

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**INPE-7174-TDI/676**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CORREÇÃO DE  
FASE PARA O RADAR IONOSFÉRICO DE SÃO LUÍS DO  
MARANHÃO**

Clezio Marcos Denardini

Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial, orientada pelo  
Dr. Mangalathayil Ali Abdu e pelo Dr. José Humberto Andrade Sobral, aprovada em  
12 de março de 1999.

INPE  
São José dos Campos  
1999

523.4 – 853

DENARDINI, C.M.

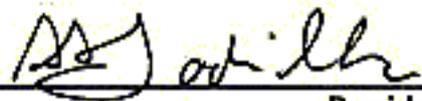
Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para o radar ionosférico de São Luís do Maranhão / C.M.Denardini. – São José dos Campos: INPE, 1999.

137p. – (INPE-7174-TDI/676).

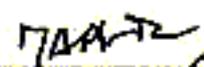
1.Radar ionosférico. 2.Ionosfera equatorial. 3.São Luís(MA). 4.Radar de espalhamento. 5.Ciência espacial. I.Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de Mestre em  
Geofísica Espacial.

Dr. Antonio Lopes Padilha

  
\_\_\_\_\_  
Presidente

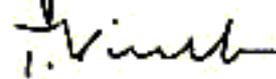
Dr. Mangalathayil Ali Abdu

  
\_\_\_\_\_  
Orientador

Dr. José Humberto Andrade Sobral

  
\_\_\_\_\_  
Orientador

Dr. Thyrso Villeia Neto

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca

Dr. Rui Tertuliano de Medeiros

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca  
Convidado

Candidato: Clezio Marcos Denardini

“Eu faço o melhor que posso a cada dia,  
melhor que isso, só amanhã ...”

Nelson Jorge Schuch, dez. 1998

Ao meu pai **Ettore Denardini** (*in memoriam*),  
um homem honesto e justo,  
com respeito e saudade dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela dádiva da vida, por me permitir chegar até aqui e pelas pessoas que cruzaram meu caminho.

Ao Dr. Mangalathayil Ali Abdu e ao Dr. José Humberto Andrade Sobral, pelo empenho com que dedicaram seu tempo e atenção a orientar este trabalho.

Ao engenheiro sênior Kadavallur Janardhanan e ao engenheiro Mohankumar Vasudevanpillai, pela extrema colaboração na transferência de tecnologia que proporcionou desenvolver esse trabalho.

À equipe de engenheiros e técnicos do laboratório da Ionosfera, Lázaro Camargo e Francisco Mesquita, que compartilharam do mesmo empenho para a realização deste trabalho. E a toda equipe que trabalhou durante as campanhas de coletas de dados.

Aos membros da banca examinadora da proposta de trabalho, pela predisposição em analisar este trabalho e pelas sugestões recebidas.

À Dra. Inez Staciarini Batista que contribuiu para este trabalho através de sugestões e conselhos, e ao Dr. Nalin Babulal Trivedi, pelos dados dos magnetômetros e pelas produtivas discussões sobre este trabalho.

Ao pessoal da equipe de redução de dados, do grupo da ionosfera, em especial Maria Gorete Aquino e Luciana Crespan, que dispensaram seu tempo e dedicação na colaboração para a realização deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo apoio e, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, por acreditar em mim, através das bolsas concedidas desde a iniciação científica.

Ao Programa de Núcleos de Excelência - PRONEX, que através do projeto "Pesquisas em Aeronomia" (nº 76.97.1079.00) vem financiando o projeto do Radar Ionosférico de São Luís, do qual tive o prazer de participar.

Ao Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - Universidade Federal de Santa Maria, por oferecer a infra estrutura computacional para continuação dos trabalhos nos períodos em que estive nessa cidade.

Aos colegas de turma e de Santa Maria, que direta ou indiretamente contribuíram para o enriquecimento deste trabalho, em especial à Ezequiel Echer, pela colaboração durante a elaboração do trabalho.

À minha noiva Alice, pela compreensão, pelo apoio incessante e por sonhar comigo. E também a toda minha família, em especial minha mãe Riqueta Denardini, pelo importante apoio dispensado nos momentos difíceis.

E por fim, mas não menos importante, ao Dr. Nelson Jorge Schuch, que como quem ensina uma criança a caminhar, me incentivou a percorrer o caminho da ciência.

## RESUMO

Esta dissertação apresenta detalhes do desenvolvimento e construção da unidade de correção de fases, a qual foi implementada com sucesso, com ajuda dos engenheiros e técnicos da equipe e com a colaboração de outros grupos científicos. Ela é necessária para obter estabilização das fases e uma correta relação entre os sinais transmitidos por diferentes antenas. A unidade foi testada integrada ao radar de São Luís, quando sua operação foi conduzida durante a campanha operacional e observacional de agosto de 1998. Durante a campanha os primeiros dados da dinâmica das irregularidades foram registrados, com resolução temporal de 6s e de altura de 2,6km. O software de análise utiliza a técnica da transformação de Fourier (FFT) para obter frequência Doppler dos ecos das irregularidades, e portanto suas velocidades de deslocamento, em um grande número de faixas de alturas, as quais podem ser ajustadas para cobrir regiões de interesse específico, para estudos do eletrojato ou de bolhas de plasma. Ele também provê a potência integrada para cada altura, as quais possibilitam a geração do mapa de variação temporal de intensidade de potência (RTI) em função da hora local. A análise do dia 31 de agosto, o qual foi magneticamente perturbado, mostrou grande variação na intensidade do eletrojato equatorial. Descobriu-se que essas variações estavam relacionadas com flutuações no índice auroral (AE), nas intensificações no campo magnético do eletrojato equatorial (EEJ) e no índice Dst. Neste dia, a altura das irregularidades apresentou um mínimo próximo ao meio dia da hora local. Uma análise detalhada está em andamento.

# **DEVELOPMENT OF A PHASE CORRECTION SYSTEM TO THE IONOSPHERIC RADAR OF SÃO LUÍS DO MARANHÃO**

## **ABSTRACT**

This dissertation will present details of the development and construction of the phase correction unit, which was successfully implemented, with the help of the participating technical staff and collaboration with other scientific groups. It is needed for efficient functioning of the transmitting system it is required to achieve phase stabilisation and correct phase relationship of the signals transmitted by the different antennas. The unit was tested with the radar at "São Luís" when its successful operation was conducted during an operational and observational campaign in August 1998. During this campaign the first data on the dynamics of electrojet irregularities were registered with a resolution of 6s in time and 2.6 km in height resolution. The data collected during a few days of the campaign are now being analysed. Preliminary results of analysis of some data are presented in this thesis. The analysis software utilises Fast Fourier (FFT) technique to extract the Doppler frequency of the electrojet irregularity echoes, and hence their velocities, at a large number of height bins, that can be adjusted to cover height regions of specific interest, for electrojet or plasma bubble investigations. It also provides the integrated spectral power at each height, which permits plots of RTI (Range Time Intensity) maps as a function of local time. Analysis done for 31 August, which was a magnetically disturbed day, shows large variation in electrojet intensity. Such variations are found to be associated with fluctuations in the Auroral Electrojet (AE), Equatorial Electrojet (EEJ) magnetic field intensities and in the Dst indices. Also the height of the electrojet irregularities on this day appears to show a minimum near local midday. Detailed analyses are under way.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE SIGLAS E/OU ABREVIATURAS</b>	
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO 2 – A IONOSFERA EQUATORIAL .....</b>	<b>25</b>
2.1 A IONOSFERA TERRESTRE .....	25
2.1.1 <i>Fontes de Ionização</i> .....	28
2.1.2 <i>As Camadas Ionosféricas</i> .....	29
2.2 O ELETROJATO EQUATORIAL .....	33
2.2.1 <i>Condutividade</i> .....	34
2.2.2 <i>A Teoria do Dínamo Atmosférico</i> .....	37
2.2.3 <i>Composição da Corrente do Eletrojato</i> .....	40
2.2.4 <i>Irregularidades no Eletrojato Equatorial</i> .....	41
2.3 INSTABILIDADES DE PLASMA DA REGIÃO F EQUATORIAL .....	43
2.3.1 <i>Morfologia e Desenvolvimento de ESF</i> .....	44
2.3.2 <i>Teoria Linear da Instabilidade Tipo Rayleigh–Taylor</i> .....	48
2.3.3 <i>Variações Diurna e Sazonal de ESF</i> .....	50
2.4 ESPALHAMENTO COERENTE .....	53
<b>CAPÍTULO 3 – O RADAR DE ESPALHAMENTO COERENTE E A UNIDADE CONTROLADORA DE FASE .....</b>	<b>55</b>
3.1 O RADAR DE SÃO LUÍS DO MARANHÃO .....	56
3.1.1 <i>Localização do Radar</i> .....	57
3.1.2 <i>Freqüência de Operação</i> .....	58
3.1.3 <i>Sistema de Sinal Pulsado</i> .....	58
3.1.4 <i>Freqüência de Repetição de Pulso</i> .....	60
3.1.5 <i>Potência do Transmissor</i> .....	60
3.1.6 <i>O Sistema de Antenas</i> .....	62
3.1.7 <i>O Receptor</i> .....	63

3.2	NECESSIDADE DO CONTROLADOR DE FASE .....	63
3.3	UNIDADE CONTROLADORA DE FASE .....	66
3.3.1	<i>Desenvolvimento e Construção</i> .....	66
3.3.2	<i>Circuitos Componentes do PLL</i> .....	69
3.3.2.1	Circuito Comparador de Fase com Filtro Passa Baixa .....	70
3.3.2.2	Circuito Monitor de Potência .....	71
3.3.2.3	Circuito <i>Sample and Hold</i> .....	73
3.3.2.4	Circuito Limitador de Voltagem .....	76
3.3.2.5	Circuito Indicador de Fase em <i>Lock</i> .....	77
3.3.2.6	Circuito Amplificador com Filtro Passa Baixa .....	79
3.3.2.7	Circuito de Controle de Nível de Tensão .....	80
3.3.2.8	Circuito Deslocador de Fase com Amplificador de Potência .....	82
3.4	TESTE DE LABORATÓRIO E INCORPORAÇÃO AO RADAR .....	83
	<b>CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS .....</b>	<b>87</b>
4.1	O SINAL ARMAZENADO PELO RADAR E A OBTENÇÃO DAS INFORMAÇÕES DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS .....	88
4.2	O EFEITO DOPPLER E O CÁLCULO DA VELOCIDADE .....	91
4.3	A TRANSFORMADA DE FOURIER .....	93
4.4	OS PASSOS DO PROCESSO DE ANÁLISE E OS GRÁFICOS OBTIDOS .....	96
	<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>101</b>
5.1	A UNIDADE DE CONTROLE DE FASE .....	101
5.2	A COLETA DE DADOS .....	102
5.3	APRESENTAÇÃO DOS DADOS REDUZIDOS .....	104
5.4	ANÁLISE DO EVENTO DO DIA 31 DE AGOSTO .....	109
5.4.1	<i>O Deslocamento Doppler</i> .....	109
5.4.2	<i>A Redução na Altura do Eletrojato Próximo ao Meio-Dia</i> .....	113
5.4.3	<i>O Aparecimento do Eletrojato Somente Durante Três Períodos Específicos do Dia 31 de agosto</i> .....	117
	<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>125</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>129</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 A esquerda, a localização das três camadas ionosféricas conhecidas no perfil ionosférico, com sua nomenclatura. E a direita, a dimensão da ionosfera (em azul similar a esquerda) em relação a Terra. ....	26
2.2 Classificação da atmosfera neutra e da atmosfera ionizada terrestre. ....	27
2.3 Formação da camada F1, de acordo com o comportamento das perdas linear (curva b) e quadráticas (curva a). ....	31
2.4 Sistema de referência consistente com o tensor de condutividade, mostrando a posição dos campos elétrico e geomagnético e o ângulo de inclinação I (positivo no hemisfério norte). ....	34
2.5 Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal $\sigma_0$ , Pedersen $\sigma_1$ e Hall $\sigma_2$ . Para conversão 1 e. m. u. (cgs) = $10^{11}$ S/m (SI). ....	36
2.6 Variações magnéticas de várias latitude geomagnéticas, durante o período de equinócio, sob condições de dia calmo Sq, onde $\Delta X'$ , $\Delta Y'$ e $\Delta Z'$ $Z'$ são desvios do campo <b>B</b> vistos nos magnetogramas, respectivamente com sentido para norte, leste e para baixo. ....	38
2.7 Formação do sistema Sq de correntes, baseado na teoria do dínamo atmosférico. No esquema são mostrados os ventos neutros <b>U</b> no sentido dos pólos no lado iluminado pelo sol, as correntes de altas latitudes $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) - \nabla\phi$ que polarizam os terminadores e o eletrojato equatorial $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$ . ....	40
2.8 Formação de correntes Pedersen e Hall devido a campos elétricos aplicados a duas regiões adjacentes de condutividades diferentes. Essa configuração é uma simplificação da distribuição de densidades em torno do equador geomagnético entre, aproximadamente, 90 e 120 km de altitude. ....	41

2.9	Espectro de potência tipo 1 (a) e tipo 2 (b), medido sobre Jicamarca com feixe do radar a um ângulo zenital de 60° orientado para oeste. Cada espectro foi normalizado para seu próprio valor de pico. O eixo horizontal é a faixa de escursão do deslocamento Doppler de -200 Hz (esquerda) a +200 Hz (direita). .....	42
2.10	Mapa de variação temporal de intensidade de potência (RTI) do retroespalhamento de irregularidades, obtido com o radar de Jicamarca, Peru. ....	45
2.11	Seqüência de ionogramas mostrando a evolução no tempo do traço "satélite" desde sua primeira aparição próxima a baixa freqüência do traço de primeira reflexão (em 1823 HL) até o desenvolvimento total do espalhamento em altura (em 1852 HL). Os dois últimos quadros apresentam exemplos de espalhamento em freqüência. ....	46
2.12	(a) Diagrama esquemático de uma instabilidade Rayleigh-Taylor no equador geomagnético. (b) Quadros seqüenciais do desenvolvimento de uma instabilidade. ....	50
2.13	Mapa de ocorrência media mensal de <i>spread F</i> versus hora local sobre Fortaleza, para os anos de 1980-1981. ....	52
3.1	Localização geográfica e geomagnética dos radares: Jicamarca (Peru), Boulder (Estados Unidos), Thumba (Índia) e São Luís do Maranhão (Brasil). ....	57
3.2	Diagrama de blocos mostrando esquema de transmissão para radar (a) usando um único transmissor com divisores de potência e deslocadores de fase de alta potência e (b) usando 8 transmissores com divisores de potência e deslocadores de fase de baixa potência. ....	61
3.3	Fotografia do conjunto de antenas que está sendo utilizado na operação do radar ionosférico de São Luís do Maranhão. ....	62
3.4	Diagrama de 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. ....	63
3.5	Diagramas cartesianos de irradiação no plano leste-oeste do conjunto de antenas, (a) para o feixe vertical e (b) para o feixe oblíquo (com deslocamento progressivo de fase de 90 graus). O eixo vertical determina a intensidade de campo em dB. ....	64

3.6	Sinal de um dos transmissores do radar, onde é possível identificar um vazamento de sinal de RF via fontes de alimentação, visto através de um declive e uma perturbação no início do pulso. ....	65
3.7	Diagrama de blocos esquemático do princípio de funcionamento de um dos canais da unidade controladora de fase do sistema de múltiplos transmissores. ....	67
3.8	Fotografia de um dos oito acopladores direcionais utilizados no radar ionosférico de São Luís. ....	68
3.9	Diagrama de blocos esquemático de um dos canais da unidade controladora de fase do sistema de múltiplos transmissores. ....	69
3.10	Diagrama esquemático do circuito do detector de fase com o filtro passa baixa, incluindo os circuitos divisores de tensão. ....	70
3.11	Diagrama esquemático do circuito monitor de potência. ....	72
3.12	Diagrama esquemático do circuito do <i>sample and hold</i> , mostrando sua configuração interna e seus circuitos de controle. ....	74
3.13	Esquema mostrando a composição do sinal pulsado emitido pelo radar ionosférico. ....	74
3.14	Diagrama esquemático do circuito limitador de voltagem. ....	76
3.15	Diagrama temporal mostrando o sinal ceifado pelos diodos D4 e D5, que limitam o nível de tensão máximo na saída do <i>sample and hold</i> . ....	77
3.16	Diagrama esquemático do circuito indicador de fase em <i>lock</i> . ....	78
3.17	Diagrama esquemático do circuito amplificador com filtro passa baixa. ....	79
3.18	Diagrama esquemático do circuito de controle do nível de tensão. ....	81
3.19	Diagrama esquemático do circuito deslocador de fase e amplificador de tensão. ....	82
3.20	Sinais, vistos no osciloscópio, de quatro dos oito canais da unidade controladora de fase, medidos utilizando simulação em laboratório com erro de 45 graus entre as fases dos sinais de entrada. ....	85

3.21	Sinais, vistos no osciloscópio, de dois dos oito canais da unidade controladora de fase, medidos durante a utilização da unidade controladora de fase incorporada ao radar ionosférico, na última campanha de agosto de 1998. ....	86
4.1	Valores típicos dos parâmetros de controle do sinal emitido e retroespalhado recebido pelo radar ionosférico, para estudos (a) da região E e (b) da região F. ....	88
4.2	Esquema de funcionamento da primeira filtragem de informação utilizando os detetores de fase e os filtros de 50 kHz. Nessa figura, A é a amplitude de uma onda genérica, $\delta$ é o coeficiente devido ao efeito Doppler e $w$ é o coeficiente devido aos 50 MHz do sinal emitido. ....	89
4.3	Efeito Doppler no sinal recebido, quando temos uma irregularidade ionosférica se afastando ou se aproximando do radar com velocidade $v$ . ....	92
4.4	Número de operações de computador, exigidas para o cálculo de DFT usando algoritmo de FFT, comparado com o número de operações realizadas no cálculo direto desta DFT. ....	95
4.5	Quantidade de dados adquiridos a cada dia, durante a última campanha, separados por tipo de dado armazenado: com utilização do feixe oblíquo, ou feixe vertical. Os arquivos estão armazenados na forma binária, e cada um contém 64 kb (65.536) de dados armazenados. ....	96
4.6	Esquema simplificado mostrando a estrutura dos dados armazenados em disco rígido e a forma como ele é extraído, agrupado e processado, na primeira etapa do processo de redução de dados. ....	97
4.7	Seqüência de gráficos de espectro de potência versus altura, para as 9 h e 50 min do dia 29 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão. ....	98
4.8	Mapas de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, no mapa acima e feixe vertical no mapa abaixo, para o dia 30 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão. ....	100

5.1	Sinais vistos no osciloscópio (a) de quatro dos oito canais do controlador de fase medidos utilizando simulação em laboratório, com erro de 45° entre as fases dos sinais de entrada, e (b) de dois dos oito canais do controlador de fase medidos durante a campanha de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão. ....	102
5.2	Dados adquiridos com utilização do feixe oblíquo e zênite a cada dia, durante a última campanha. Cada um contém 64 kb (65.536) de tamanho. ....	103
5.3	Variação dos índice Dst para o mês de agosto de 1998. ....	104
5.4	Mapa de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo (acima) e feixe vertical (abaixo), para o dia 28 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão. ....	105
5.5	Mapa de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, para o dia 29 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão. ....	107
5.6	Mapa de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, para o dia 30 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão. ....	108
5.7	Mapa de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, para o dia 31 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão. ....	108
5.8	Sinal retroespalhado nas irregularidades do eletrojato equatorial, adquirido durante a última campanha de agosto de 1998, visto por osciloscópio. ....	110
5.9	Gráficos de amplitude de potência versus frequência da análise espectral para o sinal recebido às 10 h e 45 min do dia 31 de agosto, para as alturas desde 89,6 até 118,2 km, espaçadas de 2,6 km entre elas. ....	112
5.10	Mapa vetorial das componentes das derivas das irregularidades , na direção do feixe do radar, no horários das 10 h e 20 min às 11 h, para o dia 31 de agosto, obtido pela análise dos gráficos de distribuição de frequência para o feixe oblíquo. ....	113
5.11	Deslocamento vertical médio medido durante os período de equinócio (março-abril e setembro-outubro), inverno (maio-agosto) e verão (novembro-fevereiro) sobre Jicamarca para três níveis de fluxo solar. ....	114

5.12	Vetores fluxo de plasma às 1200 HL, obtidos através de modelo de ventos termosféricos para a região de Fortaleza. Os vetores são plotados em escala linear com o menor vetor tendo comprimento zero, correspondendo a fluxos de plasma menores que $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ e sendo positivo na direção norte. ....	115
5.13	(a) Sinal retroespalhado, detectado em 6 de janeiro de 1993, versus tempo e amplitude; (b) Velocidade Doppler, versus tempo e amplitude; (c) Média da velocidade Doppler; e (d) Variações na componente <b>H</b> do campo geomagnético, obtidas na estação de Ancor. ....	116
5.14	Mapa de variação temporal da intensidade de sinal recebido pelo radar ionosférico, utilizando feixe oblíquo, no dia 31 de agosto de 1998. ....	117
5.15	De cima para baixo: índice Dst horários durante a aquisição de dados pelo radar; o valor da componente horizontal do campo geomagnético medida com magnetômetro fluxgate; o mapa de variação temporal da intensidade de sinal recebido pelo radar ionosférico; e os índices aurorais AU e AL para o dia 31 de agosto de 1998. ....	121
5.16	Variação da componente horizontal do campo geomagnético, medida com magnetômetro das estações de Valentia (51,9° N; 10,2° O) e São Luís (2,4° S; 44,4° O). ....	122

## LISTA DE SIGLAS E/OU ABREVIATURAS

AE	- Índice de Atividade Auroral;
AL	- Índice Auroral Devido ao Eletrojato Auroral para Leste;
ASCII	- American Standard Code for Information Interchange;
AU	- Índice Auroral Devido ao Eletrojato Auroral para Oeste;
BSF	- Bottomside Spread F
BSS	- Bottomside Sinusoidal Spread F;
CEA	- Ciências Espaciais e Atmosféricas;
CI	- Circuito Integrado;
DD	- Disturbance Dynamo;
DFT	- Discrete Fourier Transform;
DST	- Índice de Atividade Magnética;
EEJ	- Equatorial Electrojet;
ESF	- Espalhamento na Região F da Ionosfera Equatorial;
EUV	- Ultra Violeta Extremo;
FFT	- Fast Fourier Transform;
HL	- Hora Local;
LED	- Light Emitting Diode;
PLL	- Phase Locked Loop;
PP	- Prompt Penetration;
PRF	- Pulse Repetition Frequency;
RF	- Rádio Frequência;
RLC	- Resistor, Indutor e Capacitor;
RTI	- Range Time Intensity;
SUPIM	- Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model;
TID	- Traveling Ionospheric Disturbance;
T/R	- Transmissão-Recepção;
VHF	- Very High Frequency;

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A Ionosfera terrestre é a camada eletricamente condutora que tem sua extensão vertical limitada entre aproximadamente 60 e 2000 km de altitude. Ela pode ser descrita como a região da atmosfera terrestre formada de plasma ionizado, colisional e magnetizado, onde ocorrem diversos fenômenos físicos, entre eles o eletrojato equatorial e o *spread F*. Esses fenômenos apresentam variabilidade sazonal e diurna. Tais fenômenos têm sido estudados por uma variedade de técnicas observacionais, tais como: medidas *in situ*, com foguetes e satélites; com radiossondagens utilizando ionossondas e radares de espalhamento coerente e incoerente; e através de fotômetros de varredura angular e imageadores.

Importantes trabalhos de estudos da ionosfera têm sido publicados ao longo das últimas décadas utilizando a técnica de radares (Gordon, 1958; Fejer et al., 1976; Farley et al., 1978; Fejer, 1991; Fejer et al., 1996) e de ionossondas/digissondas (Reinisch, 1986; Reinisch et al., 1989; Scali et al., 1997; Abdu et al., 1998). No Brasil, trabalhos sobre estudos ionosféricos também têm sido publicados utilizando técnicas de ionossondas e fotômetros (Abdu et al., 1981; Abdu et al., 1983; Sobral et al., 1985; Batista et al., 1986; Sobral e Abdu, 1991; Batista et al., 1996). Neste contexto, o radar ionosférico de São Luís do Maranhão, o primeiro radar desenvolvido e operado no Brasil, tornou-se uma ferramenta complementar aos estudos da ionosfera equatorial no Brasil.

O propósito desse trabalho, realizado junto ao grupo da ionosfera das Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA), foi desenvolver um sistema de correção de fase para ser incorporado ao radar ionosférico de São Luís, tornando seu

funcionamento estável. Assim, esta dissertação apresenta os primeiros dados recolhidos usando um radar de espalhamento coerente no Brasil.

No Capítulo 2, apresentamos uma breve descrição da ionosfera terrestre e uma discussão sobre os principais fenômenos investigados por radares coerentes: o eletrojato equatorial e *spread F*. O radar ionosférico de São Luís, sua localização e características, são apresentados neste Capítulo 3. Também no Capítulo 3, são discutidos o sistema corretor de fase e as implicações de sua utilização integrada ao radar. Ainda neste Capítulo, os circuitos da unidade são detalhados, o desenvolvimento da construção do corretor de fase é comentado e alguns testes de laboratório são mostrados. No Capítulo 4, são discutidos a metodologia da análise de dados, os conceitos físicos envolvidos e a fundamentação matemática necessária para a análise. Nesse Capítulo também é apresentada, a estrutura de armazenamento dos dados. Alguns dos resultados da campanha de estudos do eletrojato equatorial, ocorrida em agosto de 1998, usando o radar ionosférico, são apresentados no Capítulo 5. Uma interpretação dos eventos observados nos gráficos do dia 31 de agosto também compõem este Capítulo. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais.

## **CAPÍTULO 2**

### **A IONOSFERA EQUATORIAL**

A ionosfera terrestre é resultado da interação entre os componentes atômicos e moleculares da nossa atmosfera com as fontes ionizantes solares e cósmicas (Rishbeth e Garriott, 1969). Entre elas estão a radiação solar na faixa do ultra violeta, nossa maior fonte de energia, e os raios cósmicos com energia suficiente para penetrar na atmosfera e arrancar elétrons dos constituintes atmosféricos. Como nós não sobreviveríamos sem que esse tipo de radiação fosse filtrada, a ionosfera torna-se uma espécie de escudo protetor da biosfera terrestre.

