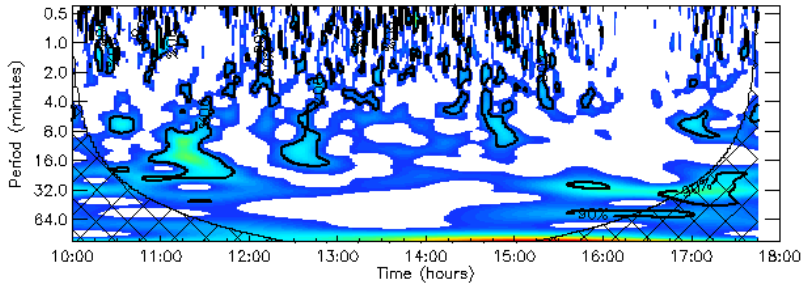






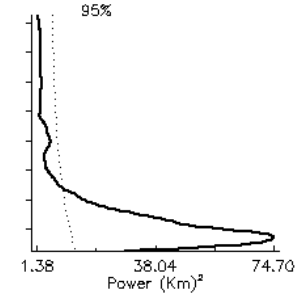
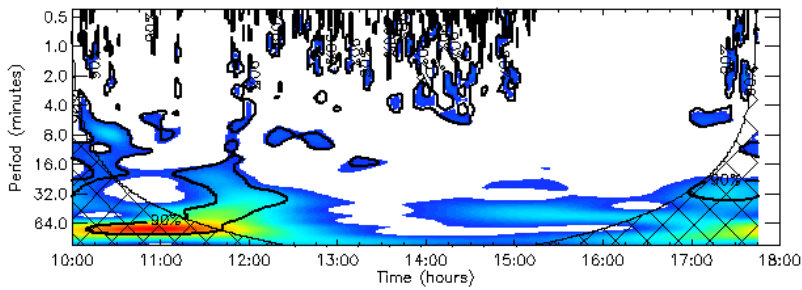
Original Variance = 0.138890
 Reconstructed Var = 0.0877210
 Ratio Orig/Recon = 0.631584
 Recon Series RMS Err = 0.197102

(d.)



Original Variance = 5.63996
 Reconstructed Var = 2.44029
 Ratio Orig/Recon = 0.432678
 Recon Series RMS Err = 1.70869

(e.)



Data: 21 de agosto de 2009

Início de Operação: 10:00

Fim de Operação: 17:30

Variação do Dst: -15 a 2 nT

1) Espalhamento em RTI:

	Início:	Término	Altura de Centro:
1	10:30	11:50	97 km
2	15:20	17:10	102 km

2) Comportamento no Espectrograma:

	Início:	Término:	Altura Inicial:	Altura Final	Sentido:
1	11:30	11:45	93 km	98 km	Positivo
2	15:30	17:15	98 km	106 km	Negativo

3) Ondeleta:

	Início:	Término:	Período (min):
EJC	10:45	11:50	8;16
	10:20	10:40	8
	12:10	12:50	8; 16
	14:40	15:00	4; 8
	15:40	16:10	32
	15:40	17:00	64*
	16:35	17:30	32*
EJT	10:15	11:45	64*
	11:10	12:30	32*
	12:10	13:00	8
	13:10	13:30	16
	17:00	17:45	32*

APÊNDICE B

Neste apêndice apresentamos um dos programas desenvolvidos para o processamento dos dados de magnetômetro.

```
FUNCTION Func_Load_Mag ,TxtMFN
;----- ABSTRACT
; This function loads all the information inside the binary file and
; convert the data file to ASCII and return one matrix contained the
; informations registred by magnetometer.
;-----
; By:          Pedro Daniel Almeida - pedro@dae.inpe.br
; Date:        June      19, 2009
; Modification : September 06, 2005 (denardin@dae.inpe.br -> path actualization)
;-----
;-----Error test with ASCII file
OPENR, TtePt, TxtMFN, /get_lun, ERROR = NoData

IF (NoData NE 0) THEN BEGIN
    RETURN, -1
ENDIF ELSE BEGIN
    CLOSE, TtePt & FREE_LUN, TtePt
ENDELSE
;-----
HTxt = FIX (STRMID(TxtMFN, STRLEN(TxtMFN)- 2, 2), TYPE = 2)
DTxt = FIX (STRMID(TxtMFN, STRLEN(TxtMFN)- 5, 2), TYPE = 2)
Mtxt = FIX (STRMID(TxtMFN, STRLEN(TxtMFN)- 7, 2), TYPE = 2)
YTxt = FIX (STRMID(TxtMFN, STRLEN(TxtMFN)-32, 4), TYPE = 2)

Load = Read_Binary(TxtMFN)          ; carrega os dados binarios

DimD = REFORM(SIZE (Load, /Dimensions))      ; calcula o tamanho do arquivo

Npts = DimD[0]/13

HrsS = INTARR(Npts)          ; cria o vetor de horas
Year = INTARR(Npts)         ; cria o vetor de anos
Mnth = INTARR(Npts)         ; cria o vetor de meses
DayS = INTARR(Npts)         ; cria o vetor de dias
MinD = BYTARR(Npts)         ; cria o vetor de minutos
SecD = BYTARR(Npts)         ; cria o vetor de segundos
Frac = BYTARR(Npts)         ; cria o vetor de fracao de segundos
GPSc = BYTARR(Npts)         ; cria o vetor de GPS
XDec = LONARR(Npts)         ; cria o vetor da componente X do campo
YDec = LONARR(Npts)
ZDec = LONARR(Npts)

idx = 0                      ; inicializa um contador de indices

FOR ii = 0, DimD[0]-1, 13 DO BEGIN ;----- unscramble the data

    HrsS[idx] = HTxt          ; set the current hour
    Year[idx] = YTxt          ; set the current year
    Mnth[idx] = Mtxt          ; set the current month
    DayS[idx] = DTxt          ; set the current day
    MinD[idx] = Load[ii]     ; select the minute [in decimal]
    SecD[idx] = Load[ii + 1] ; select the second [in decimal]
    Frac[idx] = Load[ii + 2] ; select the fraction [in decimal]
    GPSc[idx] = Load[ii + 3] ; select GPS correction [in decimal]

    ; set X component to its decimal corresponding -----
    ; the three decimal number composing the component are individually
    ; convertedto binary of 8 bits each. Then, they are concatenated
    ; and converted backto a one decimal only (long).
    xc_0 = Load[ii + 4]      ; select the 1st part of X
    xc_1 = Load[ii + 5]      ; select the 2nd part of X
    xc_2 = Load[ii + 6]      ; select the 3rd part of X

    MATH_Dec2Bin, [xc_0, xc_1, xc_2], Binary, /quiet      ; make the three X parts
to binary
```

```

Binary = [Binary[*],0], Binary[*], 1], Binary[*], 2]] ; glues the three X
parts in to one
MATH_Bin2Dec, Binary, Decimal, /quiet ; set back the one part to decimal
XDec[idx] = Decimal ; store the current X [in decimal]

; if (HrsS[idx] EQ 16) and (MinD[idx] eq 36) then stop
; set Y component to its decimal corresponding -----
; the three decimal number composing the component are individually
; converted to binary of 8 bits each. Then, they are concatenated
; and converted back to a one decimal only (long).
yc_0 = Load[ii + 7] ; select the 1st part of Y
yc_1 = Load[ii + 8] ; select the 2nd part of Y
yc_2 = Load[ii + 9] ; select the 3rd part of Y

MATH_Dec2Bin, [yc_0, yc_1, yc_2], Binary, /quiet ; make the three Y parts
to binary
Binary = [Binary[*],0], Binary[*], 1], Binary[*], 2]] ; glues the three Y
parts in to one
BinNeg = Reverse (Binary(0:10)) ; get the NEGATIVE binary part
BinPos = Binary(11:23) ; get the POSITIVE binary part

MATH_Bin2Dec, BinNeg, DecNeg, /quiet ; set back the NEGATIVE part to decimal
MATH_Bin2Dec, BinPos, DecPos, /quiet ; set back the POSITIVE part to decimal
Decimal = DecPos - DecNeg ; calculate the real Y to decimal
IF (Decimal LT 0) THEN Decimal = Decimal - 1
YDec[idx] = Decimal ; store the current Y [in decimal]

; set Z component to its decimal corresponding -----
; the three decimal number composing the component are individually
; converted to binary of 8 bits each. Then, they are concatenated
; and converted back to a one decimal only (long).
zc_0 = Load[ii + 10] ; select the 1st part of Z
zc_1 = Load[ii + 11] ; select the 2nd part of Z
zc_2 = Load[ii + 12] ; select the 3rd part of Z

MATH_Dec2Bin, [zc_0, zc_1, zc_2], Binary, /quiet ; make the three Z parts
to binary
Binary = 0 ^ [Binary[*],0], Binary[*], 1], Binary[*], 2]] ; glues the three Z
parts in to one
MATH_Bin2Dec, Binary, Decimal, /quiet ; set back the one part to decimal
ZDec[idx] = Decimal + 1 ; store the current X [in decimal]

idx = idx + 1 ; increment the index counter

ENDFOR ;----- end of unscramble data

XMag = XDec * 0.025 ; converte os valores de X para a Componente real
YMag = YDec * 0.025 ; converte os valores de Y para a Componente real
ZMag = ZDec * (- 0.025) ; converte os valores de Y para a Componente real

SecD = ROUND (SecD + (FLOAT(Frac)/100.0)) ; arredonda o segundo
utilizando a presicao das fracoes de segundo

DataMag = JULDAY (Mnth, DayS, Year, HrsS, MinD, SecD)

; Create transpose vectors for write to data ASCII files -----
;-----
DatM = TRANSPOSE (DataMag)
XMag = TRANSPOSE (XMag)
YMag = TRANSPOSE (YMag)
ZMag = TRANSPOSE (ZMag)

MtxR = [DatM, XMag, YMag, ZMag]

;-----
RETURN, MtxR ; return flag
END ; end of function

```