Mas a ionosfera não resume-se a isso, com o desenvolvimento das tecnologias, de Marconi aos satélites, foi se notando o quanto a ionosfera é importante às comunicações, inclusive à comunicação via satélite, pois fenômenos ionosféricos como as bolhas de plasma podem atenuar ou interferir no sinal propagado ao longo delas, a ponto de provocar erro na leitura do sinal recebido ou mesmo perda de sinal. Hoje já sabemos bastante sobre a forma como a ionosfera e seus fenômenos se relacionam com as ondas eletromagnéticas que por ela se propagam (Budden, 1966). Entretanto, esses fenômenos e as irregularidades, como as do eletrojato equatorial e as irregularidades de bolhas de plasma na região F, ainda não foram totalmente explicados.

#### **2.1 A Ionosfera Terrestre**

O que define a ionosfera é a presença de uma densidade de cargas livres de elétrons e íons em densidade suficiente para influenciar as características de ondas de rádio que nela se propagam, e isso lhe confere propriedades especiais. O constituinte iônico do plasma da ionosfera é proveniente dos

vários constituintes da atmosfera, principalmente o oxigênio atômico (O) e o óxido Nítrico (NO).

A densidade eletrônica varia em função da densidade dos constituintes e da razão de fotoionização. Ela aumenta bastante durante o dia e decai à noite. O perfil de densidade elétrica decai com a altura, pois a concentração dos gases constituintes da atmosfera cai exponencialmente com a altura, enquanto a densidade de radiação aumenta, devido a redução da sua absorção pela atmosfera. A certa altura a radiação ionizante será totalmente absorvida. Daí podemos tirar a conclusão que a produção de elétrons-íons deve passar por um máximo em alguma altura na atmosfera. Na realidade a ionosfera terrestre apresenta três máximos de produção, formando três camadas bem conhecidas, conforme ilustra a Figura 2.1.

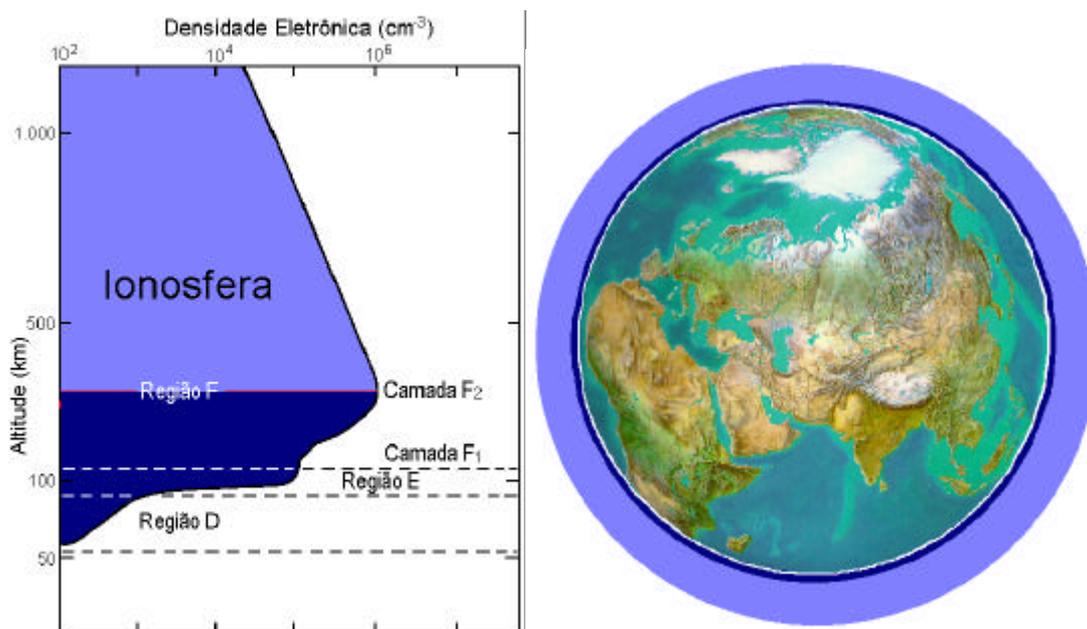


Fig. 2.1 – A esquerda, a localização das três camadas ionosféricas conhecidas no perfil ionosférico, com sua nomenclatura. E a direita, a dimensão aproximada da ionosfera (em azul similar a esquerda) em relação a Terra.  
FONTE: Adaptada de Kivelson e Russell (1995, p. 11).

Uma vez formada a ionosfera, os íons e elétrons tendem a se recombinar e a reagir com outras espécies de gases e produzir outros íons. Assim, há um

equilíbrio dinâmico no qual a concentração líquida de elétrons livres (densidade eletrônica  $N$ ) depende da taxa relativa de produção e perda. Em termos gerais, a taxa de troca de densidade eletrônica é expressa pela equação da continuidade (Hargreaves, 1992):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \nabla \cdot (N\mathbf{v}), \quad (2.1)$$

na qual  $q$  é a taxa de produção,  $L$  é a taxa de perda e  $\nabla \cdot (N\mathbf{v})$  expressa a produção/perda de elétrons pelo transporte, sendo  $\mathbf{v}$  a velocidade.

Em relação à atmosfera neutra, o máximo de produção da ionosfera ocorre abaixo da exobase (Figura 2.2). Note que apenas a camada mais baixa D está localizada abaixo da turbopausa. As regiões da atmosfera neutra são nomeadas de acordo com vários critérios: de acordo com a variação da temperatura, composição e o estado de mistura dos gases. Na Figura 2.2 podemos ver estas várias regiões e visualizar um perfil da atmosfera ionizada.

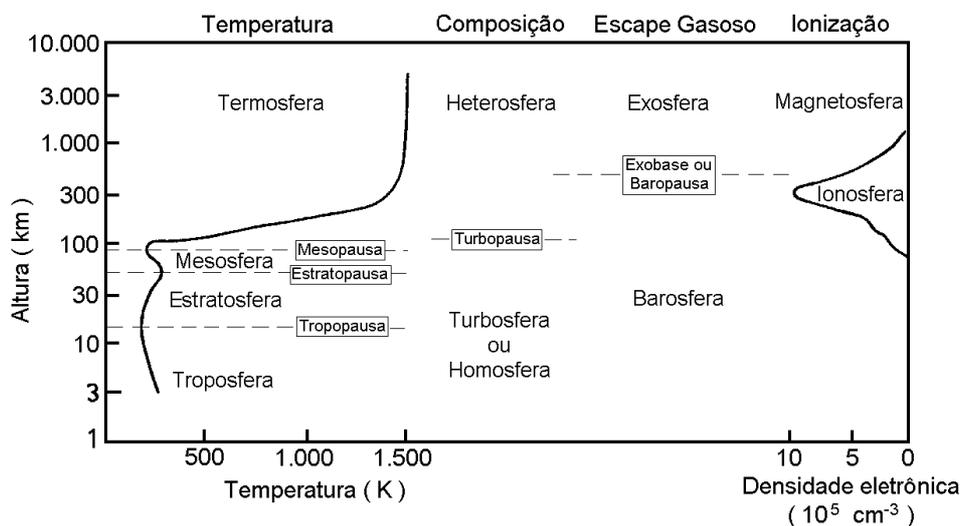


Fig. 2.2 – Classificação da atmosfera neutra e da atmosfera ionizada terrestre.  
 FONTE: Hargreaves (1992, p. 99).

### 2.1.1 Fontes de Ionização

As fontes de ionização são basicamente fótons e precipitação de partículas de alta energia. A primeira gera o processo chamado de fotoionização e tem sua principal fonte no Sol, e a segunda é chamada de ionização por impacto e se dá através do choque de partículas de alta energia com os constituintes da atmosfera neutra. Estas partículas podem vir de outras galáxias, do Sol, da magnetosfera ou da própria ionosfera, no caso de um processo local de aceleração de um íon ou elétron.

O único requisito é que as energias das partículas energéticas (energia cinética) e dos fótons ionizantes ( $h\nu$ ) excedam o potencial de ionização ou energia das ligações de um átomo ou molécula da atmosfera neutra. A Tabela 2.1 apresenta os potenciais de ionização e o correspondente máximo comprimento de onda de radiação que pode ionizar alguns dos vários gases constituintes da atmosfera.

Tabela 2.1 – VALORES DOS POTENCIAIS DE IONIZAÇÃO PARA VÁRIOS GASES CONSTITUINTES DA ATMOSFERA

Espécie	Potencial de Ionização (eV)	Máximo Comprimento de Onda ( $\lambda_{\max}$ )	
		(Å)	(nm)
NO	9,25	1340	134,0
O <sub>2</sub>	12,08	1027	102,7
H <sub>2</sub> O	12,60	985	98,5
O <sub>3</sub>	12,80	970	97,0
H	13,59	912	91,2
O	13,61	911	91,1
CO <sub>2</sub>	13,79	899	89,9
N	14,54	853	85,5
H <sub>2</sub>	15,41	804	80,4
N <sub>2</sub>	15,58	796	79,6
Ar	15,75	787	78,7
Ne	21,56	575	57,5
He	24,58	504	50,4

FONTE: Hargreaves (1992, p.223).

Sabemos que na natureza, a ionização atmosférica é usualmente atribuída a uma mistura destas fontes, mas uma delas sempre predomina. Com os valores de máximo comprimento de onda da radiação que pode ionizar os constituintes, imediatamente identificamos as partes relevantes do espectro solar como os raios-X (0,1-16 nm; 1-1600 Å) e o Ultra Violeta Extremo (EUV) (17-175 nm; 170-1750 Å) como principais agentes ionizantes.

### **2.1.2 As Camadas Ionosféricas**

A ionosfera apresenta três máximos de produção às alturas aproximadas de 80 km (pico da camada D), 105 km (pico da camada E) e 300 km (pico da camada F). Sua divisão deve-se principalmente aos diferentes processos de ionização dominantes nas diferentes alturas e às condições ambientais envolvidas no processo de recombinação. Normalmente, nos horários noturnos esse perfil aparece alterado. É possível identificar as subdivisões da camada F em F1 e F2. Além disso, a camada E apresenta variações abruptas na sua densidade e a camada D praticamente desaparece.

#### **2.1.2.1 A região D**

A região D tem sua localização na faixa de aproximadamente 60 a 95 km de altitude. Ela é a parte mais complexa da ionosfera do ponto de vista químico. Isto deve-se a dois fatores principais: esta região está sob uma alta pressão da coluna de ar e sofre ionização devido a várias fontes. Alguns dos principais agentes ionizantes desta região são listados a seguir:

- 1) a linha Lyman- $\alpha$  do espectro solar a 1216 Å que penetra abaixo de 95 km e ioniza a espécie minoritária óxido nítrico (NO);
- 2) EUV com espectro entre 1027 Å e 1118 Å ioniza outros constituintes minoritários e excita o oxigênio molecular no estado  $O_2(^1\Delta_g)$ ;
- 3) raios-X na faixa de 2 a 8 Å ionizam todos os constituintes;

- 4) raios cósmicos afetam toda a baixa atmosfera, tornando-se a maior fonte de ionização em alturas abaixo de 95 km;
- 5) partículas energéticas do Sol ou de origem auroral ionizam a região D em altas latitudes; e
- 6) partículas energéticas do cinturão de radiação ionizam a região da anomalia do Atlântico Sul, ou seja, a região brasileira.

#### **2.1.2.2 A Região E**

A região E da ionosfera é caracterizada por uma densidade eletrônica crescente iniciando em aproximadamente 90 km até atingir seu máximo entre 105 e 110 km. A partir desta altura, a densidade eletrônica decresce até o limite 130 km de altitude, onde já começa a destacar-se a camada superior da ionosfera. Ela é gerada pela parte do espectro que não é absorvido tão intensamente, apesar de fortemente penetrante. A radiação EUV entre 800 e 1027 Å é absorvida pelo Oxigênio molecular para formar  $O_2^+$ . Mas também há a presença de outras fontes de ionização como os raios-X.

Os principais íons primários ionizados são  $N_2^+$ ,  $O_2^+$  e  $O^+$ , mas também encontramos grande número de  $NO^+$ . E é, ainda na região E que vamos encontrar íons metálicos de origem meteórica, tais como:  $Fe^+$ ,  $Mg^+$ ,  $Ca^+$  e  $Si^+$ .

#### **2.1.2.3 A Região F1**

A perda iônica na região F ocorre num processo de 2 estágios: o primeiro passo é a transferência da carga positiva de um átomo ionizado para uma molécula e o segundo passo é dissociar a molécula carregada, recombina-a com um elétron.

Para taxa de recombinação da reação do primeiro passo temos o coeficiente de recombinação linear  $\beta$  e para taxa de recombinação da reação do segundo

passo temos o coeficiente de recombinação quadrática  $\alpha$ . O fato é que o coeficiente da primeira reação depende da concentração das moléculas neutras. Assim, em baixas altitudes  $\beta$  é grande e o processo fica dominado pelo coeficiente da segunda reação  $\alpha$ . Nas altitudes onde  $\beta$  é pequeno, ele passa a governar o processo completo. Assim, à medida que subimos no perfil ionosférico, o processo de perda vai passando do tipo  $\alpha$  (perda quadrática) para o tipo  $\beta$  (perda linear). No equilíbrio, a produção  $q$  fica (Hargreaves, 1992):

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{\beta(h) \cdot N_e} + \frac{1}{\alpha \cdot N_e^2} \quad (2.2)$$

Então a troca do predomínio do termo de perda quadrática  $\alpha$  para o predomínio do termo de perda linear  $\beta$  ocorre na altura  $h_t$ , para a qual:

$$\beta(h_t) = \alpha \cdot N_e \quad (2.3)$$

A espécie molecular predominante na altura da camada F1 é o  $N_2$  e o íon majoritário é  $O^+$ . Neste caso, a altura  $h_t$  ocorre aproximadamente entre 160 e 180 km. Nesta região temos a camada F1, que é caracterizada por um pequeno pico ou uma simples inflexão na curva do perfil vertical eletrônico/iônico, dependendo da altura  $h_o$  (altura do máximo da perda quadrática) na qual a perda linear passa a dominar o processo. Para ilustrar essa especial característica da região F1, apresentamos a Figura 2.3.

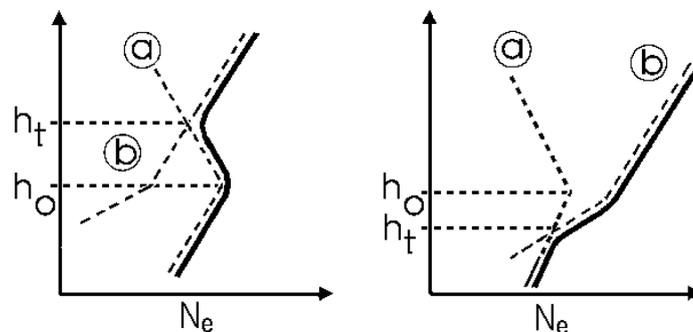


Fig. 2.3 – Formação da camada F1, de acordo com o comportamento das perdas linear (curva b) e quadráticas (curva a).

FONTE: Kirchhoff (1991, p. 89).

#### 2.1.2.4 A Região F2

A região F2 engloba toda a região superior da ionosfera. A primeira menção de sua existência foi através de um quebra-cabeças, pois um pico de produção ionosférica apareceu entre 200 e 400 km onde a banda de radiação capaz de ionizar as espécies locais já não apresentava mais seu máximo de intensidade. A resposta está na variação com a altura do coeficiente de recombinação.

Para explicar a formação da região F2 temos que considerar a parte superior da ionosfera, onde a recombinação é dominada pelo tipo  $\beta$ , com o coeficiente dependendo da concentração da espécie molecular  $N_2$ . E devemos considerar também que a taxa de produção depende da concentração de  $O^+$ . Assim, no equilíbrio entre produção e perda vamos encontrar:

$$Ne = \frac{q}{\beta} \propto \frac{[O]}{[N_2]} \propto \exp\left[-\frac{h}{H(O)} + \frac{h}{H(N_2)}\right], \quad (2.4)$$

na qual  $H(O)$  e  $H(N_2)$  são respectivamente as escalas de altura de  $O$  e  $N_2$ . Desde que as massas de  $N_2$  e  $O$  estão na razão de 1:1,75 a equação 2.4 fica:

$$Ne \propto \exp\left[-\frac{h}{H(O)} \cdot \left(1 - \frac{H(O)}{H(N_2)}\right)\right] \propto \exp\left[0,75 \cdot \frac{h}{H(O)}\right]. \quad (2.5)$$

Assim, a região F2 fica caracterizada porque há um aumento da densidade eletrônica com a altura, pois a taxa de perda cai mais rapidamente que a de produção. Isso ocorre até uma altura limite, onde surge o pico da região F2, por volta de aproximadamente 250 a 300 km. A partir daí começam a surgir outros processos difusivos que potencializam os processos de perda.

Uma consideração final sobre a região F2 é que ela é dominada, quase que na sua totalidade, por processos dinâmicos, havendo uma grande interação entre a ionosfera superior e os ventos termosféricos<sup>1</sup>.

## **2.2 O Eletrojato Equatorial**

Os estudos com magnetômetros de Graham levaram-no a notar, em 1724, variações diárias regulares no campo magnético terrestre. Neste século, em 1922, estudos das variações da componente horizontal do campo magnético em Huancayo, próximo ao equador magnético, revelaram que a magnitude da variação diária é da ordem de 2,5 vezes superior ao observado em estações mais afastadas do equador. Isso indica a existência de uma faixa de intensa corrente centrada no equador magnético. Essa faixa foi chamada de “eletrojato equatorial” por Sydney Chapman em 1951.

O eletrojato equatorial é, portanto, uma corrente que flui ao longo do equador magnético, na região E da ionosfera. Está confinado em uma faixa de 600 km de extensão na direção norte-sul, entre aproximadamente 90 e 120 km de altitude. Seu sentido é para leste durante o dia e para oeste durante a noite. Ele é dirigido por um sistema global de campos elétricos produzidos pelo dínamo atmosférico, e seu confinamento na região mencionada é devido à orientação horizontal do campo magnético e às condutividades ionosféricas locais (Forbes, 1981; Reddy, 1989).

Não é objetivo deste trabalho apresentar comparações entre características particulares do eletrojato equatorial em diferentes regiões ao longo do equador. Entretanto, é importante mencionar que Kane e Trivedi (1982, 1985) realizaram estudos dessa natureza.

---

<sup>1</sup> Os ventos termosféricos são gerados por gradientes de pressão horizontal devido à expansão térmica da atmosfera iluminada. Um efeito importante é a capacidade destes ventos de deslocar as camadas ionizadas para mais altas altitudes durante a noite.

### 2.2.1 Condutividade

A condutividade elétrica do meio determina o quão permeável esse meio é ao fluxo de uma corrente eletrônica. Para a ionosfera, usamos o tensor condutividade elétrica, o qual é usado para relacionar os campos com as correntes ionosféricas, e é usado também para relacionar a deriva ( $\mathbf{U} \times \mathbf{B}$ ) provocada pela perpendicularidade dos ventos neutros  $\mathbf{U}$  e campo magnético  $\mathbf{B}$ , com as correntes em altas latitudes que polarizam os terminadores. A forma mais simplificada do mesmo tensor relaciona o campo elétrico  $\mathbf{E}$  da região E equatorial com a corrente do eletrojato. Esse tensor condutividade elétrica é dado por:

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

no qual os termos  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são definidos pelas equações a seguir, e o ângulo  $I$  é a inclinação do campo geomagnético  $\mathbf{B}$ , referente ao sistema representado na Figura 2.4.

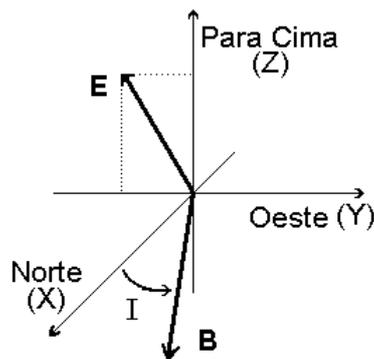


Fig. 2.4 – Sistema de referência consistente com o tensor de condutividade, mostrando a posição dos campos elétrico e geomagnético e o ângulo de inclinação  $I$  (positivo no hemisfério norte).

FONTE: Kudeki (1983, p. 12).

O termo  $\sigma_0$  é a condutividade longitudinal, e refere-se à condutividade na direção da componente de  $\mathbf{E}$  paralela a direção do campo geomagnético  $\mathbf{B}$ :

$$\sigma_0 = n \cdot e^2 \cdot \left[ \frac{1}{m_e \cdot v_e} + \frac{1}{m_i \cdot v_i} \right]. \quad (2.6)$$

O termo  $\sigma_1$  é a condutividade Pedersen ou transversal, e refere-se a condutividade na direção da componente de  $\mathbf{E}$  perpendicular a direção do campo geomagnético  $\mathbf{B}$ :

$$\sigma_1 = n \cdot e^2 \cdot \left[ \frac{v_e}{m_e (v_e^2 + \Omega_e^2)} + \frac{v_i}{m_i (v_i^2 + \Omega_i^2)} \right]. \quad (2.7)$$

O termo  $\sigma_2$  é a condutividade Hall, e refere-se a condutividade na direção perpendicular, simultaneamente, as direções do campo geomagnético  $\mathbf{B}$  e da componente de  $\mathbf{E}$  perpendicular a direção do campo geomagnético  $\mathbf{B}$ :

$$\sigma_2 = n \cdot e^2 \cdot \left[ -\frac{\Omega_e}{m_e (v_e^2 + \Omega_e^2)} + \frac{\Omega_i}{m_i (v_i^2 + \Omega_i^2)} \right]. \quad (2.8)$$

Nas equações 2.6, 2.7 e 2.8,  $\Omega_i$  e  $\Omega_e$  são as freqüências ciclotrônicas,  $v_i$  e  $v_e$  são as freqüências de colisão,  $m_i$  e  $m_e$  são as massas dos íons e dos elétrons respectivamente, “e” é a carga do elétrons e “n” é a densidade de plasma. No equador geomagnético o ângulo de inclinação é zero, e o tensor condutividade  $\underline{\sigma}$  resume-se a:

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

No equador magnético temos o campo elétrico  $\mathbf{E}$  quase totalmente perpendicular ao campo  $\mathbf{B}$  tornando a condutividade longitudinal praticamente nula. Como as condutividades são funções das freqüências ciclotrônicas, das

freqüências de colisão e das massas dos íons e dos elétrons, além da densidade de plasma, e essas quantidades variam com a altura, essas condutividades também apresentam uma variação com a altura, conforme demonstrado na Figura 2.5.

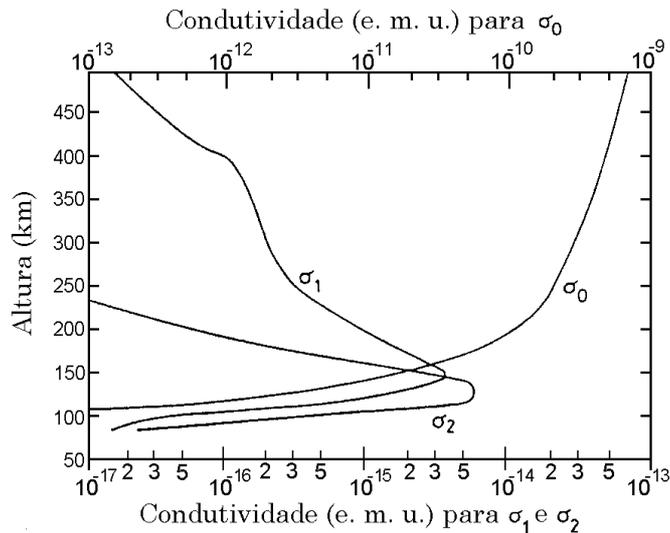


Fig. 2.5 – Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal  $\sigma_0$ , Pedersen  $\sigma_1$  e Hall  $\sigma_2$  com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) =  $10^{11}$  S/m (SI). FONTE: Akasofu e Chapman (1972, p. 244).

Neste gráfico podemos ver que elas apresentam um máximo nas alturas da região E, com as condutividades Pedersen e Hall decaindo rapidamente para alturas abaixo e acima do máximo. No equador magnético esse pico fica em torno de 150 km para a condutividade Pedersen e 130 km para a Hall.

Com a queda rápida nas condutividades Pedersen e Hall em torno do máximo, a corrente vertical fica confinada a uma determinada altura, criando assim um campo vertical de polarização. Usando a relação  $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$ , vamos obter o seguinte sistema de equações:

$$J_y = \sigma_1 \cdot E_y - \sigma_2 \cdot E_z ; \quad (2.9)$$

$$J_z = \sigma_2 \cdot E_y + \sigma_1 \cdot E_z = 0 . \quad (2.10)$$

Resolvendo este sistema, vamos encontrar a condutividade Cowling que é a condutividade resultante na direção da corrente do eletroto equatorial. Como ela é uma função das condutividades Pedersen e Hall, o máximo para a condutividade Cowling ficará em torno de 100 km.

$$J_y = \left( \sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1} \right) \cdot E_x \Rightarrow J_y = \sigma_3 \cdot E_x \quad (2.11)$$

### 2.2.2 A Teoria do Dínamo Atmosférico

A teoria do dínamo atmosférico foi sugerida pela primeira vez por Balfour Stewart em 1882 e mais tarde foi desenvolvida por Chapman e Bartels (1940), Maeda e Kato (1966) e Lindzen e Chapman (1969) levando em conta a existência de um sistema de correntes ionosféricas global. Medidas de variações magnéticas de várias latitudes geomagnéticas, durante o período de equinócio, sob condições de dia calmo (*Solar quiet* - Sq), apresentaram um padrão de variação diurno conforme mostra a Figura 2.6.

Na Figura 2.6, a escala de variação vertical (em gamas) está referenciada à abscissa de Tucson, a qual serve para todas as estações, bastando apenas ajustar a referência zero. Uma conveniente representação da fonte dessa variação magnética regular é uma lâmina de corrente, fluindo nas alturas da região E da ionosfera, aproximadamente a 100 km de altitude, onde a condutividade máxima é encontrada (Rishbeth e Garriott, 1969). Uma lâmina de corrente para leste a essa altitude produz uma componente de campo magnético direcionada para norte ao nível do solo, enquanto uma lâmina de corrente direcionada para oeste produz uma componente para sul. Portanto, em latitudes norte menores que 40°, nos horários diurnos, uma corrente se desenvolveu para leste e produziu um acréscimo em  $\Delta X'$ . Entretanto, nos mesmo horários, em altas latitudes a corrente que se desenvolveu teve sentido

para oeste, reduzindo  $\Delta X'$  (vide Figura 2.6). A transição entre os sentidos da lâmina de corrente ocorre nas latitudes aproximadas de Tucson e Watheroo.

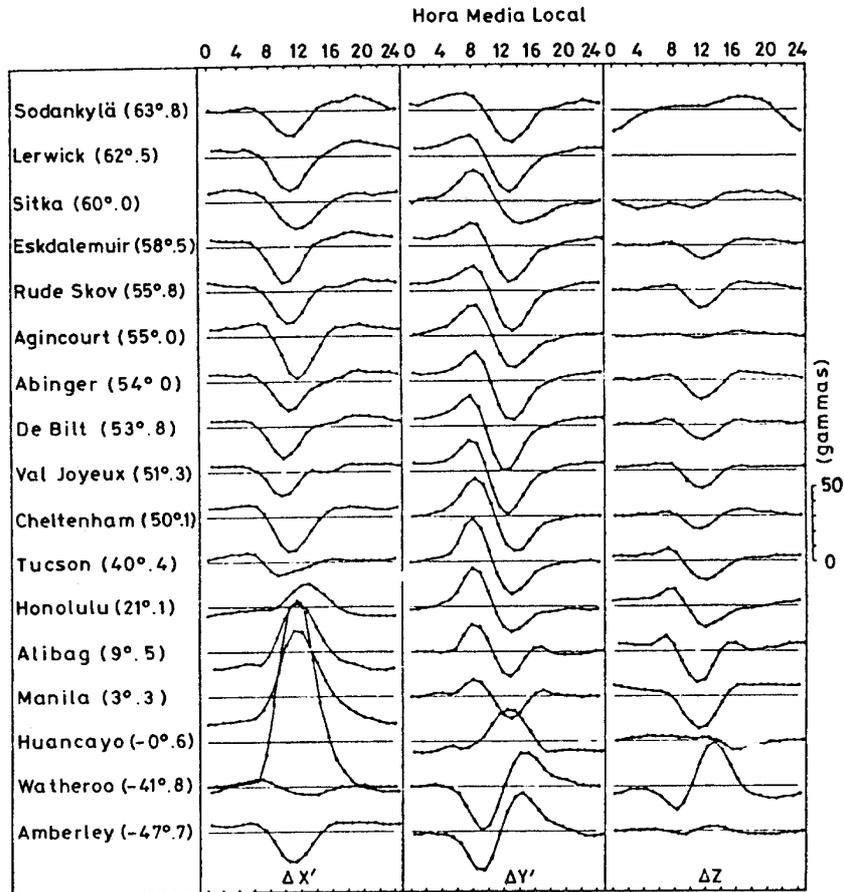


Fig. 2.6 – Variações magnéticas de várias latitude geomagnéticas, durante o período de equinócio, sob condições de dia calmo  $S_q$ , onde  $\Delta X'$ ,  $\Delta Y'$  e  $\Delta Z'$  são desvios do campo  $\mathbf{B}$  vistos nos magnetogramas, respectivamente com sentido para norte, leste e para baixo.

FONTE: Vestine (1960, p. 226).

Observando que, para os horário diurnos, o desvio em  $\Delta X'$  é o inverso dos horários noturnos, podemos identificar que no lado iluminado pelo Sol teremos lâminas de corrente em sentidos opostos àqueles do lado não iluminado. Verificando a simetria das curvas  $\Delta X'$  da Figura 2.6, em relação ao equador geomagnético, verificamos que devem haver lâminas de correntes de sentidos opostos para os hemisférios, norte e sul.

A geração desse sistema de correntes se dá segundo a teoria do dínamo atmosférico. Nessa teoria, marés atmosféricas dirigidas pelo aquecimento solar e pela atração lunar provocam o surgimento de ventos neutros. Esses ventos neutros, de velocidade  $\mathbf{U}$ , durante o dia sopram em direção aos pólos, através do campo geomagnético induzindo campos elétricos  $\mathbf{E} = \mathbf{U} \times \mathbf{B}$  em altas latitudes, pois nessas regiões a inclinação do campo magnético é maior. Esses campos geram correntes,  $\mathbf{J}$  dada por:

$$\mathbf{J} = \underline{\underline{\sigma}} \cdot \mathbf{E} \Rightarrow I = \int \hat{j} \cdot \hat{n} ds , \quad (2.12)$$

na qual  $\underline{\underline{\sigma}}$  é o tensor condutividade elétrica. Essas correntes podem ser divergentes, mas para os pontos onde  $\nabla \cdot \mathbf{J} \neq 0$ , cargas de polarização serão criadas instantaneamente para modificar a densidade de corrente tornando o campo não divergente. Esse campo elétrico de polarização pode ser representado por um gradiente de potencial escalar  $\phi$  (Kudeki, 1983). Assim, o campo total do dínamo gerado será:

$$\mathbf{E}_D = (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) - \nabla\phi , \quad (2.13)$$

na qual  $\phi$  é o potencial escala eletrostático. A densidade de corrente total será:

$$\mathbf{J} = \underline{\underline{\sigma}} \cdot \mathbf{E}_D = \underline{\underline{\sigma}} \cdot ((\mathbf{U} \times \mathbf{B}) - \nabla\phi) . \quad (2.14)$$

Esse sistema de correntes polariza positivamente o terminador do lado do amanhecer e negativamente do lado do anoitecer. Devido às configurações de condutividades, a ação do dínamo é mais efetiva na região do equador magnético, a uma altura entre 90 e 120 km. Nessa região surge uma corrente que flui do terminador do amanhecer para o terminador do anoitecer nos dois lados da Terra, lado dia e lado noite. Dessa forma a corrente terá sentido leste

no lado dia e sentido oeste no lado noite. Entretanto sua intensidade do lado dia é superior a do lado noite devido a densidade eletrônica ser maior do lado iluminado pelo sol. Um esquema resumindo a teoria envolvida nessa seção é apresentado na forma da Figura 2.7.

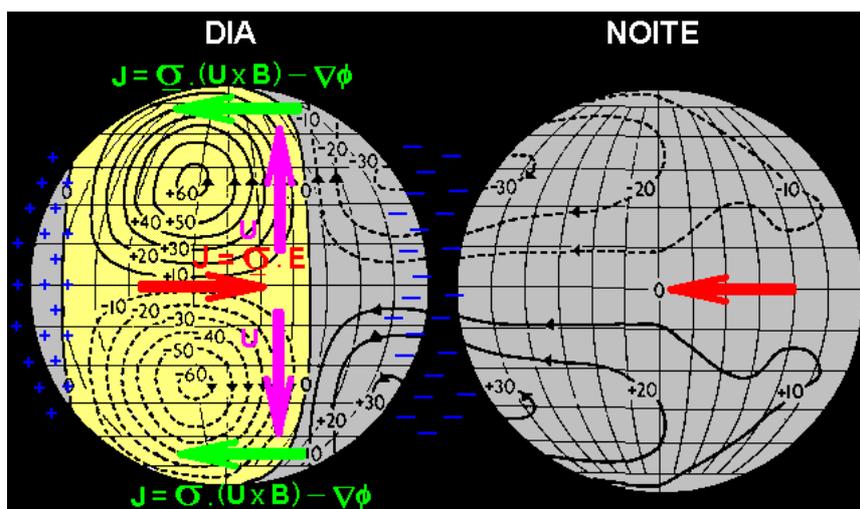


Fig. 2.7 – Formação do sistema Sq de correntes, baseado na teoria do dínamo atmosférico. No esquema são mostrados os ventos neutros  $\mathbf{U}$  no sentido dos pólos no lado iluminado pelo sol, as correntes de altas latitudes  $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) - \nabla\phi$  que polarizam os terminadores e o eletrojoato equatorial  $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$ .  
 FONTE: Adaptada de Chapman e Bartels (1940, p. 228).

### 2.2.3 Composição da Corrente do Eletrojoato

De maneira simplificada, um campo elétrico devido à polarização dos terminadores é aplicado à ionosfera equatorial na direção leste. Nesta região temos regiões de plasma de maior condutividade elétrica que as regiões adjacentes. Mas o campo elétrico tem a característica de alterar muito pouco sua intensidade nas alturas da região E, e dessa forma terá praticamente a mesma intensidade nas regiões de maior ou menor condutividade (Budden, 1966).

Esse campo elétrico forçará uma corrente Pedersen na direção do campo e uma corrente Hall na direção perpendicular aos campos elétrico e magnético simultaneamente. Isso pode ser visto no primeiro quadro (a esquerda) da

Figura 2.8. Porém, a região 1 tem condutividade maior que a região 2, e como conseqüência, correntes mais intensas fluirão na região 1. Mas a corrente Hall, que é a componente normal, fica inibida a partir de determinada altura, fazendo surgir um campo elétrico vertical, com o sentido indicado no segundo quadro da Figura 2.8. Com esse campo de polarização, surgem também correntes Pedersen e Hall associadas a sua presença.

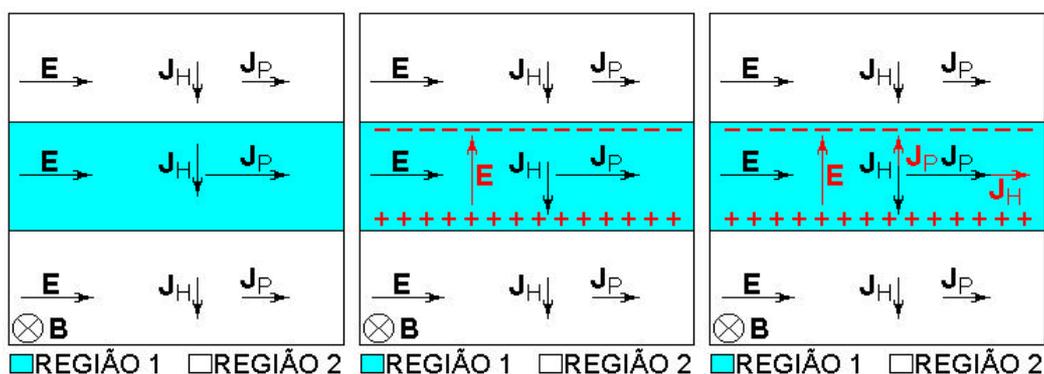


Fig. 2.8 – Formação de correntes Pedersen e Hall devido a campos elétricos aplicados a duas regiões adjacentes de condutividades diferentes. Essa configuração é uma simplificação da distribuição de densidades em torno do equador magnético entre, aproximadamente, 90 e 120 km de altitude.

Assim, a corrente Pedersen resultante devido ao aparecimento de um campo elétrico leste–oeste é acrescida da componente Hall do campo elétrico de polarização, e a corrente Hall do primeiro campo é reduzida pela corrente Pedersen do campo elétrico devido à separação de cargas. Este esquema pode ser visualizado no terceiro quadro da Figura 2.8.

#### 2.2.4 Irregularidades no Eletrojato Equatorial

Irregularidades ionosféricas são variações na densidade eletrônica local e são fortemente alinhadas ao campo geomagnético. Elas estão presentes dia e noite, exceto durante curtos períodos no alvorecer e ao anoitecer. Os primeiros experimentos de espalhamento ionosféricos em VHF (Bowles et al., 1960; Bowles e Cohen, 1962) mostraram que os ecos recebidos com essa técnica

eram devido ao espalhamento dos pulsos de radar nas irregularidades do eletrojato equatorial.

Na técnica de radares, uma parte do pulso de sinal transmitido é retroespalhado por uma região onde as irregularidades têm dimensão igual à metade do comprimento de onda do sinal transmitido do radar, na direção do vetor de onda do radar. Assim, no caso de radares operando a 50 MHz ( $\lambda = 6$  m) o sinal será retroespalhado por irregularidades com comprimento em torno de 3 m.

A análise espectral do sinal recebido a 50 MHz em Jicamarca tem mostrado a existência de duas distintas classes de ecos. Uma classe de espectro, chamado tipo 1 (Figura 2.9a), apresenta um pico de potência estreito e centrado aproximadamente sob o deslocamento Doppler correspondente a velocidade íon acústica, a qual é em torno de 360 m/s na região E equatorial. A outra classe, chamada tipo 2 (Figura 2.9b), apresenta um espectro de potência mais espalhado e com o deslocamento Doppler menor que o correspondente da velocidade íon acústica.

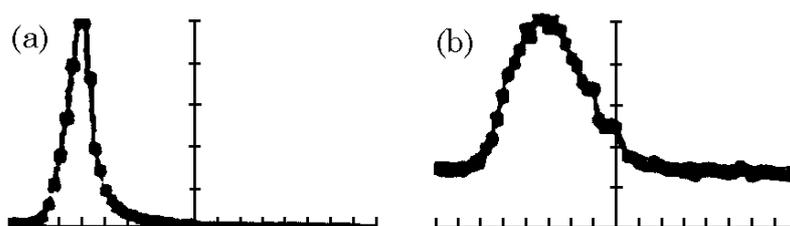


Fig. 2.9 – Espectro de potência tipo 1 (a) e tipo 2 (b), medido sobre Jicamarca com feixe do radar a um ângulo zenital de  $60^\circ$  orientado para oeste. Cada espectro foi normalizado para seu próprio valor de pico. O eixo horizontal é a faixa de excursão do deslocamento Doppler de  $-200$  Hz (esquerda) a  $+200$  Hz (direita).  
FONTE: Kudeki (1983, p. 22).

Os ecos tipo 1 têm sido associados às irregularidades geradas pela instabilidade de plasma chamada dois feixes (*two-stream*). Esse tipo de

instabilidade ocorre no plasma quando a força inercial dos íons associada com uma perturbação de densidade excede a força do gradiente de pressão, a qual tende a destruir a perturbação causando difusão através da linha de campo magnético. Isto tende a acontecer quando a velocidade de deslocamento dos elétrons ultrapassa a velocidade íon acústica. Em dias magneticamente calmos, ecos relacionados com esses tipo de irregularidades são esperados em horários entre às 10 e 13 horas local (Forbes, 1981).

Os ecos tipo 2 têm sido associados a irregularidades geradas pela instabilidade de plasma chamada deriva de gradiente (*gradient drift*). Este tipo de instabilidade ocorre em plasmas não homogêneos se um campo elétrico ambiente ( $\delta\mathbf{E}$ ) gerado pela diferença de densidade tem uma componente muito acentuada na direção paralela ao gradiente de densidade. Neste caso, perturbações nesse campo elétrico levam a um deslocamento de densidade eletrônica na direção  $\delta\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , que pode ser ascendente ou descendente dependendo da distribuição de densidade da região perturbada. Em dias magneticamente calmos, ecos relacionados com esses tipo de irregularidades podem aparecer desde os primeiros horários da manhã até o pôr-do-sol.

No eletrojato equatorial quase sempre encontramos esses dois tipos de irregularidades e, dependendo do sentido do eletrojato e do gradiente de densidade, os dois tipos de mecanismo geradores de irregularidades podem adicionar-se ou subtrair-se.

### **2.3 Instabilidades de Plasma da Região F Equatorial**

Os fenômenos de instabilidade de plasma que ocorrem na região F equatorial da ionosfera que foram detectados por diversas técnicas (experimentos a bordo de foguetes e satélites; radiossondagens com ionossondas e radares de espalhamento coerente e incoerente, etc.) e estão agrupados sob o mesmo nome genérico: *spread F* equatorial (*equatorial spread F* - ESF). Esta

denominação vem das primeiras observações usando ionossondas, onde foram observados espalhamentos em altura e frequência (Booker e Wells, 1938). Esses fenômenos são manifestações diretas do acoplamento eletrodinâmico que governa o sistema ionosfera–termosfera. O desenvolvimento desses fenômenos envolvem configurações geomagnéticas específicas, a necessidade de uma perturbação ionosférica de grande escala como evento precursor da irregularidade, e alguns fatores geográficos que influenciam a velocidade de deslocamento vertical da ionosfera (Abdu, 1993).

### **2.3.1 Morfologia e Desenvolvimento de ESF**

A ocorrência de *spread F* é mais freqüente à noite (Woodman, 1970). Booker e Wells (1938) mostraram que a elevação da camada F, que ocorre à noite, é condição necessária para o surgimento e subsequente desenvolvimento da ESF. Porém, existem outros fatores, que são discutidos adiante, que determinam o tipo de *spread F* que se desenvolverá. De acordo com sua evolução temporal, sazonalidade e distribuição longitudinal, e considerando os ambientes eletrodinâmicos e as estruturas espaciais das irregularidades, nós os classificamos em três tipos.

Tipo I: Traço F espalhado (*Range Spread F*), muitas vezes associados às bolhas de plasma ionosférico, com estrutura de irregularidade estendendo-se desde a base da camada F chegando até, em alguns casos, ao seu topo. Em ionogramas são vistas como espalhamento em altura e em radares VHF como ecos retroespalhados das irregularidades em mapas de variação temporal de intensidade de potência (*range time intensity* - RTI). Um exemplo desses mapas é apresentado na Figura 2.10 onde podemos ver em tons de cinza a potência do sinal recebido de retroespalhamento do sinal do radar.

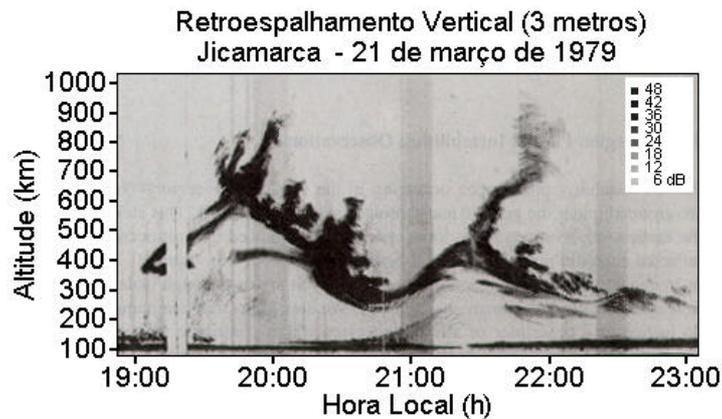


Fig. 2.10 – Mapa de variação temporal de intensidade de potência (RTI) do retroespalhamento de irregularidades, obtido com o radar de Jicamarca, Peru.  
FONTE: Kelley et al. (1981, p. 9.090).

A escala de tempo horizontal é tal que a velocidade de deriva de plasma (~125 m/s) multiplicada pela hora local resulta a escala de distância horizontal igual a escala de distância vertical. Assim, esse gráfico reproduz a geometria do espalhamento ionosférico como se as irregularidades estivessem paradas em um meio que se move com velocidade constante. Essas irregularidades na distribuição de plasma foram chamadas inicialmente de “plumas”. Elas provavelmente são resultados de uma instabilidade convectiva dirigida por forças gravitacionais e eletrodinâmicas. Woodman e LaHoz (1976) interpretaram essas “plumas” como sendo bolhas de plasma ascendentes.

Tipo II: Espalhamento em frequência (*Frequency Spread F*), restrita à região abaixo do pico da camada F2. Na literatura, esse tipo de espalhamento é conhecido como BSF, do inglês *bottomside spread F*. Esse tipo é observado em ionogramas sob forma de múltiplos traços na parte do traço que corresponde às frequências mais elevadas (Figura 2.11; 2001 HL e 2348 HL).

23 de maio de 1979

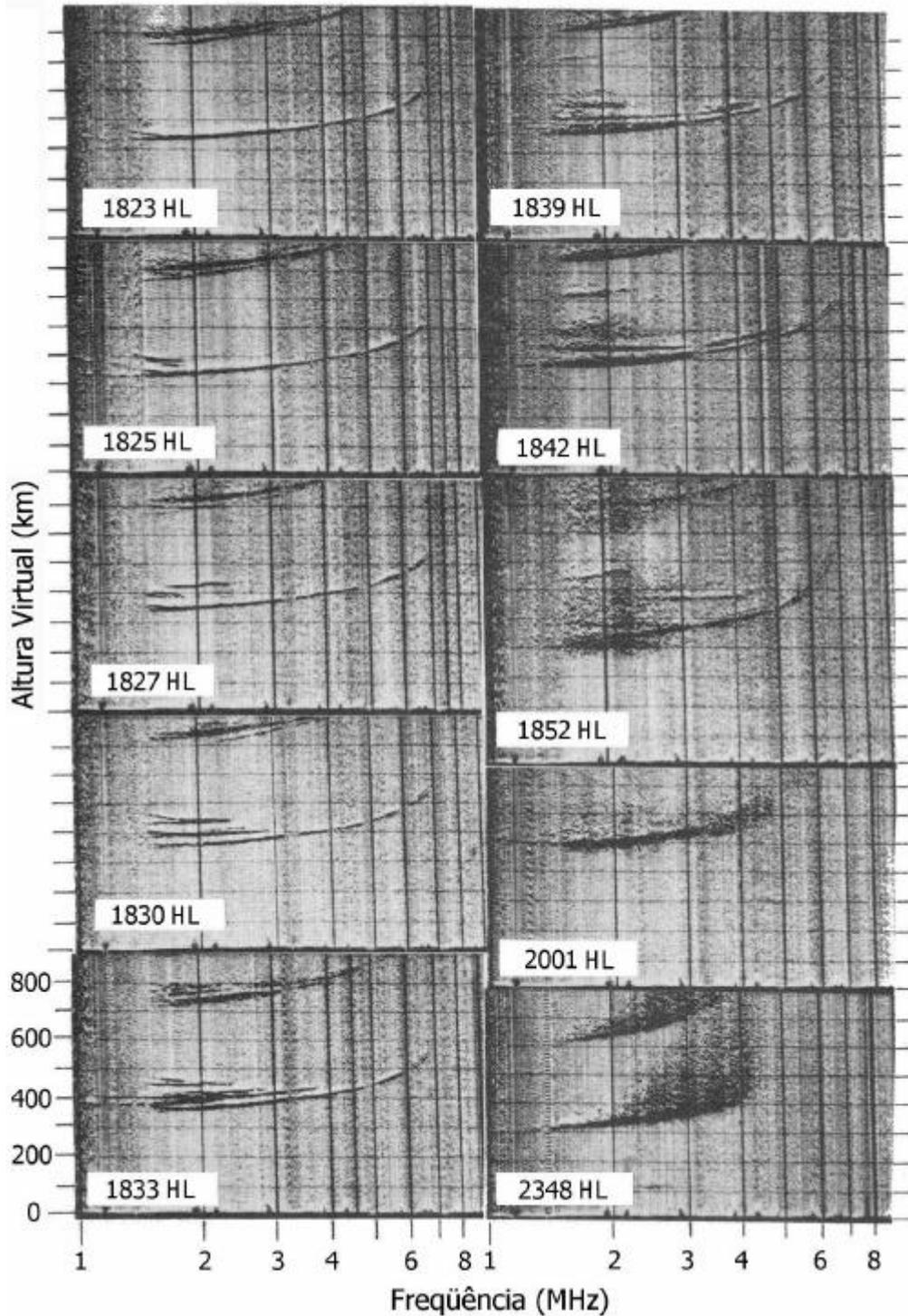


Fig. 2.11 – Seqüência de ionogramas mostrando a evolução no tempo do traço "satélite" desde sua primeira aparição próxima a baixa freqüência do traço de primeira reflexão (em 1823 HL) até o desenvolvimento total do espalhamento em altura (em 1852 HL). Os dois últimos quadros apresentam exemplos de espalhamento em freqüência.  
FONTE: Abdu et al. (1981, p. 6.837).

Tipo III: Este tipo de *spread F* foi detectado com medidas de satélite (McClure e Hanson, 1973; Valladares et al., 1983; Cragin et al., 1985) e é conhecido como BSS, do inglês *bottomside sinusoidal spread F*. Sua localização de ocorrência é restrita à região próxima ao pico da camada F2. Em ionogramas esse tipo está relacionado com espalhamento na frequência.

Nos anos setenta, vários estudos foram conduzidos no sentido de tentar explicar o mecanismo de formação e a morfologia do ESF (Farley et al., 1970; Balsley et al., 1972; Woodman e LaHoz, 1976), e desde então muito progresso tem sido feito. Atualmente, sabemos que as “plumas” têm seu tamanho relacionado com regiões de depressão da densidade de plasma; que seu desenvolvimento se inicia na base da camada F, na região de gradiente de densidade positiva; que podem ser alcançadas velocidades de crescimento vertical entre 100 e 200 m/s e velocidades zonais em torno de 150 m/s para oeste; que são alinhadas ao campo geomagnético, e que os graus de crescimento são proporcionados pelas diferentes condições de distribuição de condutividade, ventos neutros e campos elétricos que surgem no ambiente ionosfera–termosfera.

Além de oferecer características de ESF, toda a literatura consultada aponta para o fato de que é necessário algum tipo de evento ionosférico capaz de provocar a perturbação inicial que forneça condições para o desenvolvimento de ESF. Abdu et al. (1981) investigaram algumas características de *spread F* com a ionossonda de Fortaleza localizada próxima ao equador magnético (38° O; 4° S) e contribuíram para o conhecimento do mecanismo de formação das irregularidades demonstrando que traços “satélites” precedem ecos difusos caracterizando a presença de espalhamento em altura. A Figura 2.11 apresenta um exemplo da evolução de um evento de espalhamento da faixa com o decorrer do tempo.

A presença desses traços “satélites” sugere que são necessárias estruturas ionosféricas de ordem de grandeza de 100 a 200 km para a formação das irregularidades do tipo I. Esses traços podem ser causados por estruturas ionosféricas alinhadas ao campo geomagnético, tais como perturbações ionosféricas que se propagam (*traveling ionospheric disturbance* - TID) com comprimento de onda similar. Essa perturbação inicial pode crescer na presença de um gradiente de densidade eletrônica, entre outras condições, até tornar-se uma bolha de plasma, e pode ser explicada pela teoria linear da instabilidade tipo *Rayleigh–Taylor*.

Além da TID, outros fenômenos que têm sido relatados como capazes de promover a perturbação inicial necessária à geração de ESF, são as ondas de gravidade internas, capazes de organizar o plasma em regiões de baixa e alta densidade. Essas ondas de gravidade podem ser geradas em zonas aurorais (menos eficientes na geração das instabilidades) ou por fontes troposféricas como nuvens de tempestade ou sistemas de frentes.

### **2.3.2 Teoria Linear da Instabilidade Tipo Rayleigh–Taylor**

A teoria gravitacional de *Rayleigh–Taylor* foi proposta como sendo o processo dominante no desenvolvimento de ESF. Ela teve seu período de rejeição inicial por parte da comunidade científica, mas foi aceita por ser capaz de explicar como uma bolha de plasma forma-se de uma pequena instabilidade na base da camada F.

Essa teoria considera um meio menos denso sustentando um meio mais denso, envolvendo a ação da gravidade, que está em situação de equilíbrio instável. Quando um evento ocorre introduzindo uma pequena perturbação, sob condições especiais, essa perturbação pode se desenvolver.

A equação 2.15 descreve o movimento de partículas carregadas, imersas em um campo magnético, sob a ação de forças externas, na direção perpendicular de aplicação da força (Kelley, 1989).

$$V_{\perp} = \frac{1}{B^2} \left[ \mathbf{E} - \left( \frac{kT}{q} \right) \frac{\nabla n}{n} + \frac{M\mathbf{g}}{q} \right] \times \mathbf{B} \quad (2.15)$$

Nessa equação,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $q$  é a carga elétrica,  $M$  é a massa da partícula,  $n$  é a densidade eletrônica,  $T$  é a temperatura e  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico ambiente. O primeiro termo do lado direito da equação 2.15 é devido a presença de um campo elétrico, o segundo é devido ao efeito difusivo de íons e elétrons na presença da atmosfera neutra, e o terceiro termos é devido a ação da gravidade. Observando que o termo devido a ação da gravidade é proporcional a massa, podemos concluir a espécie dominante para esse termo é a espécie iônica. Portanto, a corrente efetiva devido ao efeito da gravidade será dada pela equação 2.16.

$$\mathbf{J} = \frac{nM\mathbf{g}}{B} \quad (2.16)$$

A partir da geração dessa corrente horizontal são produzidos campos elétricos de polarização  $\delta\mathbf{E}$ , com efeito contrário em semi ciclos subsequentes de uma pequena perturbação senoidal, como mostrado na Figura 2.12. Segundo a equação 2.15, na região de depressão da densidade de plasma, esse campo causará uma deriva para cima ( $\delta\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ), e na região de aumento da densidade uma deriva para baixo. Essas derivas tendem a acentuar a separação de cargas que produzem o campo  $\delta\mathbf{E}$  que por sua vez intensifica a deriva tornando o processo instável.

No canto superior esquerdo da Figura 2.12 (a) temos a corrente  $\mathbf{J}$ , produzida pela perpendicularidade entre a força de gravidade e o campo magnético,

capaz de produzir campos de polarização  $\delta\mathbf{E}$ . No canto superior direito da mesma Figura 2.12 (a), temos uma outra corrente  $\mathbf{J}$ , mas esta é gerada por um campo  $\mathbf{E}_0$  dirigido para leste e relacionado com a corrente  $\mathbf{J}$  pela condutividade Pedersen. Segundo Rishbeth (1977) e Heelis et al. (1974), esse campo  $\mathbf{E}_0$  pode ser gerado pela presença de um gradiente longitudinal na condutividade Pedersen da camada E conjugada e é conhecido como campo elétrico pré-reverso.

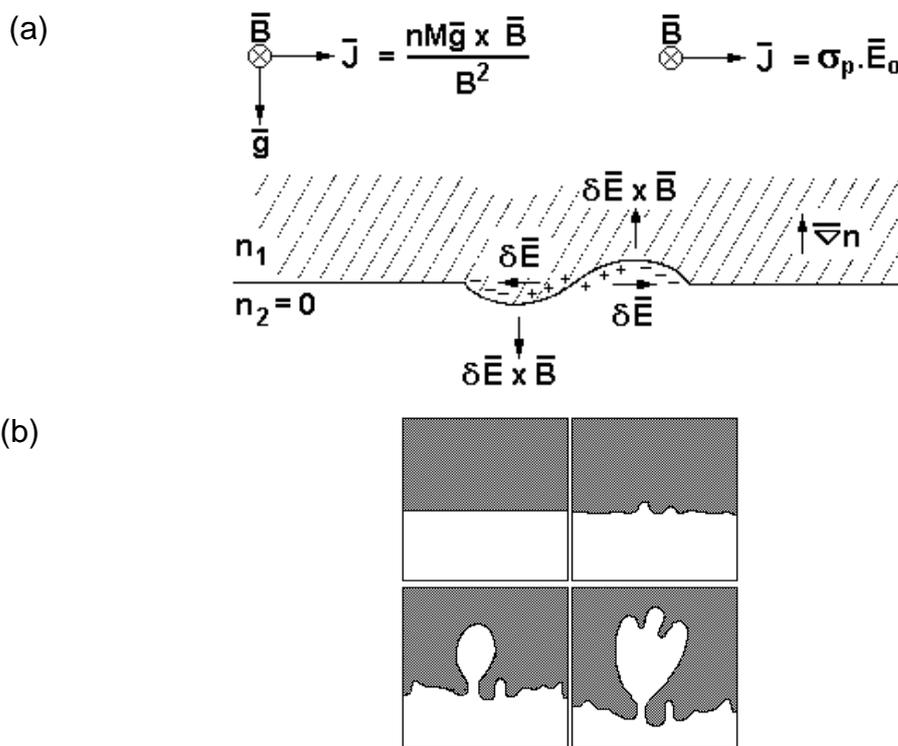


Fig. 2.12 – (a) Diagrama esquemático de uma instabilidade Rayleigh–Taylor no equador geomagnético. (b) Quadros seqüenciais do desenvolvimento de uma instabilidade. FONTE: Kelley (1989, p. 122).

### 2.3.3 Variações Diurna e Sazonal de ESF

A ocorrência de *spread F* apresenta algumas características de variação diurna e de sazonalidade, pois das discussões anteriores, sabemos que esses eventos têm relação com a presença de fenômenos bem conhecidos, como TID e ventos termosféricos, e com parâmetros físicos como gradiente de

densidade e condutividade. Uma vez que esses fenômenos e parâmetros físicos apresentam variações ao longo do dia e do ano, é de se esperar que eles influenciem também as características diurnas e sazonais da frequência de ocorrência de *spread F*.

As irregularidades tipo bolhas tendem a se desenvolver após o pôr-do-sol, geralmente entre às 18 e 19 horas, com seu máximo aproximadamente às 22 horas, em latitude próximas ao equador. Apresentam uma fase de decaimento que pode durar até o nascer do sol. À medida que aumentamos a latitude seu horário de início tende a ser mais tarde (Abdu et al., 1983).

Quanto a eventos tipo II, as estatísticas usando ionossondas e estudos de cintilação são feitas com o somatório dos efeitos dos tipos I e II, portanto não encontramos, com frequência, sua estatística na literatura especializada. Para obtermos a frequência de ocorrência desse tipo de espalhamento, seria necessário que selecionássemos nos ionogramas a ocorrências de *spread F*, nas menores altitudes registradas e em latitudes bem próximas ao equador geomagnético, pois a ocorrência de BSF está restrita a uma estreita faixa de poucos graus em torno do equador.

Eventos tipo III têm sido observados a partir das 19 horas até em torno das 6 horas do dia seguinte, apresentando um máximo em torno da meia noite (Valladares et al., 1983).

Os estudos estatísticos e experimentais utilizando radar VHF de Farley et al. (1970), associando os horários de ocorrências de *spread F* com a elevação da camada F, levou-os a sugerir que a base da camada F deve estar em uma altura limiar, como condição para o desenvolvimento de irregularidades.

Abdu (1993) menciona a comparação feita entre a ocorrência de *spread F* tipo I e as velocidades de deslocamento vertical no entardecer sobre Huancayo no Peru ( $75,3^{\circ}$  O;  $12,05^{\circ}$  S) com as de Fortaleza e comenta que muito próximo ao pôr-do-sol, nos meses onde os terminadores têm um alinhamento quase perfeito com os meridianos magnéticos, temos uma maior intensidade do campo elétrico dirigido para leste, chamado campo pré-reverso. Os meses onde esse aumento de intensidade ocorre sobre Fortaleza são em torno de dezembro e coincidem com as épocas do ano de maior frequência de aparecimento de eventos de espalhamento, como pode ser visto na Figura 2.13.

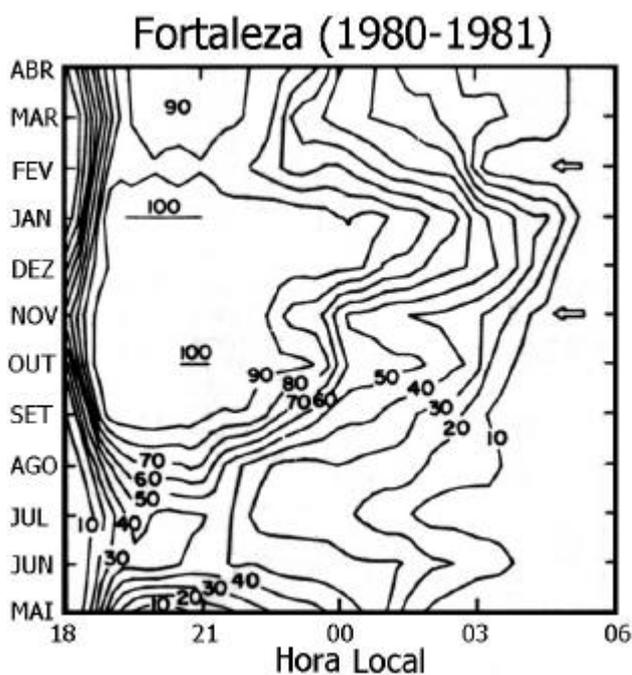


Fig. 2.13 – Mapa de ocorrência média mensal de *spread F* versus hora local sobre Fortaleza, para os anos de 1980-1981.  
 FONTE: Abdu et al. (1992, p. 14.898).

Sobre Huancayo a maior ocorrência do campo pré-reverso e de *spread F* foram nos meses equinociais. Como a declinação magnética nesses dois locais são: de  $22^{\circ}$  O para Fortaleza e  $2^{\circ}$  L para Huancayo, isso nos leva a crer que a declinação magnética controla o campo elétrico pré-reverso e, dessa forma, a ocorrência de *spread F*. Uma vez que a variação do gradiente da condutividade

Pedersen no pôr-do-sol também está relacionada com o ângulo de declinação magnética, essa variação seria, em uma primeira aproximação, uma boa explicação para a variação sazonal da ocorrência de ESF.

## **2.4 Espalhamento Coerente**

O termo coerente implica que o espalhamento ocorre devido à presença de uma densidade de irregularidades na distribuição de plasma, cujos tamanhos são múltiplos de meio comprimento de onda do sinal emitido pelo radar. Se há coerência dos sinais retroespalhados, suas fases se igualam e os ecos são somados em intensidade, tornando o eco forte o suficiente para ser detectado por sistemas de radares como os de São Luís.

A ionosfera apresenta uma variedade de irregularidades de diferentes tamanhos, e podemos imaginar que uma fração da energia incidente será espalhada de cada parte da fronteira da irregularidade com o meio. Sinais espalhados de irregularidades espaçadas de meio comprimento de onda serão adicionados em retroespalhamento, e podem então tornar-se fortes suficiente para serem detectados. Essa adição de sinal também ocorre se o radar for seletivo, isto é, de um comprimento de onda específico  $\lambda$ . Dessa forma, ele selecionará somente as irregularidades de comprimento de onda de  $\lambda/2$ , ignorando todas as outras.

Por convenção, radares detectando flutuações térmicas do meio, onde a coerência de fase é muito pequena, têm sido chamados de incoerentes, enquanto outros medindo estruturas com coerência de fase do sinal do eco, são chamados coerentes. Um radar desenvolvido para receber ecos de estruturas físicas em meio ionizado é usualmente chamado de radar de espalhamento coerente.



## CAPÍTULO 3

### O RADAR DE ESPALHAMENTO COERENTE E A UNIDADE CONTROLADORA DE FASE

Nos primeiros experimentos de sondagem ionosférica utilizando radares, os pesquisadores observaram um retroespalhamento do sinal em frequências bem acima da frequência crítica da ionosfera. Esses ecos foram então relacionados com espalhamentos em regiões subdensas indicando que não houve reflexão ionosférica.

Um radar de espalhamento detecta energia espalhada de um meio onde variações espaciais de densidade de plasma ou irregularidades estão presentes. Esse tipo de detecção é um pouco diferente daquele usado pelas ionosondas ou pelos radares para alvos maciços. O processo de espalhamento é essencialmente uma reflexão parcial causada pela descontinuidade do índice de refração devido à presença de irregularidades de densidades.

Os radares de espalhamento coerente, em geral, utilizam uma frequência fixa de transmissão em torno de 50 MHz. Para a finalidade de uso desses radares, uma única antena não terá ganho suficiente para detectar os sinais de espalhamentos que são bastante fracos. Portanto, faz-se uso de um conjunto de antenas que gera um feixe altamente direcional. Neste caso, em alguma parte do circuito devemos ter uma divisão do sinal a ser enviado, de modo a alimentar o conjunto de antenas de maneira uniforme. Devemos ter também, um circuito que receba os ecos recolhidos pelo conjunto de antenas e que agrupe-os em um único sinal para ser processado.

No sistema de recepção do eco temos os seguintes controles: o da diretividade do conjunto de antenas receptoras, que apresenta uma largura de feixe da

antena de 3° na direção norte–sul e 5° na direção leste–oeste, portanto bastante seletiva quanto ao sinal recebido; e o do comparador na entrada do sinal do eco, que verifica a existência do sinal de 50 MHz. Porém, o sistema de transmissão requer maior cuidado, pois temos sinais distintos alimentando o conjunto de antenas. Eles devem estar em fase para que a transmissão e a recepção sejam executadas com sucesso.

A complexidade do sistema de oito transmissores utilizado para o radar ionosférico de São Luís do Maranhão gerou a necessidade de um controle mais eficaz das fases dos transmissores independentes. Assim, foi concebida a idéia da utilização de um controle dinâmico das fases de cada um dos oito transmissores.

O desenvolvimento da unidade de controle de fase envolveu várias etapas na sua construção: a escolha do tipo de abordagem a ser utilizado pelo controle; o estudo e decisão de circuitos mais adequados que deveriam compor cada placa; a procura pelos componentes eletrônicos no mercado; o processo de manufatura e a implementação da unidade no sistema do radar.

Durante o processo, foi necessária a geração de esquemas dos circuitos elétricos em *softwares* específicos, seguido de subsequente desenvolvimento de leiaute da placa a ser confeccionada. Por fim, foram realizados testes em laboratório que precederam o acoplamento da unidade ao sistema do radar.

### **3.1 O Radar de São Luís do Maranhão**

O sistema do radar foi desenvolvido com seus parâmetros baseados no tipo de estudo a ser conduzido. Nesta seção faremos uma breve descrição dos principais parâmetros que caracterizam o radar de São Luís do Maranhão e/ou que são relevantes a utilização do controlador de fase.

### 3.1.1 Localização do Radar

Uma vez que as irregularidades são alinhadas ao campo, para obter ecos mais fortes o radar deve estar no plano normal à direção do campo geomagnético nas alturas da região E (Hargreaves, 1992). Assim, o radar foi instalado em São Luís, onde está localizado sob equador magnético e próximo ao centro do eletrojato equatorial.

A Figura 3.1 apresenta a localização geográfica aproximada dos radares de espalhamento de Jicamarca (Peru), Boulder (Estados Unidos), Thumba (Índia) e São Luís do Maranhão (Brasil). Sobrepostas estão as isolinhas de inclinação do campo magnético com o único objetivo de localizar o equador magnético em relação aos radares.

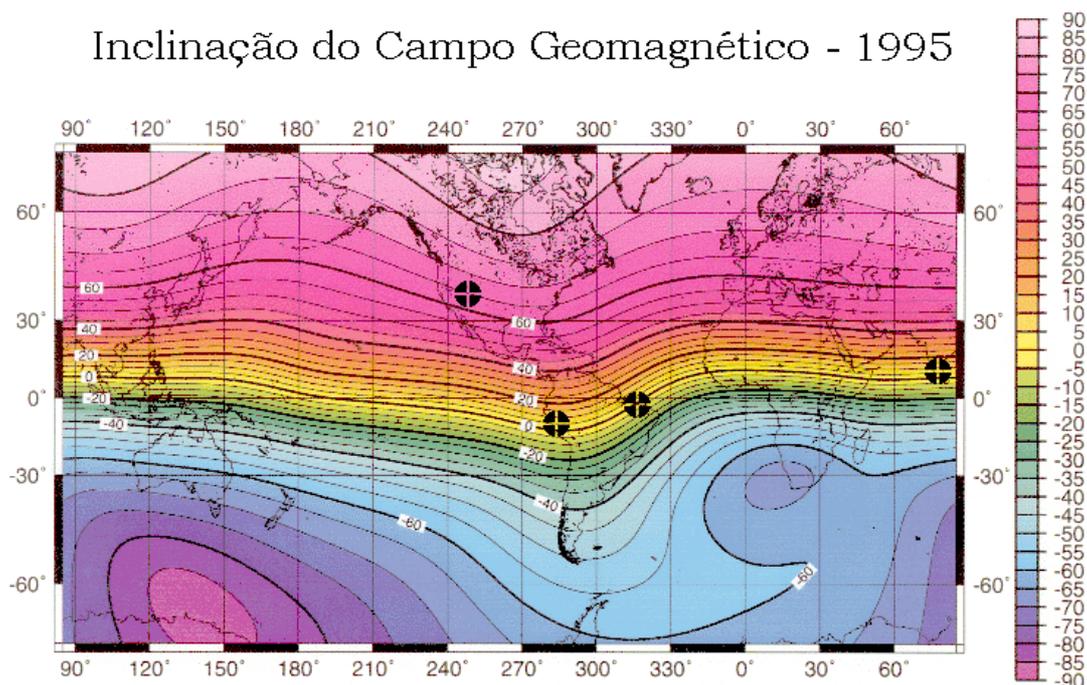


Fig. 3.1 – Localização geográfica e geomagnético dos radares: Jicamarca (Peru), Boulder (Estados Unidos), Thumba (Índia) e São Luís do Maranhão (Brasil).  
FONTE: adaptada de USGS, 1998.

### **3.1.2 Freqüência de Operação**

Estamos interessados em obter ecos coerentes das irregularidades, portanto o radar deve operar na freqüência tal que seu comprimento de onda seja o dobro do tamanho das irregularidades. Sob estas condições os sinais recebidos são coerentes e de grande amplitude.

Desde que as irregularidades de grande tamanho são muito mais freqüentes, o comprimento da onda emitida pelo radar deve ser grande e, por conseqüência, a freqüência de operação deve ser baixa. Assim, o radar deve operar na base da faixa do VHF. Porém, freqüências muito baixas são indesejadas, pois à medida em que diminui a freqüência, o tamanho da antena aumenta. Portanto, a freqüência escolhida para o radar foi de 50 MHz.

A escolha da freqüência de operação do radar de São Luís também foi baseada no conhecimento de que os radares citados anteriormente têm suas freqüências de operação próximas à 50 MHz, fato que possibilita realizar estudos comparativos entre esses radares.

### **3.1.3 Sistema de Sinal Pulsado**

Apesar de uma grande precisão na medida de deslocamento Doppler exigir sinal de onda contínua, o sistema de sinal foi escolhido pulsado, pois estes permite facilmente determinar a altura do espalhamento do sinal. Também porque o deslocamento Doppler pode ser facilmente obtido usando um radar Doppler Pulsado (Skolnik, 1962). Para isso, uma precaução deve ser tomada, o teorema de Nyquist deve ser respeitado: a Freqüência de Repetição de Pulso (*Pulse Repetition Frequency* - PRF) deve ser maior que duas vezes o máximo deslocamento Doppler esperado.

Sabemos que a razão sinal/ruído para o eco recebido é proporcional à potência média do radar para um sistema de radar pulsado. A potência média aumenta à medida em que aumentam a PRF e a largura de pulso. A PRF, entretanto, deve ser limitada para evitar ambigüidade na medida realizada (o intervalo entre dois pulsos deve ser maior que o máximo tempo que um pulso leva para, sendo transmitido e encontrando uma irregularidade, retornar ao radar). Deste modo, a potência média fica exclusivamente dependente da largura de pulso. Entretanto, a resolução de altura do sistema é inversamente proporcional à largura de pulso. Assim, o compromisso principal recai sobre a largura de pulso.

A resolução em altura é um importante parâmetro para avaliar o radar. A resolução em altura é dada pela equação 3.1.

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

Nessa equação,  $h$  é a altura zenital do solo até ponto de reflexão,  $R$  é a distância em linha reta do ponto de reflexão ao radar,  $\theta$  é o ângulo de elevação de  $R$  em relação ao plano do solo,  $dh$  é resolução de altura (m),  $\theta$  é ângulo de elevação (rad.),  $dR$  é a resolução em altura =  $c.\tau/2$  (m),  $c$  é a velocidade da luz no meio (m/s),  $\tau$  é a largura de pulso ( $\mu\text{s}$ ),  $h$  é a altura zenital (m),  $d\theta$  é o ângulo de abertura do feixe da antena (rad.).

Como no Capítulo anterior, a região E estende-se de 90 a 120 km de altura, ao passo que a região F estende-se de 120 a 400 km de altura. Como a resolução de altura depende da faixa de altura que estamos trabalhando, os requisitos de resolução de altura são distintos para as duas regiões. Portanto, o projeto do radar foi desenvolvido com a largura de pulso completamente variável na faixa que vai de 5 a 100  $\mu\text{s}$ .

### 3.1.4 Freqüência de Repetição de Pulso

Como já citamos, a PRF é limitada para evitar ambigüidade na medição da altura de reflexão, porém deve ser, pelo menos, duas vezes maior que o máximo deslocamento Doppler esperado. Entretanto, as irregularidades nas alturas da região E propagam-se com velocidades diferentes das irregularidades nas alturas da região F. Dessa forma, a faixa de valores possíveis de deslocamento Doppler é diferente para cada região.

Supondo que a máxima velocidade de propagação das irregularidades da região E seja de 400 m/s, a PRF fica limitada de 267 à 1080 Hz (Janardhanan, 1983). Da mesma forma, supondo que a máxima velocidade de propagação na região F seja de 200 m/s, a PRF fica de 134 à 162 Hz. Assim, para satisfazer ambos requisitos PRF é completamente variável de 50 à 1000 Hz.

### 3.1.5 Potência do Transmissor

Para estudarmos as irregularidades na região E necessitamos que a potência transmitida seja de alguns quilowatts. Assim, garantimos uma boa precisão no sinal de retorno recebido. Estudos na região F requerem uma potência de dezenas de quilowatts. Desde que há interesse em estudar também irregularidades na região F (*Spread F*), os transmissores devem prover uma potência de pico de aproximadamente 120 kW.

Foi escolhido, para o radar coerente do CEA/INPE, ser constituído de 8 transmissores de 15 kW de potência, ao invés de um único transmissor de 120 kW por várias razões. Dentre elas estão:

- 1) num sistema de múltiplos transmissores: a falha de um ou dois transmissores não causa a falha total do sistema, o radar ainda pode ser usado com potência reduzida;

- 2) os circuitos necessários para gerar um pico de potência de 10 à 50 kW são mais fáceis de ser projetados e de receber manutenção;
- 3) quando o radar usa um conjunto de antenas com controle de fase para gerar um feixe variável de alta potência, o sistema de alimentação das antenas requerido para um sistema de múltiplos transmissores é mais simples.

A Figura 3.2 (b) apresenta de forma simplificada, o sistema de transmissão para múltiplos transmissores usado no radar de São Luís, onde temos o divisor de potência e os deslocadores de fase de baixa potência. Em comparação, a Figura 3.2 (a) mostra um sistema com um único transmissor, onde são necessários divisores de potência e deslocadores de fase de alta potência.

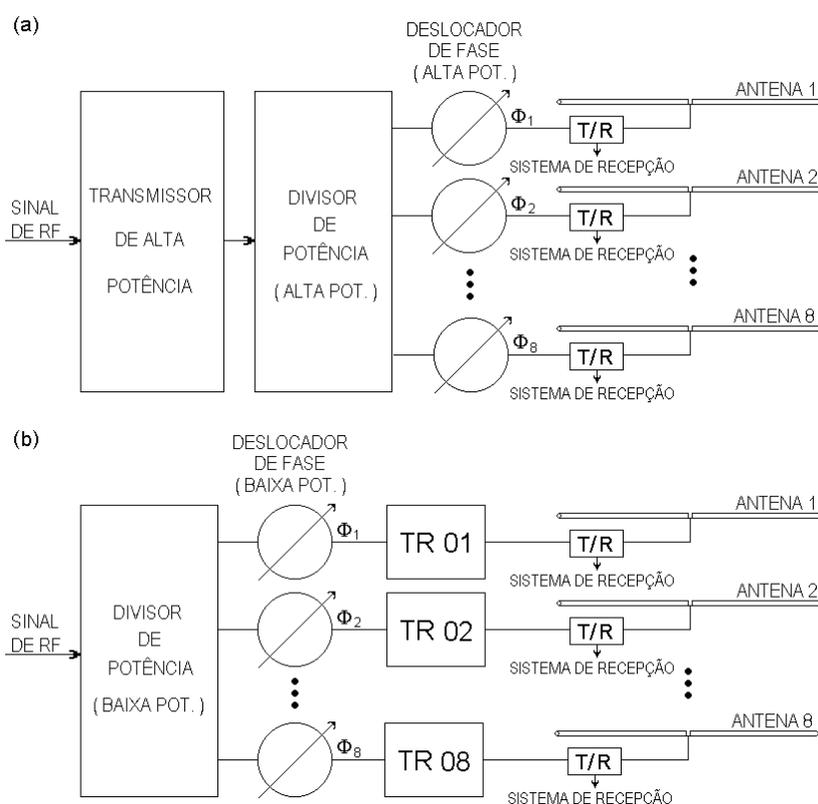


Fig. 3.2 – Diagrama de blocos mostrando esquema de transmissão para radar (a) usando um único transmissor com divisores de potência e deslocadores de fase de alta potência e (b) usando 8 transmissores com divisores de potência e deslocadores de fase de baixa potência.

A principal desvantagem de um radar com sistema de múltiplos transmissores, é que em um sistema de múltiplos transmissores é necessário termos um controle individual da fase de cada transmissor. Para que tenhamos um feixe alinhado verticalmente é necessário que todas as fases estejam iguais e para um feixe inclinado em relação à vertical, é necessário uma mesma diferença entre todas as fases dos sinais. Este requisito faz com que o sistema com múltiplos transmissores seja mais complexo.

### 3.1.6 O Sistema de Antenas

O sistema de antenas é formado por 768 dipolos feitos de cabo coaxial. Eles estão arranjados de modo a formar um conjunto de 16 antenas ligadas duas a duas, alinhadas na direção norte-sul. Cada antena é formada por 48 dipolos ligados em série. Com essa configuração vamos obter uma largura de feixe da antena de  $3^\circ$  na direção norte-sul e  $5^\circ$  na direção leste-oeste.

A Figura 3.3 mostra uma fotografia do conjunto de antenas que está sendo utilizado na operação do radar ionosférico de São Luís do Maranhão.



Fig. 3.3 – Fotografia do conjunto de antenas que está sendo utilizado na operação do radar ionosférico de São Luís do Maranhão.

### 3.1.7 O Receptor

O receptor utiliza um sistema de chaves T/R, tornando possível receber os ecos espalhados das irregularidades no mesmo conjunto de antenas em que os pulsos foram transmitidos. Após uma amplificação para melhorar a qualidade, o eco passa por um sistema que separa a informação obtida. Esse sistema provê duas saídas: uma em fase com a entrada e outra em quadratura com a entrada. Da combinação dessas duas saídas é retirada a informação sobre magnitude e sinal do deslocamento Doppler.

A Figura 3.4 apresenta o diagrama de 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.

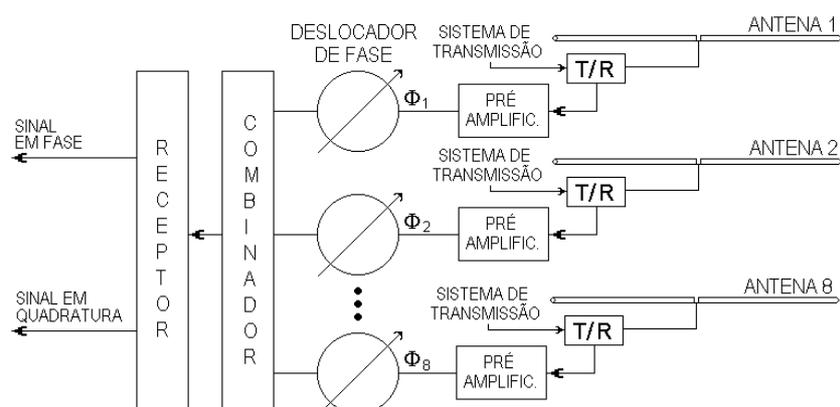


Fig. 3.4 – Diagrama de blocos mostrando esquema de recepção para o radar ionosférico, utilizando o sistema de chaves T/R para comutação entre os sistemas de transmissão e recepção.

### 3.2 Necessidade do Controlador de Fase

O radar de São Luís emite um sinal pulsado que é espalhado nas irregularidades da ionosfera. O processo envolve a geração de dois sinais pulsados, de 80 e 30 MHz, que misturados vão gerar o sinal de 50 MHz. Este último sofre uma amplificação e em seguida passa por um circuito divisor de

potência. O circuito divisor de potência é responsável pela divisão do sinal de 50 MHz para os 8 transmissores. Cada transmissor amplifica sua parcela do sinal e alimenta um conjunto de duas antenas.

Além disso, o radar opera em dois modos: com as parcelas de cada transmissor em fase, produzindo um feixe vertical; ou com cada parcela contendo um deslocamento progressivo de  $90^\circ$  na sua fase, de modo a produzir um feixe inclinado,  $30^\circ$  em relação à vertical. Os modos de operação trazem informações pontuais das derivas das irregularidades ionosféricas na direção do feixe, e podem ser identificados observando a Figura 3.5. Nela, temos o diagrama cartesiano de irradiação do conjunto de antenas (a) para o feixe vertical e (b) para o feixe oblíquo.

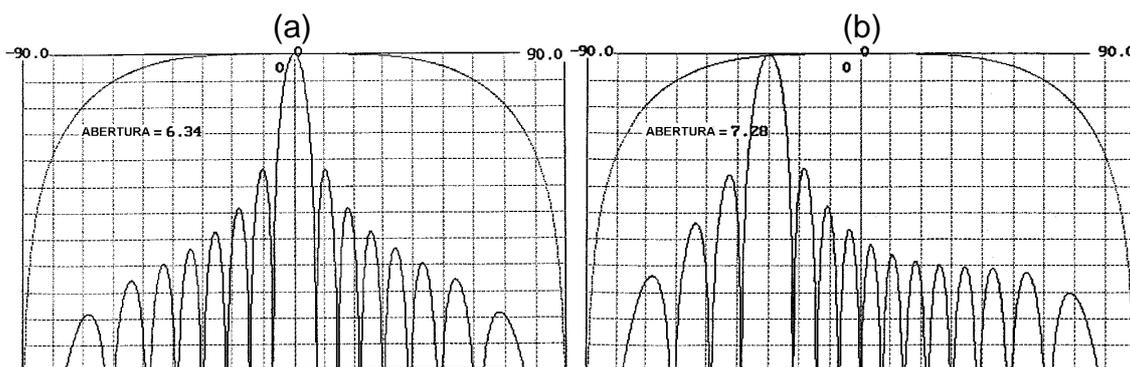


Fig. 3.5 – Diagramas cartesianos de irradiação no plano leste-oeste do conjunto de antenas, (a) para o feixe vertical e (b) para o feixe oblíquo (com deslocamento progressivo de fase de 90 graus). O eixo vertical determina a intensidade de campo em dB.

Também devemos observar que cada um dos oito transmissores apresentam características RLC como uma função dos componentes de seus circuitos. E, como sabemos, a fase do sinal que passa por circuitos com características RLC sofrem o efeito dessa característica (Terman, 1955; Haykin, 1989).

Assim, durante a confecção e instalação dos 8 transmissores, foi tomado o cuidado para que os efeitos individuais de cada transmissor sobre a fase da

parcela não prejudicassem a operação do sistema. Entretanto, um transmissor de 15 kW sofre um aquecimento considerável quando em operação. A variação da temperatura altera de modo aleatório as características RLC dos circuitos do transmissor e, conseqüentemente, provoca uma variação aleatória na fase da parcela que passa por esse transmissor.

Outra fonte de variação aleatória, identificada utilizando a unidade controladora de fase, é o pouco isolamento para sinal de rádio freqüência (RF) que existe entre os transmissores e as fontes de alimentação dos circuitos de potência. Como essas fontes de alimentação são comuns a todos os transmissores, elas proporcionam um caminho para ocorrer um vazamento de sinal de RF entre os transmissores, interferindo nos seus sinais individuais.

A Figura 3.6 apresenta o sinal de um dos transmissores do radar, na qual é possível identificar um vazamento de sinal de RF via fontes de alimentação. Nesta Figura podemos verificar que o sinal a ser transmitido não está perfeitamente senoidal modulado por uma onda quadrada como era esperado. Ele apresenta um declive e uma perturbação no início do pulso, devido às parcelas de sinais dos outros transmissores estarem interferindo neste.

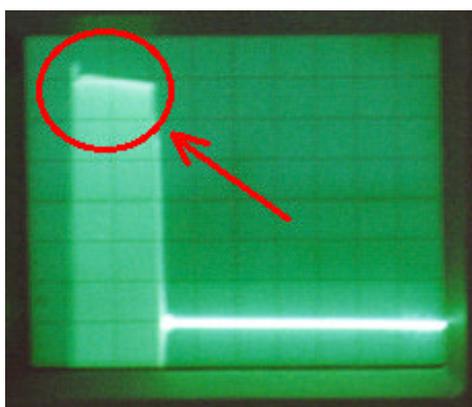


Fig. 3.6 – Sinal de um dos transmissores do radar, onde é possível identificar um vazamento de sinal de RF via fontes de alimentação, visto através de um declive e uma perturbação no início do pulso.

Devido a estas variações aleatórias das fases das parcelas do sinal em cada transmissor, quando estas chegam ao conjunto de antenas, elas não estão em fase ou o deslocamento progressivo não ocorre como esperado. Isso faz com que a característica de irradiação do conjunto de antenas não seja aquela projetada previamente (Figura 3.5). Portanto, a potência se perde em várias direções impossibilitando os estudos, ou tornando a medida inválida. Por isso, é necessária a utilização de um dispositivo controlador de fase para monitorar e corrigir essas diferenças de fases entre os transmissores.

### **3.3 Unidade Controladora de Fase**

A unidade controladora de fase no radar ionosférico é o sistema responsável pelo monitoramento da alimentação correta do conjunto de antenas. Ela monitora a entrada dos sinais à cada antena do conjunto. Em caso de incorreção, ela tem a capacidade de interferir na fase dos sinais de alimentação alterando-a de modo a solucionar o problema.

O princípio da unidade é o do controlador de fase realimentado por tensão (PLL, do inglês *Phase Locked Loop*). Esse princípio é comumente usado para controle automático de fase de sistemas de múltiplos transmissores, onde é requerido um PLL para cada transmissor do sistema.

#### **3.3.1 Desenvolvimento e Construção**

Foi necessário o conhecimento da forma como o sistema do radar processa os sinais enviados e recebidos, pois era necessário escolhermos a forma de abordagem do controle. Uma vez conhecidos os caminhos dos sinais, optou-se por uma única unidade controladora de fase composta de oito placas PLL idênticas, alimentadas por um sinal de referência comum. Assim, evitamos os possíveis erros de referência e a correção de fase que cada placa proporciona é baseada somente no erro gerado pelo circuito de cada transmissor

isoladamente. A Figura 3.7 apresenta o diagrama de blocos esquemático de um dos canais da unidade controladora de fase.

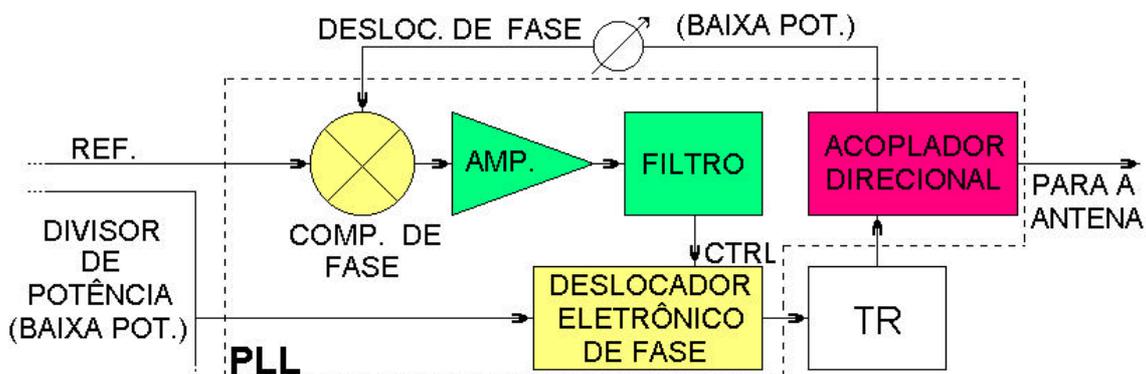


Fig. 3.7 – Diagrama de blocos esquemático do princípio de funcionamento de um dos canais da unidade controladora de fase do sistema de múltiplos transmissores.

Para cada canal, uma pequena amostra da saída do transmissor, tomada através de um acoplador direcional, é comparada ao sinal de referência. Para isso é usado um comparador de fase. A saída do comparador de fase é um sinal de tensão proporcional à diferença entre as duas fases: a do sinal de referência e a da amostra da saída. Esse sinal é amplificado, filtrado e usado para controlar um deslocador de fase, o qual altera a fase do sinal que alimenta o transmissor, de modo a reduzir a diferença. Quando o PLL entra em regime, as fases de referência e amostra estão idênticas ou muito próximas. Assim, qualquer alteração na fase do sinal de saída é imediatamente detectada e compensada pelo PLL.

O deslocador de fase visto na Figura 3.7 no laço de realimentação entre o acoplador direcional e o comparador de fase, é utilizado para alterar a operação do radar entre o sistema com feixe vertical e com feixe oblíquo. Durante a operação com feixe vertical os deslocadores de todos os canais estão ajustados para não incluir defasagem. Durante a operação com feixe oblíquo os deslocadores de todos os canais estão ajustados para incluir um deslocamento progressivo de fase de  $-90^\circ$ . Esses deslocadores de fase são

controlados pelo conjunto de chaves T/R, que selecionam em qual dos modos eles devem operar.

Em relação ao PLL, quando o radar estiver operando com feixe oblíquo, inicialmente ele identificará um erro de  $90^\circ$  entre as fases a serem comparadas. Assim, ele imediatamente corrigirá a fase do sinal de saída em  $+90^\circ$ , compensando a diferença inicial. Como o deslocamento das fase é progressivo de  $-90^\circ$ , o que temos na saída dos canais sucessivos da unidade controladora de fases é um deslocamento progressivo de  $+90^\circ$ .

A utilização da unidade controladora trouxe a necessidade de incluirmos algumas modificações nos circuitos. Foi introduzida uma divisão em dois no sinal de referência, antes de sua divisão em oito para ser amplificado pelos transmissores, pois necessitamos de um sinal de referência para alimentar a unidade. Também foi introduzido um componente auxiliar, chamado acoplador direcional, para derivação de sinal da saída de potência de cada transmissor. Na Figura 3.8 vemos uma fotografia de um dos oito acopladores direcionais utilizados.

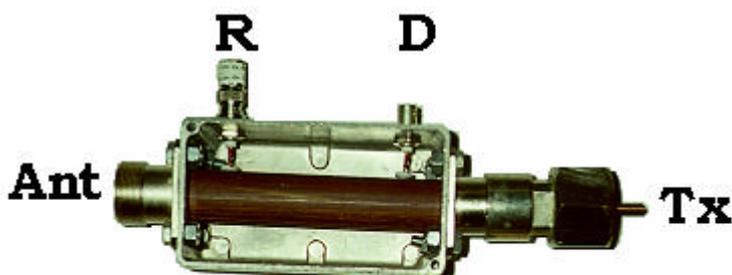


Fig. 3.8 – Fotografia de um dos oito acopladores direcionais utilizados no radar ionosférico de São Luís.

O acoplador direcional, como pode ser visto, é constituído basicamente de um tubo condutor de cobre, de comprimento múltiplo do comprimento de onda do sinal utilizado e capaz de suportar a potência transmitida. Nesse tubo, a uma distância calculada de aproximadamente 2,4 cm, é derivado uma parcela do

sinal através de um conector, no ponto "D", para obter uma amostra do sinal com o valor de potência desejado.

### 3.3.2 Circuitos Componentes do PLL

Cada canal da unidade componente possui os seguintes circuitos: comparador de fase com filtro passa baixa; monitor de potência; *sample and hold*; limitador de voltagem; indicador de fase em *lock*; amplificador com filtro passa baixa; controle de nível de tensão e deslocador de fase com amplificador de potência. Cada um desses circuitos é descrito nas seções que seguem. Um diagrama de blocos mostrando a forma como esses circuitos estão conectados é apresentado na Figura 3.9.

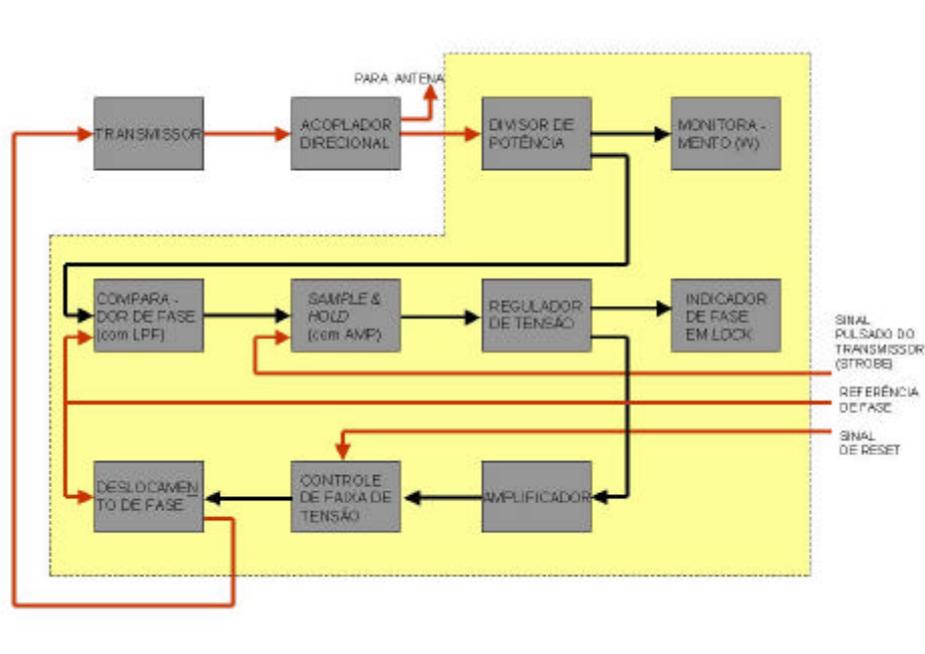


Fig. 3.9 – Diagrama de blocos esquemático de um dos canais da unidade controladora de fase do sistema de múltiplos transmissores.

Nessa Figura podemos identificar também os sinais externos que são utilizados no controle da placa: o sinal de "strobe" e o sinal de "reset". O sinal de "strobe" é utilizado para que o circuito do *sample and hold* atue somente no período em que o sinal do radar está ativo (durante o pulso). O sinal de "reset" é utilizado

no circuito de controle de nível de tensão, e quando acionado ajusta os valores de tensão na entrada do deslocador eletrônico de fase para que este não desloque a fase de referência.

### 3.3.2.1 Circuito Comparador de Fase com Filtro Passa Baixa

O circuito comparador de fase é responsável pela determinação de diferença entre a fase do sinal que está sendo amostrado da saída do transmissor e a fase do sinal de referência. O principal componente deste circuito é o comparador de fase de fabricação da *Mini-Circuits*. Esse componente possui a característica de fornecer o sinal de saída mixado, proporcional à diferença entre as fases dos sinais que alimentam seus terminais de entrada. Seus circuitos internos são desenvolvidos para operar na faixa de frequência entre 5 e 500 MHz e ele possui uma isolamento mínima de 25 dB, portanto útil aos nossos propósitos. A Figura 3.10 apresenta o diagrama esquemático do circuito do comparador de fase com filtro passa baixa.

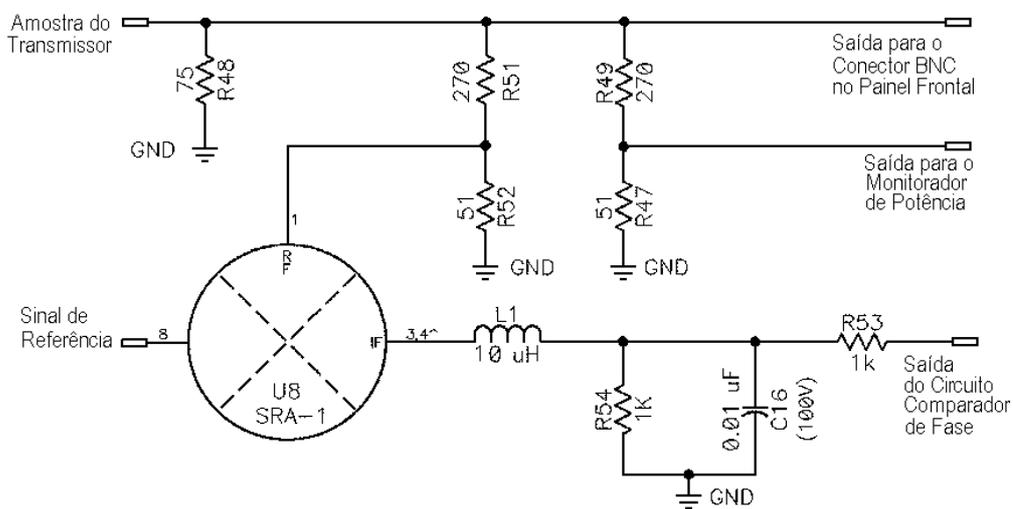


Fig. 3.10 – Diagrama esquemático do circuito do comparador de fase com o filtro passa baixa, incluindo os circuitos divisores de tensão.

Este circuito fornece uma saída para o sinal de amostra do transmissor, através de conector tipo BNC disponível na parte frontal da unidade, para o monitoramento com osciloscópio. Este monitoramento tornou-se importante principalmente na fase inicial de instalação da unidade ao sistema. É igualmente necessário quando pretendemos verificar os níveis de tensões que estão sendo amostrados dos transmissores nos inícios de campanhas.

Antes da fase do sinal ser comparada com a fase da referência, temos um circuito formado pelos resistores R47, R49, R51 e R52. Eles compõem um divisor de tensão, de modo que o sinal que vem do transmissor é dividido em dois sinais de mesma amplitude e, que em seguida, são reduzidos para aproximadamente 15% de seu valor. A divisão e posterior redução são necessárias para adequar as amplitudes dos sinais aos níveis compatíveis com o exigido para o comparador de fase e para o circuito monitor de potência.

O circuito do filtro passa baixa é facilmente encontrado na literatura. Seu propósito no nosso circuito é para eliminar qualquer sinal de frequência acima de 16 kHz que porventura possa ser incorporado ao sinal resultante da diferença entre as fases dos sinais: de referência e da saída do transmissor. Ele apresenta uma atenuação de 40 dB/década acima de sua frequência de corte, pois possui dois elementos armazenadores de energia (Terman, 1955). O sinal resultante dessa filtragem é passado ao circuito *sample and hold*.

### **3.3.2.2 Circuito Monitor de Potência**

A unidade controladora de fase foi desenvolvida partindo do pressuposto que sempre estará disponível um sinal de amplitude mínima para ser comparado com o sinal de referência. Portanto, sempre que estiver sendo mandado um sinal para o conjunto de antenas, uma amostra desse estará alimentando a unidade. Entretanto, os sistemas receptor e transmissor estão alojados em salas diferentes, e é necessário ao operador que permanece junto ao sistema

receptor, monitorar o nível de potência dos transmissores. Portanto, esse circuito torna-se essencial para que tenhamos a certeza que um sinal de potência suficiente esteja sendo entregue ao conjunto de antenas, e que sua amostra esteja alimentando a unidade controladora de fase. Assim, o circuito monitor de potência tem a finalidade de apresentar visualmente o nível de potência que está sendo entregue à unidade

Esse circuito é composto de: um filtro passa baixa com frequência de corte de 7,88 Hz, logo após um diodo retificador; um amplificador operacional LM324, que oferece um ganho direto de 15 V/mV; um divisor de tensão na entrada inversora do amplificador operacional e um circuito indicador visual utilizando LED. A Figura 3.11 apresenta o diagrama esquemático onde vemos estes componentes formando o circuito monitor de potência.

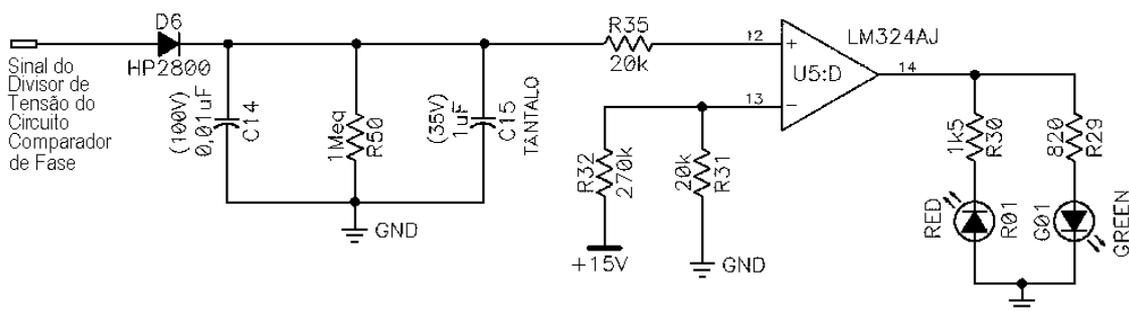


Fig. 3.11 – Diagrama esquemático do circuito monitor de potência.

No circuito monitor de potência, sinais alternados (senoidais) são indesejados. São necessários somente sinais constantes para serem comparados ao nível proporcionado pelo divisor de tensão da entrada inversora do amplificador operacional. Assim, a frequência de corte do filtro deve ser a menor possível, para filtrar qualquer oscilação. Porém, a frequência de corte é limitada pela máxima corrente de condução do diodo, que aumenta com a redução da frequência. Portanto, a frequência escolhida foi de 7,88 Hz. Semelhante ao filtro da saída do comparador de fase, esse filtro tem dois elementos

armazenadores de energia, fornecendo uma atenuação de 40 dB/década após a frequência de corte.

O diodo D6 proporciona a retificação do sinal que vem do divisor de tensão do circuito do comparador de fase, mantendo o sinal polarizado somente positivamente. Além da retificação, a colocação do diodo na entrada desse circuito é importante para isolar qualquer sinal de retorno ao circuito comparador de fase, evitando introduzir erro na determinação da diferença de fase.

O amplificador operacional LM324 está sendo utilizado como um amplificador diferencial. O sinal que alimenta a sua porta não-inversora está sendo comparado com o nível de tensão que alimenta sua porta inversora. Quando a diferença entre os sinais comparados pela unidade for a favor do sinal que alimenta a porta não-inversora, será colocado um sinal positivo e amplificado na saída e, portanto, o LED verde acenderá. O contrário ocorre quando a diferença for a favor do sinal na entrada da porta inversora, ascendendo o LED vermelho, e indicando que a potência amostrada do transmissor não está sendo suficiente.

Os resistores R32 e R31 compõem o divisor de tensão, os quais mantêm o nível de tensão de 1 volt na entrada inversora do amplificador operacional. Com isso, o sinal proveniente do circuito do estágio anterior deve ser superior a 1 volt para o circuito indicar potência suficiente.

### **3.3.2.3 Circuito *Sample and Hold***

O circuito *sample and hold* recebe o sinal do circuito comparador de fase e tem a finalidade de amostrar e reter o sinal resultante da última comparação entre as fases do sinal amostrado da saída do transmissor e do sinal de referência. Ele é construído em função do componente AD585 de fabricação da *Analog*

*Devices.* Este circuito integrado (CI) é um *sample and hold* amplificador com tempo de aquisição de máximo de 3 micro segundos. Mas ele é utilizado com ganho unitário na configuração que foi utilizado. A Figura 3.12 apresenta o diagrama esquemático deste circuito mostrando a configuração interna do CI e os circuitos auxiliares necessários para seu controle.

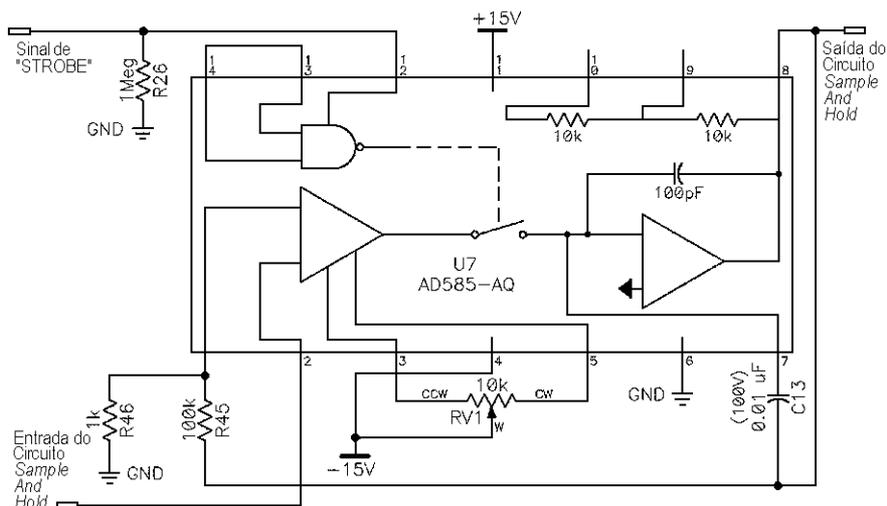


Fig. 3.12 – Diagrama esquemático do circuito do *sample and hold*, mostrando sua configuração interna e seus circuitos de controle.

A importância deste circuito é devido ao radar operar com sinal pulsado. O radar opera com um sinal senoidal modulado por um sinal de onda quadrada conforme mostra a Figura 3.13. Este sinal pulsado já foi discutido em seção anterior, onde foram apresentadas suas vantagens. Porém, essa modulação pulsada na onda senoidal obriga algumas complicações no circuito eletrônico.

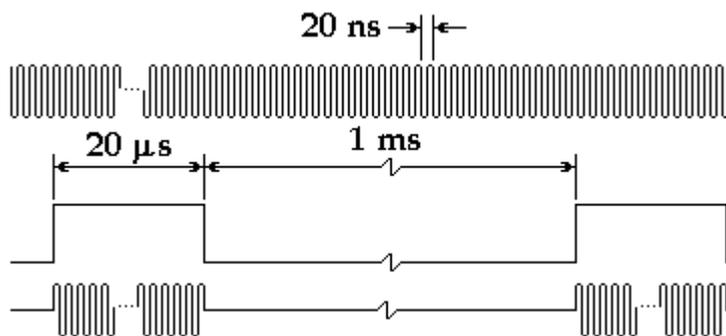


Fig. 3.13 – Esquema mostrando a composição do sinal pulsado emitido pelo radar.

A grande maioria dos circuitos eletrônicos projetados para operar com rádio frequências, utilizam componentes com características RLC e componentes não lineares. Isso impõe um certo comportamento transitório antes que seja atingida a estabilidade ou o chamado período permanente. No caso da nossa unidade, a comparação entre as fases e posterior correção demora em torno de alguns mili segundos e a duração do pulso é da ordem de micro segundos.

Com a modulação pulsada, o sinal senoidal ora está presente para sua fase ser comparada com a da referência, ora é nulo. Quando o sinal é nulo (entre os pulsos) o erro é máximo, portanto a cada pulso o processo de comparação recomençaria. Com a utilização do circuito *sample and hold*, o sinal equivalente à última diferença entre as fases é armazenado para ser aplicado no deslocador de fase no início do próximo pulso. Assim o *sample and hold* torna-se essencial, pois ele armazena as correções de pulsos sucessivos, diminuindo a diferença à medida que mais pulsos são comparados até que o erro seja mínimo.

O controle do tempo em que esse CI deve ficar amostrando o resultado até reter o sinal resultante da última comparação é feito pelo sinal chamado “strobe”, conforme mencionado anteriormente (Figura 3.9). Este sinal é o mesmo que modula o sinal senoidal mostrado na Figura 3.13. Ele é nulo quando o pulso não está sendo transmitido, dando ordem de retenção do último sinal registrado em seus circuitos, e apresenta um nível de tensão contínua de 5 volts quando o pulso está sendo transmitido, liberando o *sample and hold* para aplicar o sinal armazenado, proporcional à última correção necessária, no circuito do deslocador eletrônico de fase.

O resistor variável colocado entre os pinos 3 e 5 do CI tem a finalidade de ajustar o nível de tensão contínua na saída do *sample and hold* para valores mais positivos ou mais negativos. Esse valor deve ser ajustado de acordo com

as tensões máximas e mínimas da curva do deslocador eletrônico de fase, fornecida pelo fabricante. Ele deve ser 0,7 volts quando não há diferença entre as fases: amostrada do transmissor e de referência. Os outros componentes são recomendações do fabricante para as condições de operação desejadas.

Após o circuito *sample and hold* o sinal flui para três outros circuitos: para o indicador de fase em *lock*, para o limitador de voltagem e para o amplificador com filtro passa baixa (Figura 3.9).

### 3.3.2.4 Circuito Limitador de Voltagem

A função do circuito limitador de voltagem do sinal do *sample and hold*, é evitar que qualquer transiente altere o nível de tensão acima do ponto determinado pelas características de tensão de condução direta dos diodos retificadores de germânio componentes do circuitos. A Figura 3.14 apresenta o diagrama esquemático do circuito limitador de voltagem, onde podemos verificar também a presença do resistor R44, colocado neste ponto somente para limitar o valor da corrente.

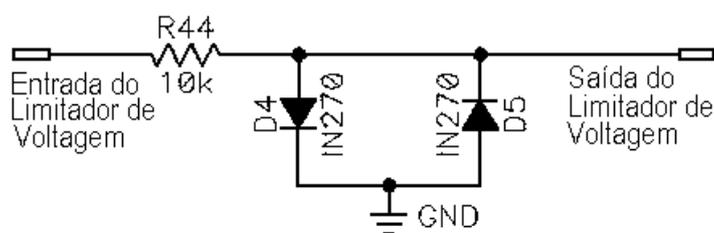


Fig. 3.14 – Diagrama esquemático do circuito limitador de voltagem.

Quando o sinal é positivo na saída do *sample and hold* e ultrapassa o valor de condução direta do diodo D4 (0,26 volts), esse conduz e ceifa a onda, conforme mostra a Figura 3.15. Quando o sinal é negativo, o mesmo ocorre com o diodo D5 e a onda é ceifada no seu lado negativo. Dessa forma, ficam estabelecidos valores máximos e mínimos controlados pelos diodos D4 e D5.

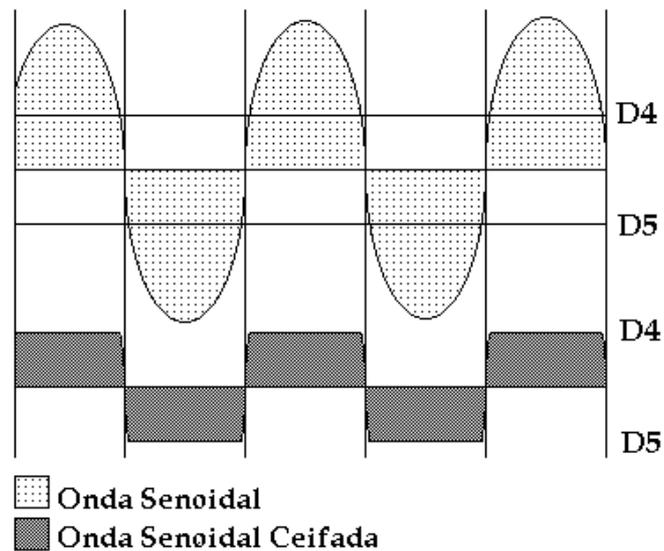


Fig. 3.15 – Diagrama temporal mostrando o sinal ceifado pelos diodos D4 e D5, que limitam o nível de tensão máximo na saída do *sample and hold*.

### 3.3.2.5 Circuito Indicador de Fase em *Lock*

O circuito indicador de fase em *lock* tem seu funcionamento semelhante ao circuito monitor de potência e também é composto basicamente de amplificadores operacionais LM324, os quais funcionam como amplificadores diferenciais. O diagrama esquemático do circuito do indicador de fase em *lock* é apresentado na Figura 3.16.

O sinal derivado do circuito limitador de voltagem é comparado com os dois níveis de tensão proporcionados pelos divisores de tensão formados pelos resistores R42 e R43, os quais mantêm o nível de tensão positivo de 0,1 volt na entrada inversora do primeiro amplificador operacional e pelos resistores R33 e R34, que mantêm o nível de tensão negativo de 0,1 volt na entrada inversora do segundo amplificador operacional. Porém, o sinal resultante da diferença entre os sinais de entrada, proporcionado pela primeira unidade amplificadora, altera o nível de tensão da entrada inversora da segunda unidade, através do diodo D3.

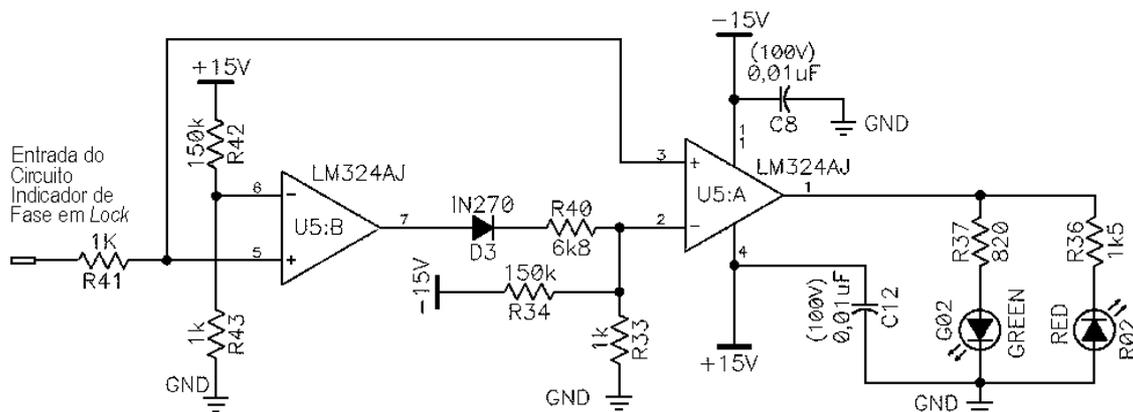


Fig. 3.16 – Diagrama esquemático do circuito indicador de fase em *lock*.

Nesta configuração, o sinal de saída do limitador de voltagem é inicialmente comparado com o nível de 0,1 volt da porta inversora do primeiro amplificador diferencial. Sendo um sinal positivo maior que esse nível, proporcionará um sinal positivo e amplificado na saída desse estágio. Com isto, o diodo D3 conduz e o nível de referência da entrada inversora do segundo amplificador diferencial fica alterado de -0,1 volt para um valor positivo próximo do valor de saída do primeiro estágio. Portanto, o sinal de saída do segundo estágio será negativo e o LED vermelho será aceso.

Quando o sinal de saída do limitador de voltagem for positivo e menor que 0,1 volt, o sinal resultante do primeiro estágio será negativo e amplificado. Desta forma, o diodo D3 não conduz e a comparação do segundo estágio será com o nível pré-estabelecido de -0,1 volt. Desta última, sempre resultará um sinal positivo e amplificado que acenderá o LED verde.

Sendo negativo o sinal de saída do limitador de voltagem, o resultado da comparação do primeiro estágio será um sinal negativo e amplificado. Portanto, o diodo D3 não conduzirá e a comparação do segundo estágio será novamente com o nível de -0,1 volt. Se o sinal de saída do regulador de voltagem tiver amplitude maior que 0,1 volt, a saída do segundo estágio será negativa e

novamente o LED vermelho acenderá. Caso a amplitude seja menor que 0,1 volt, a saída do segundo estágio será positiva e o LED verde acenderá.

Em resumo, o circuito indicador de fase em *lock* somente considera que o erro entre as fases do sinal de referência e do sinal amostrado da saída do transmissor é mínimo, quando o sinal proporcional gerado pelo comparador de fase estiver na faixa entre  $-0,1$  e  $+0,1$  volt.

### 3.3.2.6 Circuito Amplificador com Filtro Passa Baixa

O circuito amplificador com filtro passa baixa tem a finalidade de elevar o nível de tensão e eliminar possíveis sinais de freqüências mais elevadas, provenientes dos circuitos anteriores. Ele é formado basicamente por um amplificador operacional LM324, configurado como circuito amplificador inversor e de um conjunto de capacitores em paralelo para filtrar altas freqüências. A Figura 3.17 apresenta o diagrama esquemático do circuito amplificador com filtro passa baixa.

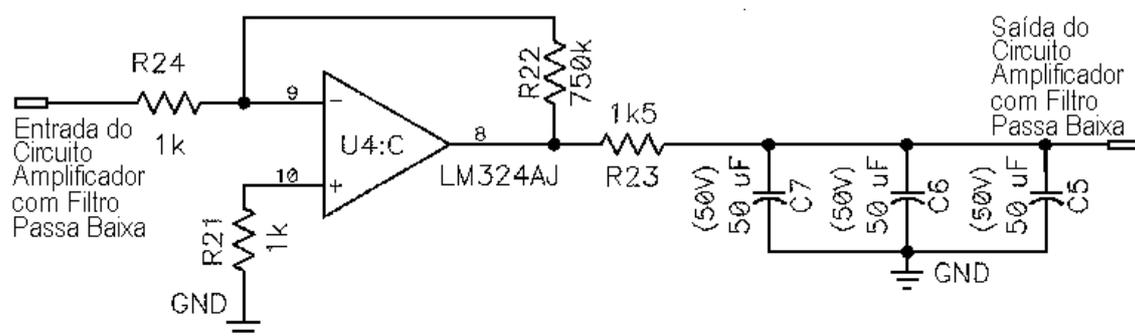


Fig. 3.17 – Diagrama esquemático do circuito amplificador com filtro passa baixa.

Essa configuração de amplificador inversor apresenta um ganho de tensão proporcional à razão entre os resistores do laço de realimentação (R22) e de entrada (R24). Com os valores utilizados a amplificação do sinal é de 750 vezes.

O filtro passa baixa tem a frequência de corte de 0,7 Hz e oferece uma atenuação de 60 dB/década, pois apresenta três capacitores. Assim, os sinais com frequência acima de 0,7 Hz sofrem uma atenuação bastante acentuada.

Após amplificação e filtragem, o sinal resultante é passado para o circuito que contém o deslocador eletrônico de fase e o módulo amplificador de potência. Existe também, na saída do circuito amplificador com filtro passa baixa, um controlador de nível de tensão que monitora o nível de tensão do sinal passado ao circuito deslocador de fase.

### **3.3.2.7 Circuito de Controle de Nível de Tensão**

O circuito de controle de nível de tensão é importante, pois é ele que mantém a amplitude do sinal que alimenta o deslocador eletrônico de fase, dentro dos limites de tensões impostos pelo fabricante (definidos na seção a seguir). Ele atua quando o nível de tensão está abaixo do valor mínimo ou acima do valor máximo e é composto por um circuito integrado 74221, contendo dois mono estáveis e por quatro amplificadores operacionais LM324. A Figura 3.18 apresenta o diagrama esquemático do circuito de controle de nível de tensão.

Os resistores R10 e R11 compõem o divisor de tensão que proporciona um nível de referência de tensão de 1 volt na entrada inversora do amplificador operacional ligado ao diodo D2. Os resistores R17 e R18 compõem o divisor de tensão que proporciona um nível de referência de tensão de 26 volts na entrada inversora do amplificador operacional ligado ao primeiro mono estável do CI 74221. Já os R19 e R20 compõem o divisor de tensão que proporciona um nível de referência de tensão de 0,7 volt na entrada não-inversora do amplificador operacional conectado ao segundo mono estável do CI 74221.

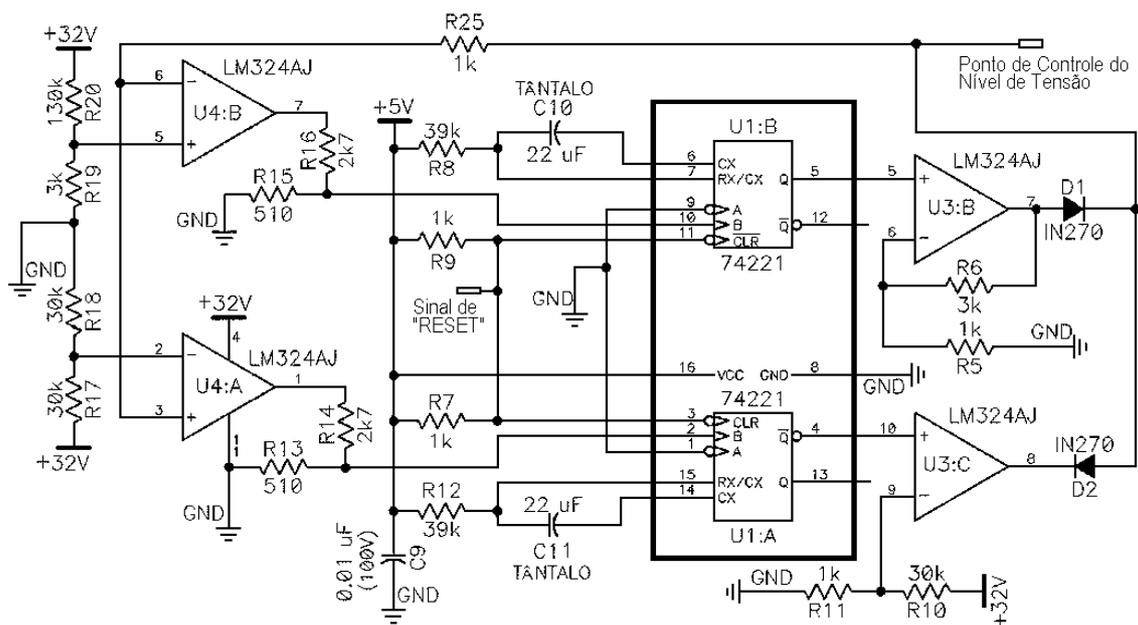


Fig. 3.18 – Diagrama esquemático do circuito de controle do nível de tensão.

O sinal “reset” (Figura 3.9) é acionado por botão externo no painel frontal. Ele ajusta os valores de tensão de controle do deslocador eletrônico de fase para que este não atue. Se acionado, ele colocando zero volt no pino de saída 5 e sinal alto no pino de saída 4 do CI 74221. Com isso, o amplificador ligado ao pino 4 terá um valor positivo na sua saída, e o diodo D2 não conduzirá. Já o amplificador ligado ao pino 5 terá um valor muito próximo de zero volts na sua saída e o diodo D1 conduzirá. Deste modo, o deslocador de fase terá o nível de tensão zero no seu pino de controle, inicializando o circuito.

Os amplificadores operacionais ligados aos mono estáveis do CI 74221 são utilizados como circuitos amplificadores diferenciais. Quando o sinal de alimentação do deslocador de fase ultrapassa 26 volts, o amplificador operacional conectado ao pino 2 do primeiro mono estável alimenta esse pino com um valor positivo e o sinal de saída do pino 4 é reduzido a zero volt. Isto torna negativo o sinal da saída do amplificador operacional ligado a esse pino. Desta forma, o diodo D2 conduz e drena uma parcela da tensão que alimenta o deslocador de fase, abaixando-a ao nível desejado. Quando o sinal de

alimentação do deslocador de fase abaixa de 0,7 volts o amplificador operacional ligado o pino 10 do segundo mono estável alimenta esse pino com um valor positivo. Assim, um pulso positivo é passado para saída do pino 5 que alimenta ao amplificador, tornando positivo o sinal na sua saída. Assim, o diodo D1 conduz e aumenta o nível de tensão na entrada do deslocador de fase mantendo-a nos nível desejado.

### 3.3.2.8 Circuito Deslocador de Fase com Amplificador de Potência

O circuito deslocador de fase tem a finalidade de promover a correção na fase e de amplificar o sinal que alimenta o transmissor. Ele é composto de um deslocador eletrônico de fase fabricado pela *Merrimac*, um módulo amplificador fabricado pela *Motorola* e de circuitos amplificadores e controladores de tensão. O diagrama esquemático do circuito deslocador de fase e amplificador de tensão é mostrado na Figura 3.19.

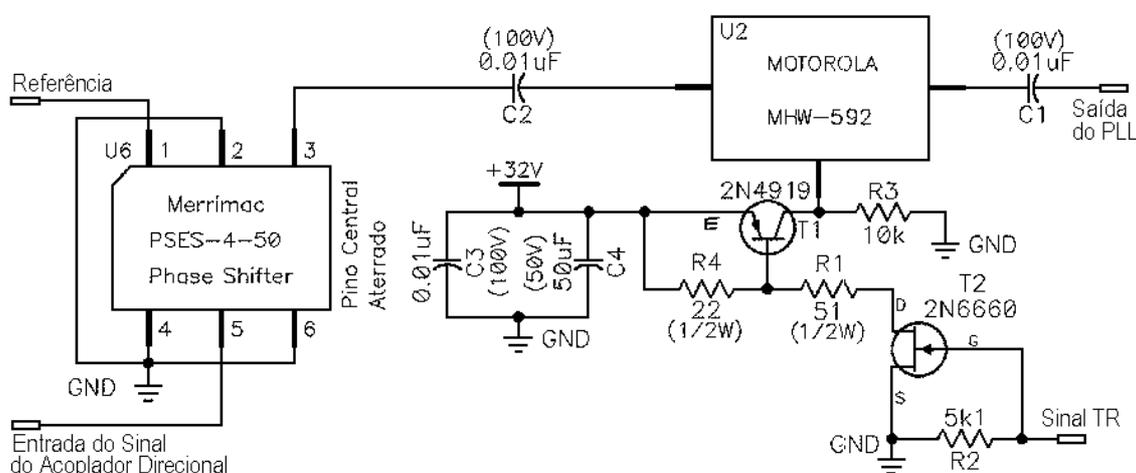


Fig. 3.19 – Diagrama esquemático do circuito deslocador de fase e amplificador de tensão.

O deslocador eletrônico de fase apresenta a propriedade de promover um deslocamento na fase da onda de um sinal senoidal que esteja alimentando seu pino de entrada (1) proporcional ao nível de tensão do sinal que alimenta seu pino de controle (5). A relação entre o nível de tensão e o deslocamento promovido é dada pela curva característica do deslocador eletrônico oferecida

pelo fabricante. Nela temos o valor mínimo de tensão de controle: 0,7 volts, a qual corresponde a 360° de deslocamento; e o valor máximo de tensão de controle: 26 volts, a qual corresponde a 10° de deslocamento.

O módulo amplificador de potência fornece um ganho de aproximadamente 35 dB ao sinal a ser amplificado e é fabricado para operar na faixa que vai de 1 a 200 MHz. Sua tensão de operação máxima é 28 volts, fornecida através do pino central. Uma vez que esse estágio amplificador não utiliza válvulas e apresenta alto ganho, ele melhora a estabilidade do sistema transmissor.

Os capacitores ligados à fonte de 32 volts são utilizados para estabilizar seu nível de tensão. O circuito utilizando o transistor 2N4919 tem a finalidade de manter o nível de corrente para o módulo amplificador e também é usado como circuito chave para cortar essa corrente, interrompendo a amplificação do sinal. O corte da corrente se dá através do "sinal TR" (Figura 3.19), que alimenta o transistor 2N6660. Esse sinal é derivado do circuito do radar responsável pela alimentação das chaves T/R, as quais controlam a utilização do conjunto de antenas para transmissão ou recepção. Quando esse sinal é positivo (5 volts) indicando uso das antenas para recepção o transistor 2N6660 conduz, drenando a corrente de base do transistor 2N4919 e bloqueando o módulo amplificador. Caso contrário, o transistor 2N6660 não atua permitindo a amplificação normal do sinal que alimenta o transmissor.

### **3.4 Teste de Laboratório e Incorporação ao Radar**

O radar ionosférico de São Luís do Maranhão está sendo utilizado somente durante campanhas de estudos ionosférico, porém vem sofrendo constantes aprimoramentos. No período que antecede a campanha, são montados em laboratório os circuitos de baixa potência e testados os módulos componentes e os novos módulos que serão acrescentados. No início de cada campanha, são

montados no local os módulos componentes do sistema, verificado o conjunto de antenas, incorporados os novos módulos e realizados ajustes necessários.

Antes da campanha de agosto de 1998, o grupo de engenheiros e técnicos da CEA, montaram os sistemas de baixa potência que compõem o radar ionosférico no laboratório de ionosfera. Esta montagem foi realizada para simular algumas das condições que encontraríamos durante a campanha e, desta forma, testar os novos módulos. Foram testados os novos filtros; o sistema das chaves T/R, necessárias para comutação da função das antenas entre transmissão e recepção; a unidade controladora de fases e o sistema de armazenamento de dados. Para o eco de retorno do sinal espalhado, foi utilizado um gerador de sinais incorporado ao sistema.

Dos testes dos circuitos isolados da unidade controladora de fases, o circuito amplificador de sinal, na saída do PLL, ofereceu um ganho de 35 dB quando necessitávamos apenas de 15 dB. Assim, decidimos alterar o nível de tensão de entrada dos transmissores, utilizando atenuadores nas entradas dos oito transmissores. Dessa forma, teríamos disponível um ganho extra e, sempre que necessário, poderíamos alterar o nível do sinal que alimenta os transmissores, alterando os valores dos atenuadores.

Outro circuito que apresentou rendimento acima do esperado, quando testado isoladamente, foi o circuito amplificador com filtro passa baixa. Para seu teste, ainda não dispúnhamos dos valores exatos dos resistores, então utilizamos na malha de realimentação, o resistor de 680 k $\Omega$  ao invés de 750 k $\Omega$ . Isso implicaria em um ganho máximo de 680 vezes o valor de entrada. Entretanto, utilizando um sinal de alimentação de amplitude 40 mV, na frequência de 1 kHz, encontramos um sinal de saída de amplitude 28 V. Da relação dos sinais o ganho foi de 700 vezes, portanto 20 vezes acima do esperado.

Durante o teste no laboratório da unidade controladora de fases incorporada aos circuitos do radar, estávamos usando somente a parte de baixa potência do radar, portanto o sinal de saída do transmissor foi gerado por uma divisão no sinal de referência. Para simular a diferença nas fases dos sinais foi utilizado um deslocador de fase manual. Assim, foram introduzidas diferenças entre as fases que foram desde alguns graus até 90 graus. O resultado foi que a unidade controladora de fase conseguiu detectar todas as diferenças e alterou com sucesso a fase de referência, de modo que essas diferenças foram compensadas. A Figura 3.20 mostra a coerência entre as fases dos sinais de quatro dos oito canais do controlador de fase, durante os teste realizados em laboratório com erro de 45 graus na fase dos sinais de entrada.

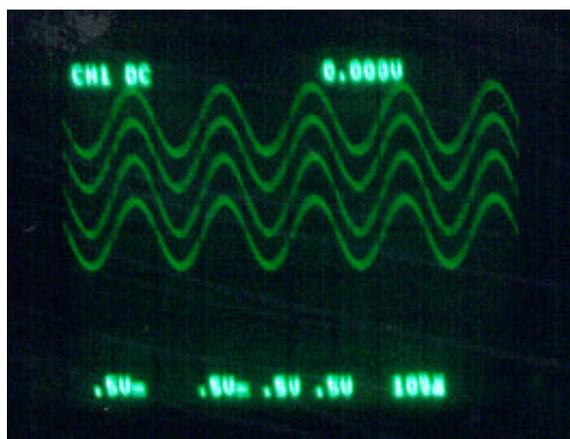


Fig. 3.20 – Sinais, vistos no osciloscópio, de quatro dos oito canais da unidade controladora de fase, medidos utilizando simulação em laboratório com erro de 45 graus entre as fases dos sinais de entrada.

Apesar do objetivo ser alcançado, inicialmente o circuito do *sample and hold* apresentou alguns problemas de retenção do sinal, devido ao projeto determinar aquisição do sinal no fim do pulso do “strobe”. Não havíamos previsto que o tempo de aquisição do *sample and hold* demoraria mais que o tempo de queda do pulso. Deste modo, o sinal retido não correspondia ao sinal proporcional à diferença entre as fases dos sinais analisados pelo circuito anterior. A solução encontrada foi introduzir, na própria placa geradora de sinais, um divisor de frequência digital para o sinal do “strobe”. Com esta

modificação, o sinal do “strobe” dá a ordem para reter o sinal proporcional a diferença entre as fases dos sinais alimentados antes que o pulso termine.

Durante a última campanha, realizada em agosto de 1998, tivemos oportunidade de incorporar a unidade controladora de fase ao sistema do radar. Esperávamos alguns problemas que são inerentes dos trabalhos de campo, entretanto nossa surpresa foi que somente alguns ajustes de nível de tensão na saída do *sample and hold* foram necessários. A Figura 3.21 apresenta a coerência das fases dos sinais de dois dos oito canais do controlador de fase, utilizando o radar ionosférico durante os experimentos de estudos do eletrojato equatorial.

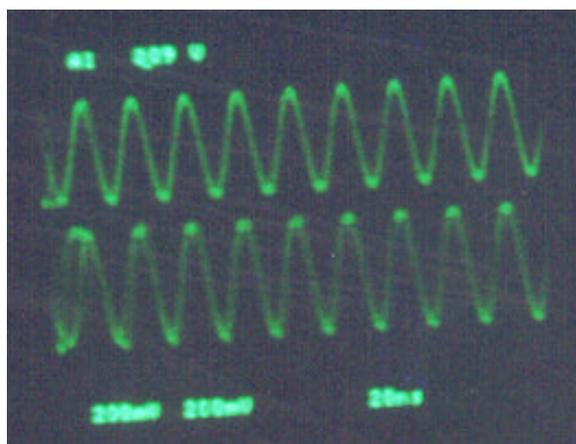


Fig. 3.21 – Sinais, vistos no osciloscópio, de dois dos oito canais da unidade controladora de fase, medidos durante a utilização da unidade controladora de fase incorporada ao radar ionosférico, na última campanha de agosto de 1998.

Nessa campanha foi observado somente o eletrojato equatorial, apesar de importantes estudos de *spread F* poderem ser conduzidos com observações de radar, devido às limitações de potência impostas pelo conjunto de transmissores. Entretanto, o sucesso dos novos módulos componentes utilizados no radar foi comprovado pela grande quantidade de dados adquiridos pela primeira vez de forma contínua.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS

Um dos produtos de radares coerentes é o mapa de variação temporal de intensidade versus altura, no qual podemos verificar a presença do eletrojato e, utilizando maior potência nos transmissores e operando em horários específicos, a formação de bolhas ionosféricas. Outro produto é o gráfico de amplitude espectral de frequência Doppler para cada altura de estudo. Para geração desse gráfico, utilizamos a técnica da transformação integral de Fourier, e assim, observamos a distribuição da frequência, ou seja, as velocidades das irregularidades, através do deslocamento do pico de distribuição, devido ao efeito Doppler. E é também com os dados desse gráfico que obtemos a potência integrada para cada altura, necessária à geração do mapa de variação temporal de intensidade.

Para a obtenção destes produtos, a metodologia de análise dos dados empregada foi concebida baseada na forma de como a informação das características das irregularidades ionosféricas é passada através do sinal fornecido pelo retroespalhamento e na maneira como essas informações são armazenadas. Para a análise de dados, também são necessários os conhecimentos do método de determinação da velocidade de deslocamento das irregularidades ionosféricas em relação ao radar e do método matemático utilizado no processamento computacional.

Um fator importante na análise de dados do radar ionosférico de São Luís é o tempo para a sua redução. A velocidade da aquisição dos dados é muito grande, fornecendo uma grande quantidade de dados, o que é uma das qualidades do sistema. Porém, como o sistema ainda está em fase inicial de operação, nem todos os dados estão confiáveis. Assim, para manter a confiabilidade dos resultados, optamos pela utilização da média dos melhores

dados escolhidos. Isso garantiu resultados confiáveis; entretanto, o trabalho de redução ficou bastante demorado. Apesar de desenvolvermos ferramentas computacionais para facilitar esse trabalho, a redução de um dia de dados, isto é, a geração de um mapa diário de variação temporal de intensidade versus altura, levou em torno de duas semanas.

#### 4.1 O Sinal Armazenado pelo Radar e a Obtenção das Informações das Irregularidades Ionosféricas

O sinal emitido pelo radar é senoidal, modulado por um trem de 1024 pulsos de onda quadrada. As variáveis controláveis do sinal emitido são a largura de pulso, variável de  $20\ \mu\text{s}$  até  $100\ \mu\text{s}$  e a taxa de repetição de pulso, variável de  $1000\ \text{Hz}$  a  $50\ \text{Hz}$ , correspondendo a um período entre pulsos de  $1\ \text{ms}$  até  $20\ \text{ms}$ . As variáveis de controle do sinal retroespalhado e recebido são: a atenuação exigida pela unidade de aquisição de dados; o tempo entre a emissão do sinal do radar e o início dos pulsos de amostragem, que determina a altura de início do estudo; e o número de amostras do sinal retroespalhado, que representam as alturas de estudo. Os valores típicos dessas variáveis de controle, para estudos da regiões E e F, são apresentados na Figura 4.1.

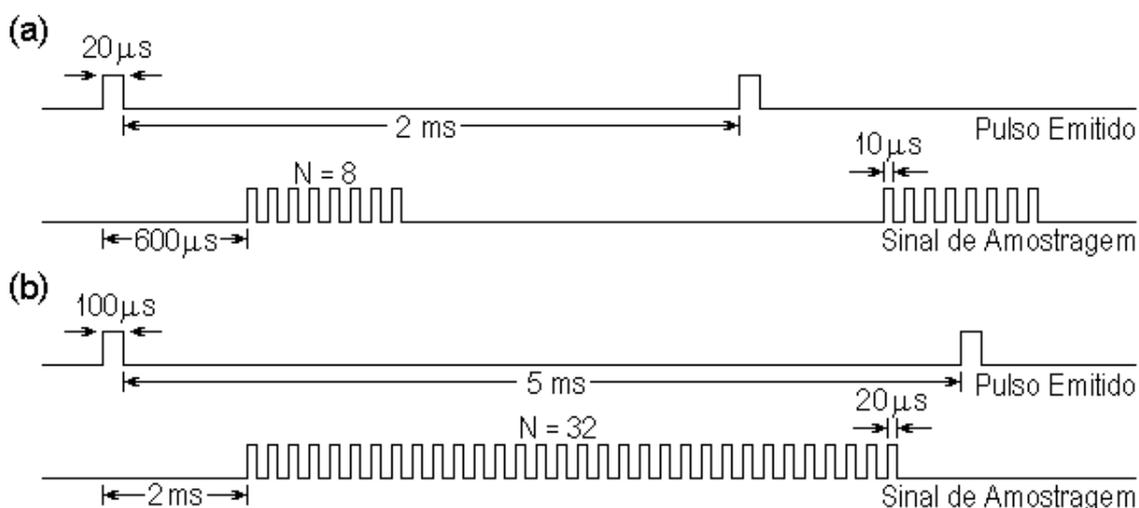


Fig. 4.1 – Valores típicos dos parâmetros de controle do sinal emitido e retroespalhado recebido pelo radar ionosférico, para estudos (a) da região E e (b) da região F.

Quando um sinal retroespalhado é recebido pelo conjunto de antenas, ele é amostrado pelo sistema receptor e cada amostra do sinal é passada a dois detetores de fase. Nesse estágio, ocorre a primeira filtragem de informação. Esses detetores de fase comparam a amostra, que possui informação do deslocamento Doppler, com um sinal de referência do radar, e provêm uma saída de sinal em quadratura (seno) e outra em fase com sinal de entrada (coseno).

O número de amostras do sinal determina o número de faixas de alturas que escolhemos para analisar individualmente. Do conjunto de 1024 amostras de cada altura, obtemos a informação sobre o deslocamento Doppler e da potência total retroespalhada daquela altura.

Após as amostras sofrerem essas comparações, os sinais resultantes são passados por filtros passa baixa de 50 kHz. Esse valor é devido à menor largura de pulso ser de 20  $\mu$ s. Assim, é filtrada a onda portadora, restando somente as informações de amplitude e largura de cada amostra. A Figura 4.2 apresenta de forma esquemática a primeira filtragem de informação utilizando os detetores de fase e os filtros de 50 kHz.

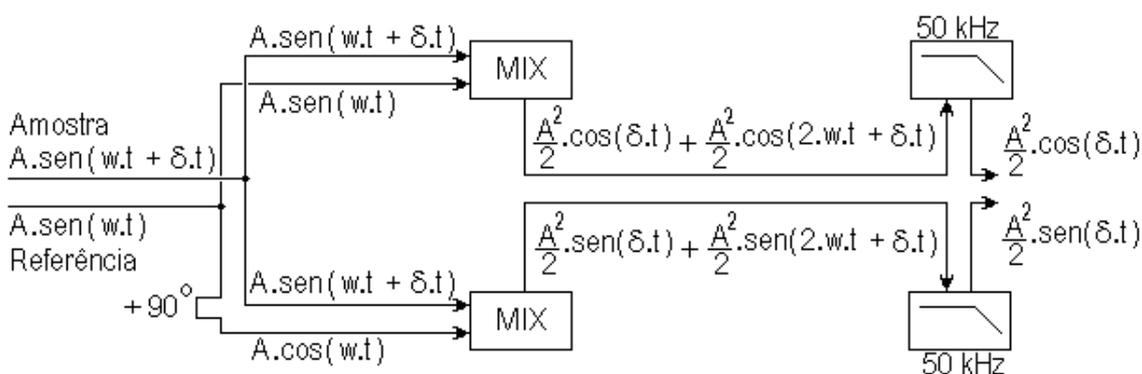


Fig. 4.2 – Esquema de funcionamento da primeira filtragem de informação utilizando os detetores de fase e os filtros de 50 kHz. Nessa Figura, A é a amplitude de uma onda genérica,  $\delta$  é o coeficiente devido ao efeito Doppler e  $w$  é o coeficiente devido aos 50 MHz do sinal emitido.

Como pode ser observado na Figura 4.2, após a mistura de sinais e filtragem, o sinal resultante apresenta apenas as características do efeito Doppler e de amplitude que chegaram através da amostra do sinal retroespalhado. Agora, essa amostra está pronta para ser digitalizada e armazenada em disco rígido. A gravação é feita em arquivos, em formato binário - por economia de espaço - e as partes reais e imaginárias das amostras sucessivas são gravadas de forma seqüencial. Dessa forma, cada arquivo de dado contém a informação de 1024 partes reais e 1024 partes imaginárias das amostras. Porém, devemos lembrar que nessa etapa do processo, a informação sobre o deslocamento Doppler ainda não foi obtida. Essa informação se espalha ao longo dos 1024 pulsos emitidos. Assim, é necessária a análise computacional, descrita nas seções que se seguem.

Durante a última campanha de agosto de 1998, utilizamos o seguinte processo de aquisição de dados: a cada três minutos um conjunto de dados de 20 arquivos, usando o feixe das antenas oblíquo e um conjunto de dados de 10 arquivos, usando o feixe das antenas zênite são gravados, e então, o sistema permanece em espera por dois minutos. Com este processo, conseguimos adquirir dados de espalhamento oblíquo e zênite com resolução de cinco minutos. Este intervalo foi escolhido baseado em experiências das variações ionosféricas feitas com observações do radar VHF de Trivandrum-Índia ( $12^{\circ}$  N,  $77^{\circ}$  E).

Para o estudo do eletrojato equatorial que realizamos, a configuração utilizada foi: largura de pulso de  $20 \mu\text{s}$ ; tempo entre pulso seguidos de  $1 \text{ ms}$ ; tempo de espera para o início de aquisição de  $630 \mu\text{s}$ ; largura de pulso da amostra de  $20 \mu\text{s}$ ; e aquisição de 16 amostras de sinal por pulso retroespalhado. Um operador sempre esteve presente, durante o período de operação do radar, para ajustar e tomar nota dos níveis de atenuação do sinal na entrada da placa digitalizadora. A informação dos níveis de atenuação é importante para que

todas as amplitudes de potência recebida sejam referenciadas ao mesmo nível. O controle dos níveis de atenuação é imposto pelas máximas tensões, negativa ou positiva, permitidas nas entradas da placa de aquisição.

## 4.2 O Efeito Doppler e o Cálculo da Velocidade

O eco recebido por um radar pulsado não indica somente que o alvo está presente, ele dá também a sua distância em relação ao radar. O eco recebido, apesar de potência consideravelmente menor que o sinal enviado<sup>2</sup>, possui a informação da velocidade com que o alvo se aproxima ou se distancia. Utilizando a técnica descrita na seção anterior, separamos do sinal recebido, a característica do sinal enviado, e podemos então verificar a presença de uma modulação de muito baixa frequência, em relação à frequência de operação do radar. O aparecimento dessa modulação é devido ao efeito Doppler, discutido nessa seção. A Figura 4.3 ilustra a forma como o efeito Doppler pode ser visualizado, quando temos uma irregularidade ionosférica se afastando ou se aproximando do radar com velocidade  $v$ . Neste exemplo, observamos a compressão das frentes de ondas do eco quando a irregularidade está se aproximando, e o distanciamento das frentes de ondas, quando ela está se afastando.

Na sua forma mais geral, o efeito Doppler significa uma mudança no intervalo aparente entre dois eventos consecutivos, devido ao movimento relativo entre o observador e o objeto observado, quando há uma velocidade finita de troca de informação sobre o evento (Gill, 1965).

---

<sup>2</sup> A potência de um eco recebido por um radar é da ordem de  $10^{-18}$  vezes menor que a potência do sinal enviado (Skolnik, 1962).

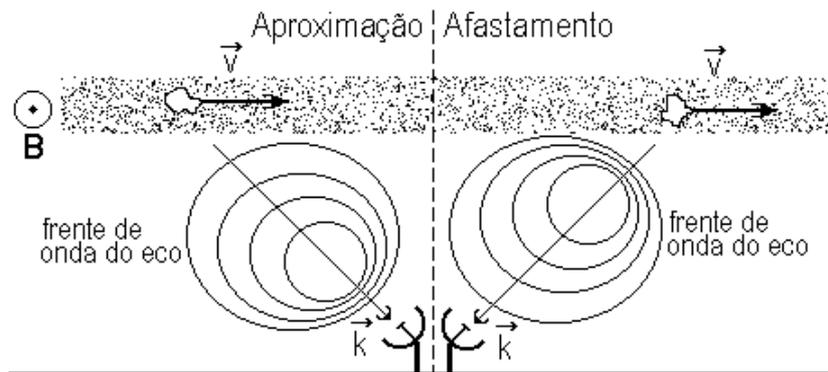


Fig. 4.3 – Efeito Doppler no sinal recebido, quando temos uma irregularidade ionosférica se afastando ou se aproximando do radar com velocidade  $v$ .

Imaginemos que as irregularidades equatoriais imersas no eletrojato estão a uma distância  $D$  do radar ionosférico. Desta forma, o número total de ondas contidas em duas vezes essa distância é  $2D/\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda correspondente a frequência de operação do radar  $f_0$ . Assim, a variação angular total  $\phi$  percorrida durante o tempo de emissão da onda e seu retorno é  $(2D/\lambda)2\pi$  radianos. Entretanto, as irregularidades estão se movimentando. Portanto, a variação angular  $\phi$  está constantemente mudando à medida que a distância  $D$  entre o radar e as irregularidades está aumentando ou diminuindo. Se a velocidade de deslocamento da irregularidades é constante, a taxa com que essa variação angular ocorre é dada pela equação 4.1.

$$\omega = 2\pi f_d = \frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dD}{dt} = \frac{4\pi v_i}{\lambda} \quad (4.1)$$

Nesta equação,  $f_d$  é frequência de deslocamento devido ao efeito Doppler,  $\omega$  é a velocidade de variação angular, correspondente a esta frequência, e  $v_i$  é a velocidade de deslocamento das irregularidades ionosféricas em relação ao radar. Dessa forma, a frequência devida ao deslocamento Doppler pode ser expressa por:

$$f_d = \frac{2v_i}{\lambda} = \frac{2v_i f_0}{c}, \quad (4.2)$$

na qual  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s).

Por fim, com a utilização desta equação 4.2, e observando os espectros de potência a cada altura, temos condições de determinar a velocidade de propagação das irregularidades ionosféricas para cada altura.

### 4.3 A Transformada de Fourier

O método de transformada integral, particularmente a de Fourier, tem importantes aplicações em análises de dados. A principal utilização da transformada de Fourier é no estudo do comportamento periódico de sinais contínuos variantes no tempo. Nas áreas das engenharias, esta ferramenta matemática é frequentemente utilizada para transformação de sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência. Isso se aplica em áreas como propagação de ondas acústicas, óptica e teoria de ondas eletromagnéticas para, por exemplo, estimarmos o espectro de potência na convolução de duas séries temporais para a montagem de filtro (Bergland, 1969).

No nosso caso, a utilização da transformada de Fourier é usada para estimativas do espectro de potência do sinal retroespalhado pelas irregularidades ionosféricas. Baseado nesse espectro, determinamos o deslocamento Doppler devido ao movimento relativo das irregularidades em relação ao radar. A integração desse espectro resulta na potência total retroespalhada.

A transformada de Fourier é, em geral, aplicada à funções contínuas, implicando uma extensão infinita do sinal. Entretanto, quando realizamos uma análise de dados, a série temporal formada pelo conjunto de dados é finita em

extensão, pois o nosso conjunto de dados é finito (Cooley e Tukey, 1969; Bergland, 1969). Assim, a forma de onda analisada é discreta. Neste caso, devemos utilizar a transformada de Fourier na sua versão discreta (*Discrete Fourier Transform - DFT*).

Assim, como utilizamos a transformada de Fourier para transformar sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência, utilizamos a transformada inversa de Fourier para transformar sinais do domínio da frequência para o domínio do tempo. A transformada de Fourier para um sinal contínuo, no domínio do tempo  $x(t)$ , pode ser escrita da forma:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \quad , \quad (4.3)$$

e sua transformada inversa é dada por:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} df \quad . \quad (4.4)$$

Analogamente, a transformada discreta de Fourier (DFT) e sua inversa podem ser escritas da forma:

$$X(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{\frac{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot j \cdot k}{N}} \quad e \quad (4.5)$$

$$x(k) = \sum_{j=0}^{N-1} X(j) \cdot e^{\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot j \cdot k}{N}} \quad , \quad (4.6)$$

para  $j=0,1,\dots,N-1$ ;  $k=0,1,\dots,N-1$ , e  $x(k)$  e  $X(j)$  sendo séries complexas.

A transformada de Fourier para funções discretas é perfeitamente aplicável. Entretanto, novos métodos computacionais foram desenvolvidos e a DFT sofreu uma evolução no seu algoritmo. Foi criada a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT), que é um método computacional mais eficiente para o cálculo da DFT de uma série temporal. Sua eficiência está no fato de calcular os coeficientes da DFT iterativamente (Cochran et al., 1967). O cálculo direto dos coeficientes de uma série com N amostras requer cerca de  $N^2$  operações aritméticas, contra  $2N\log_2(N)$  operações efetuadas pela FFT. A comparação do número de operações efetuadas no cálculo direto da DFT e utilizando a FFT é ilustrada na Figura 4.4. Observando esta Figura, fica evidente que a diferença cresce com o aumento do número de amostras.

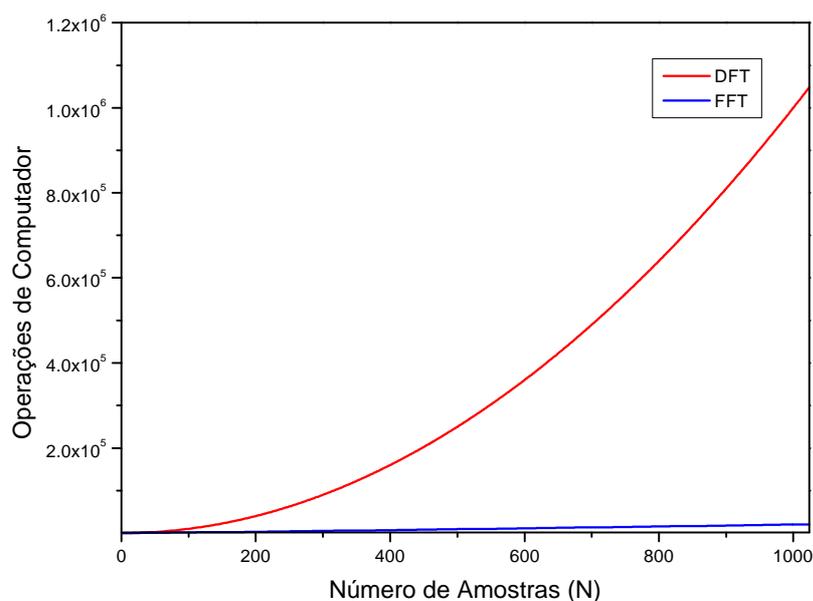


Fig. 4.4 – Número de operações de computador, exigidas para o cálculo de DFT usando algoritmo de FFT, comparado com o número de operações realizadas no cálculo direto desta DFT.

A eficiência da transformada rápida de Fourier torna mais acessível o tratamento de alguns problemas, sobretudo aqueles com grande número de dados, que é o nosso caso. Como foi visto anteriormente, cada conjunto de

dados tem 10 ou 20 arquivos, com cada arquivo contendo 16 séries de 1024 dados.

#### 4.4 Os Passos do Processo de Análise e os Gráficos Obtidos

A rotina de redução de dados empregada foi estabelecida com base na qualidade dos dados recebidos durante a campanha, na quantidade de dados adquiridos e nos efeitos característicos observados com radares, provocados pela presença das irregularidades ionosféricas no eletrojato equatorial.

Devido a problemas iniciais provocados pela placa de aquisição de dados, superados pela quantidade de dados adquiridos, optou-se pela realização de média dos cinco melhores arquivos de cada conjunto de dados, de forma a manter a confiabilidade dos dados, como já foi mencionado. O gráfico apresentado na forma da Figura 4.5 dá uma idéia da quantidade de dados adquiridos durante a última campanha para serem processados e analisados.

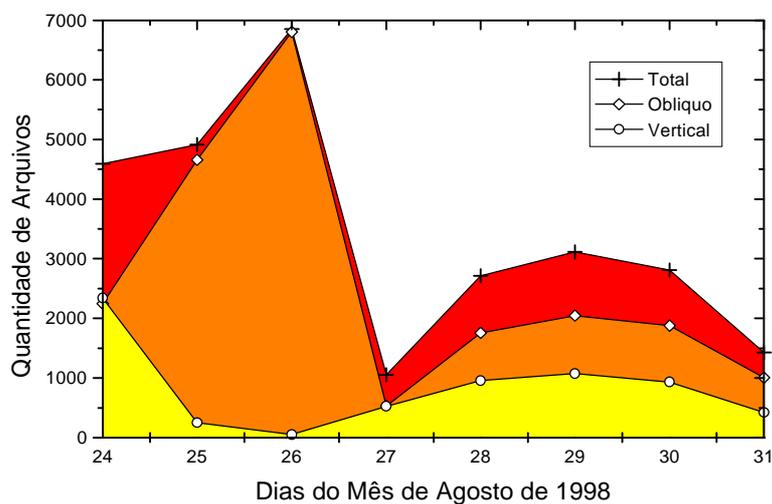


Fig. 4.5 – Quantidade de dados adquiridos a cada dia, durante a última campanha, separados por tipo de dado armazenado: com utilização do feixe oblíquo, ou feixe vertical. Os arquivos estão armazenados na forma binária, e cada um contém 64 kb (65.536) de dados armazenados.

Portanto, os passos iniciais no processo de análise de dados brutos foram: a conversão dos dados da forma binária para o formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII); o agrupamento de forma seqüencial, das partes reais e imaginárias dos dados de mesma altura; e a aplicação da transformação de Fourier para cada seqüência de dados de mesma altura. Para essa etapa do trabalho foi desenvolvido um programa em linguagem C, utilizando o algoritmo de transformação de Fourier elaborado por Press, et al. (1992). A Figura 4.6 ilustra essa primeira etapa do processo inicial de análise de dados.

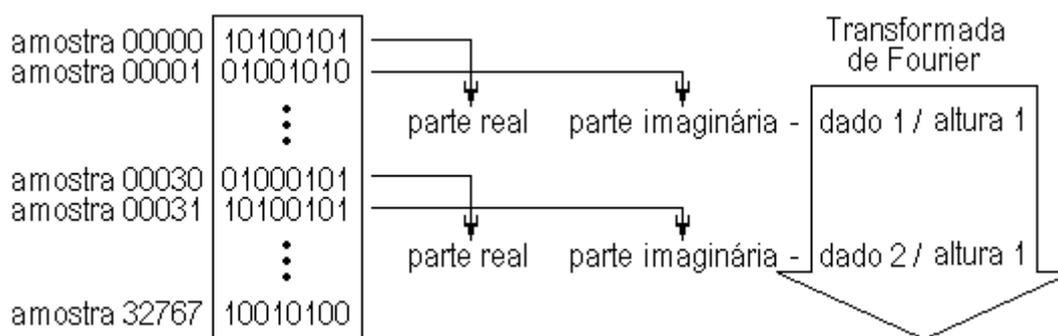


Fig. 4.6 – Esquema simplificado mostrando a estrutura dos dados armazenados em disco rígido e a forma como ele é extraído, agrupado e processado, na primeira etapa do processo de redução de dados.

Convém lembrar que, para cada arquivo bruto processado utilizando a análise de Fourier, é gerado um novo arquivo com 16 espectros de potência, cada um correspondente a uma altura estudada, conforme o número de pulsos de amostragens descrito anteriormente. Nesse ponto, começa o processo de seleção entre os dados pré processados. Em cada conjunto de dados de 10 ou 20 arquivos são escolhidos os cinco que melhor representam o conjunto. Para essa escolha, os dados são plotados em uma coluna de gráficos de espectro de potência versus amplitude, na qual o gráfico correspondente à altura estudada mais baixa fica colocado abaixo, e o correspondente a altura estudada mais elevada fica colocado no topo, conforme pode ser visualizado na Figura 4.7.

RADAR ESCO - tp:0.0010s tsp:0.00002s td:0.0006s ts:0.00002s nr:1024 na:16  
Sat Aug 29 09:50:31 1998 Beam 30Deg Max power = 0.397W  
Dataset #19

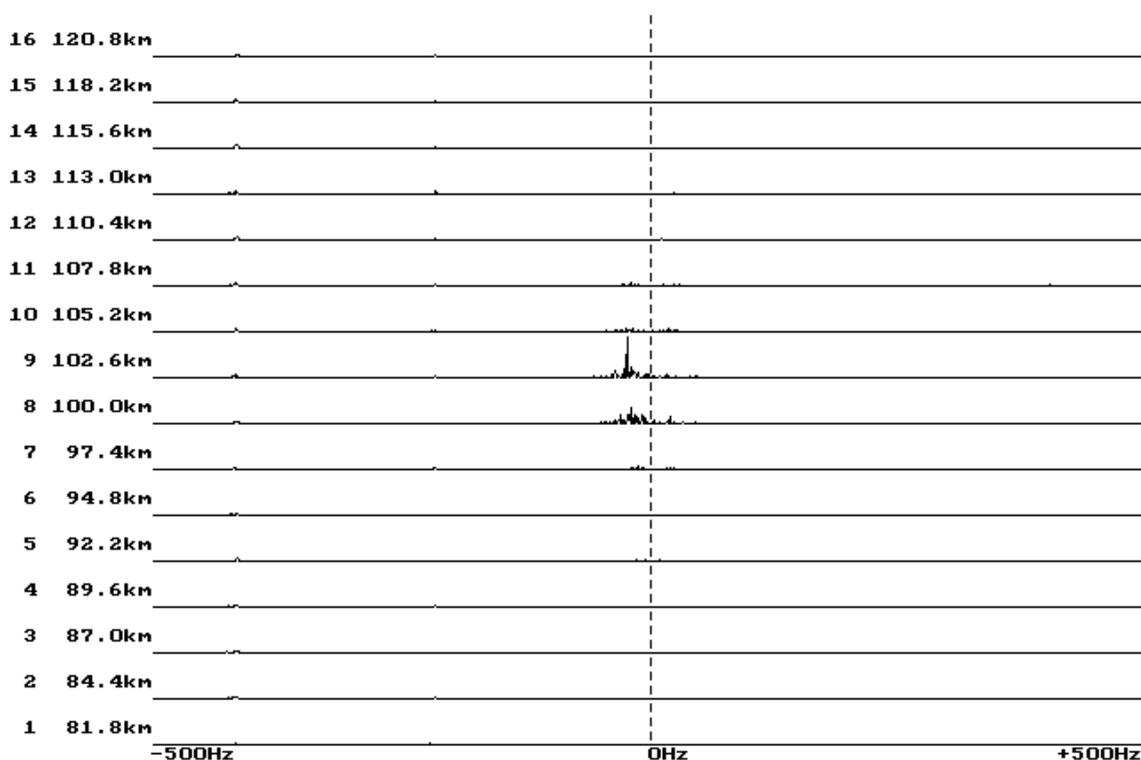


Fig. 4.7 – Seqüência de gráficos de espectro de potência versus altura, para as 9 h e 50 min do dia 29 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão.

Pela observação dos gráficos deste tipo, são analisadas a razão sinal–ruído e a altura média das irregularidades ionosféricas para este conjunto de dados. Uma vez escolhidos os cinco melhores arquivos, o próximo passo foi realizar a média entre cada ponto correspondente destes cinco arquivos e integrar a potência total recebida a cada altura. Nesta etapa foi utilizado o *software* de manipulação de dados Origin, na sua versão 5.0. Para automatizar o processo, foi desenvolvida em linguagem própria do *software*, uma rotina que funciona integrada ao *software*. A função dessa rotina é descrita brevemente no algoritmo a seguir.

- 1) importar os dados em formato ASCII, dos arquivos escolhidos pelo usuário, para uma planilha do *software*;

- 2) calcular a média entre os valores dispostos na linha, e copiar esses valores médios para 16 colunas de uma segunda planilha, onde cada coluna corresponde a uma das 16 alturas.
- 3) obter as integrais dos valores de todas as colunas dessa nova planilha, e colocá-las na ordem correta numa terceira planilha;
- 4) e por fim, salvar o projeto com nome especificado pelo usuário.

Ao final do trabalho de redução de todos os arquivos de um dia de dados, o passo seguinte foi copiar todos os valores, dispostos em forma de coluna, correspondentes às integrais dos espectros de potência, para uma única planilha contendo 16 linhas, e uma coluna para cada cinco minutos de operação do radar. E, finalmente, pôde-se criar o mapa de variação temporal de intensidade com a altura. Entretanto, cabe mencionar que esse processo é feito em separado para dados obtidos com feixe oblíquo e com feixe zenital. A Figura 4.8 apresenta o mapa de variação temporal da intensidade, como resultado da redução de dados, utilizando o feixe vertical, para o dia 30 de agosto de 1998.

Porém, o trabalho de redução ainda não termina nesse ponto. Através da visualização desse mapa, é possível identificar as horas e as alturas onde a presença das irregularidades foram verificadas, além de obter informação sobre a intensidade com que se deu sua presença. Identificando essas áreas, e utilizando novamente os gráficos de espectros de potência, podemos calcular, através do efeito Doppler mencionado neste Capítulo, a velocidade de deriva dessas irregularidades dessa região.

Com as velocidades de deriva calculadas para o feixe oblíquo ( $30^\circ$  em relação a vertical) e para o feixe zenital, calculamos a real velocidade de deriva horizontal utilizando trigonometria básica.

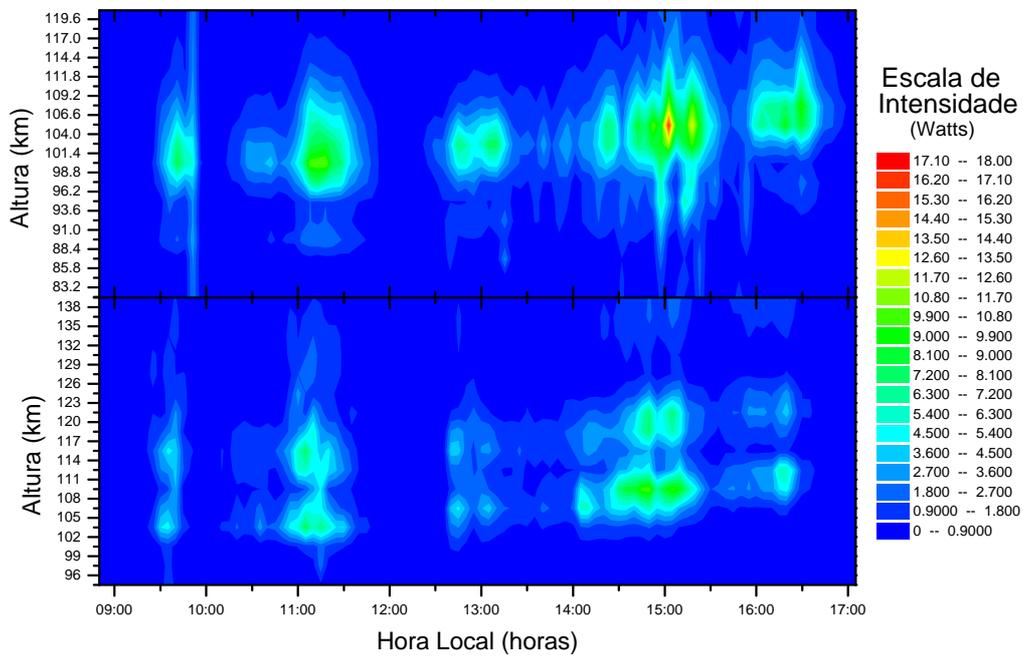


Fig. 4.8 – Mapas de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, no mapa acima e feixe vertical no mapa abaixo, para o dia 30 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão.

As regiões do mapa dominadas pelas cores quentes próximas ao vermelho, representam as regiões da ionosfera que ofereceram maior amplitude de sinal de retroespalhamento, recebido pelo radar ionosférico de São Luís.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Como resultado dessa dissertação, concebemos um sistema de monitoramento e controle de fase para cada um dos oito transmissores do radar ionosférico de São Luís do Maranhão. Esse sistema foi utilizado na última campanha de agosto de 1998, como protótipo, e que já conta com a sua versão final em fase de acabamento, com modificações e modernizações incorporadas à unidade.

Graças à utilização desse sistema e em conjunto com os esforços de toda a equipe para realizar as modificações necessárias nos circuitos do radar, obtivemos êxito no nosso objetivo, que foi o de operar os sistemas do radar durante um período suficiente para proporcionar os primeiros resultados de pesquisa ionosférica realizada com um radar de espalhamento coerente no Brasil. A análise desses dados ainda não está completamente esgotada, porém resultados preliminares já foram publicados (Denardini et al., 1998).

#### **5.1 A Unidade de Controle de Fase**

Um dos principais problemas que vínhamos encontrando na operação do radar ionosférico de São Luís era a má formação do feixe de irradiação de potência do conjunto de antenas, devido à discordância das fases de cada um dos oito transmissores isoladamente. O controle das fases era baseado na confiança nos valores projetados para os componentes eletrônicos dos circuitos de cada transmissor. Entretanto, os valores esperados não estavam correspondendo àqueles do projeto. Por isso, os oito transmissores não conseguiam operar em conjunto e, conseqüentemente, nenhum dado realmente confiável poderia ser coletado.

Nesse aspecto, a unidade controladora de fase, discutida em detalhes no Capítulo 3, solucionou esse problema. Ela possui indicadores visuais de

casamento de fase, que através de LED verdes e vermelhos indicam quando um ou mais transmissores estão ou não em fase com o sinal de referência do conjunto. Entretanto, cada controlador não espera por ajustes do operador caso um ou mais transmissores estejam fora de fase em relação à referência. O controlador de fase atua automaticamente em cada sinal que alimenta cada um dos transmissores individualmente, adiantando ou atrasando sua fase, de modo a compensar a diferença entre as fases, medida pelo circuito detector de fase do controlador. A Figura 5.1 mostra a coerência (a) das fases dos sinais de quatro dos oito canais do controlador de fase, durante testes simulados em laboratório, e (b) das fases dos sinais de dois dos oito canais do controlador de fase, durante a aquisição de dados na campanha.

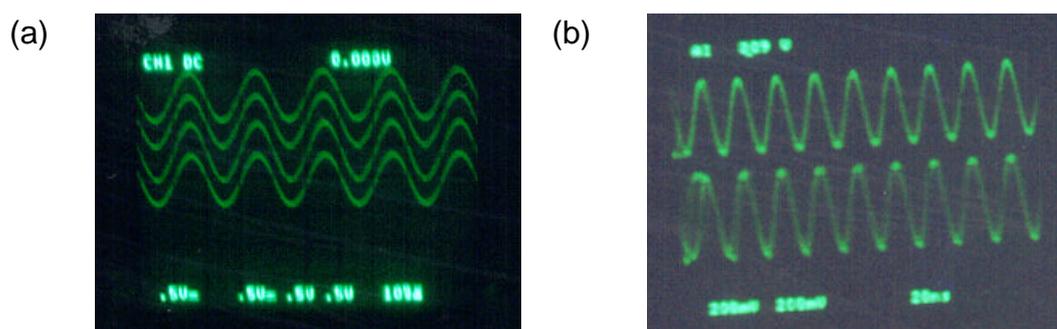


Fig. 5.1 – Sinais vistos no osciloscópio (a) de quatro dos oito canais do controlador de fase medidos utilizando simulação em laboratório, com erro de  $45^\circ$  entre as fases dos sinais de entrada, e (b) de dois dos oito canais do controlador de fase medidos durante a campanha de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão.

## 5.2 A Coleta de Dados

Na última campanha, realizada em agosto de 1998, recolhemos informações relacionadas ao eletrojato equatorial, durante toda a última semana da campanha. Apesar das observações por radares coerentes serem utilizadas para importantes estudos de irregularidades de plasma da região F, esses dados adquiridos estavam relacionados ao fenômeno do eletrojato equatorial,

devido a algumas limitações de potência que foram impostas pelos transmissores.

Para o estudo do eletrojato equatorial, coletamos aproximadamente dois giga bytes de dados, com uma resolução temporal de 6 segundos entre dados do mesmo conjunto. Os dados foram agrupados em conjuntos de 100, 20 e 10 arquivos, de acordo com as condições de estabilidade dos sistemas do radar e de acordo com a relação espaço disponível em disco rígido versus qualidade da informação desejada. A Figura 5.2 apresenta de forma simplificada a quantidade de dados adquiridos durante a última campanha. Esta quantidade de dados recolhida, com essa resolução temporal muito pequena, nos permitiu superar qualquer possível problema de aquisição que possa ter prejudicado algum conjunto de dados ou arquivo de dado isolado.

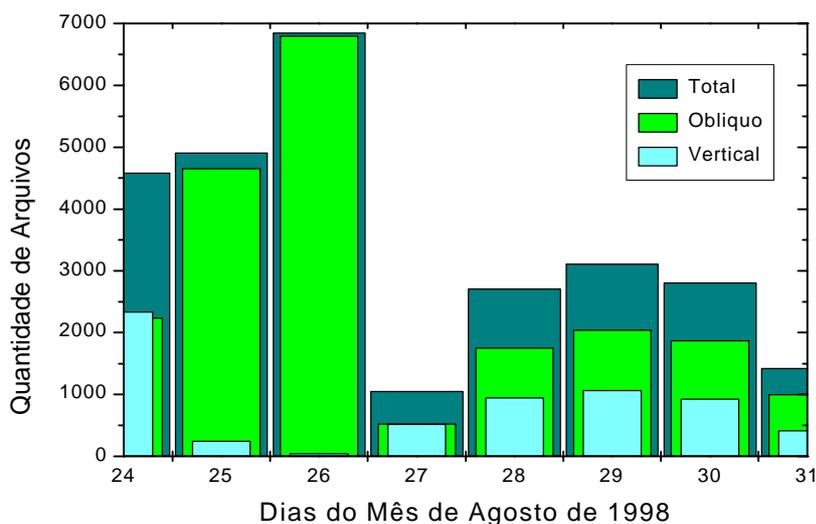


Fig. 5.2 – Dados adquiridos com utilização do feixe oblíquo e zênite a cada dia, durante a última campanha. Cada um contém 64 kb (65.536) de tamanho.

Além disso, com o aparecimento de fenômenos como o do dia 31, discutido adiante, mostrou-se muito importante termos uma grande base de dados. Quando o fenômeno foi descoberto durante a análise de dados, foi descartada

a hipótese de haver qualquer tipo de problema nos dados, pelo fato da estabilidade das fases ter sido garantida com a utilização da unidade controladora de fases, e porque optamos pela realização da média entre os cinco melhores dados do mesmo conjunto para consolidação da informação.

### 5.3 Apresentação dos Dados Reduzidos

Com a utilização da unidade controladora de fases já incorporada ao radar ionosférico, recolhemos oito dias de dados durante a última campanha de agosto de 1998 (Figura 5.2). Entretanto, durante o período em que estivemos coletando dados para o estudo do eletrojato, ocorreu uma tempestade magnética forte ( $Dst > 100$ ). Dessa forma, decidimos iniciar a redução dos dados pelo dia 31 e retroceder até o dia 28.

No gráfico da Figura 5.3, apresentamos a variação diurna do índice Dst para o mês de agosto de 1998, no qual pode ser visualizada a queda abrupta do dia 27, seguida de uma fase de recuperação nos dias 28, 29 e 30. No dia 31 de agosto, o índice decai novamente indicando que temos um novo tipo de distúrbio magnético ocorrendo.

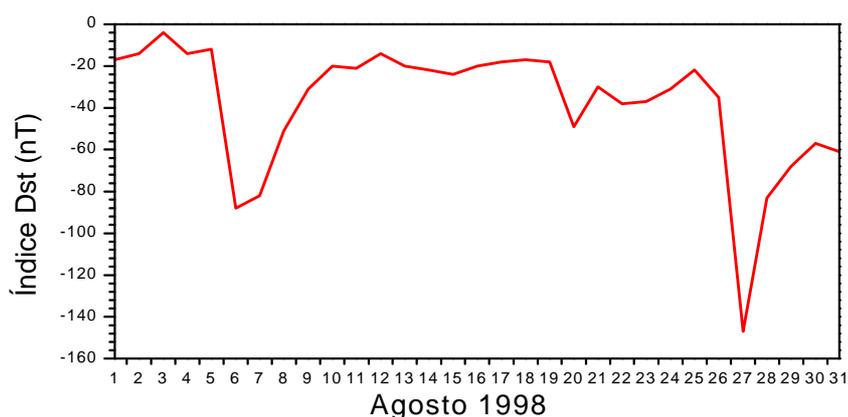


Fig. 5.3 – Variação dos índice Dst para o mês de agosto de 1998.  
FONTE: Adaptada de IPSL.CETP, 1998.

O índice Dst é construído a partir de magnetogramas de estações de magnetômetros espalhadas pelas regiões equatorial e de média latitude. Este índice é negativo e quanto mais negativo, mais intensa uma tempestade magnética.

Como a redução dos dados do radar, discutida no Capítulo 4, ainda não está totalmente concluída, os dados coletados durante a campanha não estão todos apresentados aqui. Os dados reduzidos sob forma de mapas de variação temporal de intensidade versus altura, são apresentados nas figuras que se seguem. A Figura 5.4 apresenta os mapas de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo (acima) e feixe vertical (abaixo), para o dia 28 de agosto.

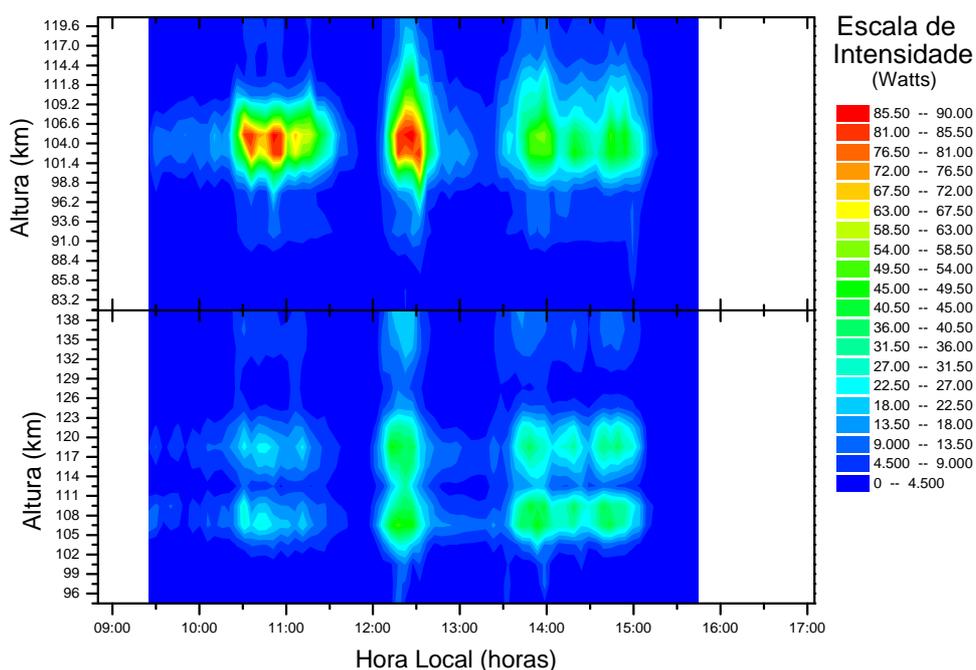


Fig. 5.4 – Mapas de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo (acima) e feixe vertical (abaixo), para o dia 28 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão.

Este foi o primeiro dia depois da tempestade magnética verificada no dia 27, e observando o mapa, podemos verificar que os sinais retroespalhados nas irregularidades ionosféricas apareceram às 09 h e 25 min (hora local), e o fim das recepções dos sinais se deu às 15 h e 45 min. Os sinais recebidos de maior intensidade foram obtidos próximos ao meio-dia. As lacunas em branco representam os horários onde o radar esteve operando, mas nenhum sinal retroespalhado foi detectado.

Podemos observar também que o mapa referente a operação do radar utilizando o feixe vertical (Figura 5.4 abaixo) apresenta dois máximos em alturas diferentes para a presença do eletrojato: em torno de 117 km e em torno de 107 km. Isso está incorreto, e se deve a uma possível má formação do feixe vertical nesse dia. Uma vez que o mapa referente a operação do radar com feixe oblíquo (Figura 5.4 acima) está apresentando o máximo para a altura em torno de 104 km, devemos acreditar que o feixe vertical estava apresentando dois lóbulos com inclinações de aproximadamente  $27,3^\circ$  e  $13,6^\circ$  em relação a vertical, ao invés de um único lóbulo exatamente vertical como era esperado.

Ainda durante a última campanha esse problema foi solucionado, entretanto na análise de dados, observamos essa má formação do feixe vertical ao longo de quase todos os dados analisados. Estamos investigando uma alternativa para convertermos a informação que dispomos para sua forma correta. Dessa forma apresentamos somente os mapas de variação temporal referentes a operação do radar com feixe oblíquo.

A Figura 5.5 apresenta os mapas de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, para o dia 29 de agosto. Nesse dia, os primeiros sinais espalhados nas irregularidades do eletrojato foram recebidos às 09 h e 20 min, quando a intensidade dos ecos foi muito fraca. As faixas em

branco nos horários iniciais e finais do mapa representam a ausência do eletrojato nos dados medidos, ou uma presença de irregularidades detectadas em número inferior ao necessário para retroespalhar potência suficiente para serem detectadas. Os últimos sinais foram recebidos às 17 horas.

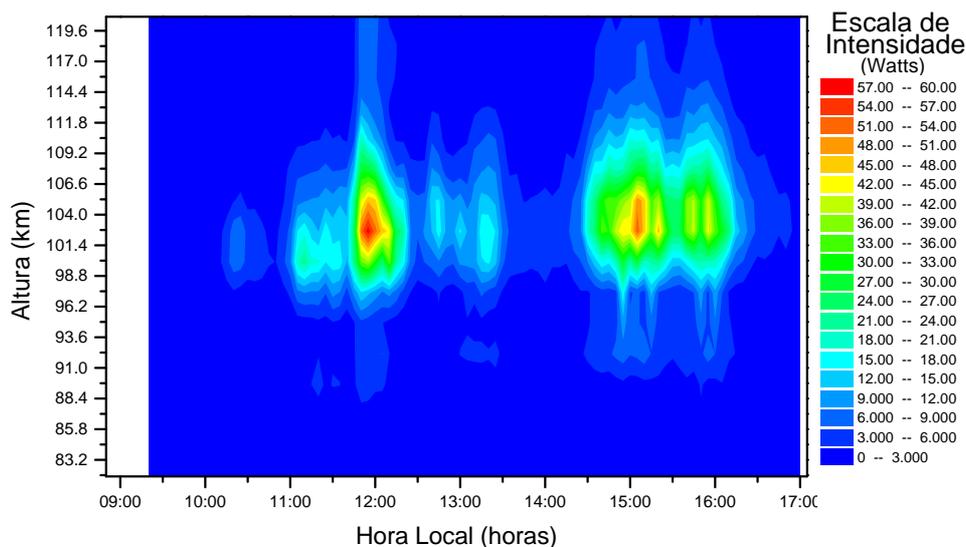


Fig. 5.5 – Mapa de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, para o dia 29 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão.

Observando a escala de intensidade, é possível verificar que os sinais mais fortes foram recebidos próximo ao meio-dia.

A Figura 5.6 apresenta os mapas de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, para o dia 30 de agosto. No dia 30, os primeiros sinais de retroespalhamento nas irregularidades do eletrojato equatorial apareceram mais ou menos na hora esperada. Os sinais mais fracos foram detectados às 8 h e 50 min e os últimos sinais recebidos pelo radar foram detectados às 17 h e 05 min. Porém, observando a escala de intensidade, verificamos que neste dia os sinais recebidos foram menos intensos que no dia 29, significando um menor número de irregularidades presentes.

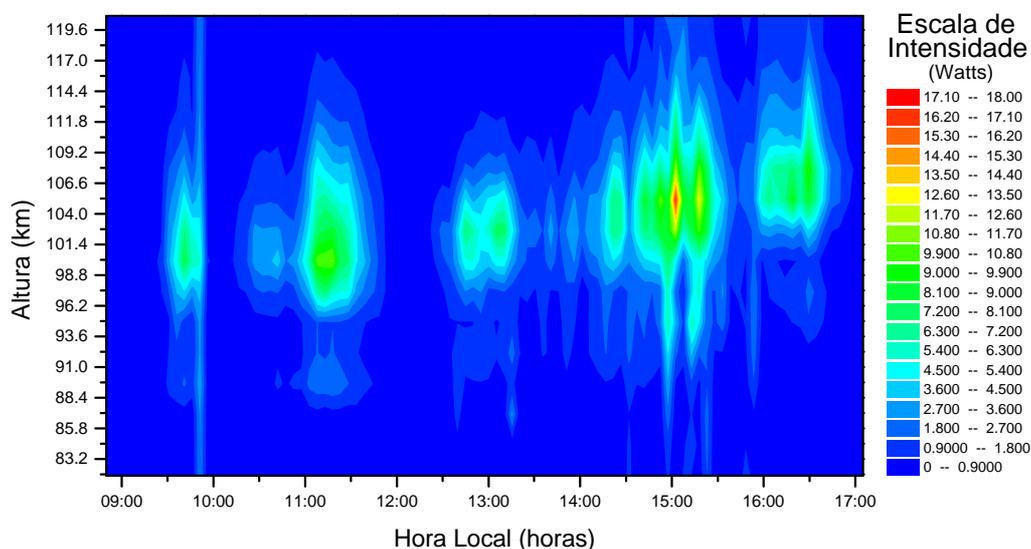


Fig. 5.6 – Mapa de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, para o dia 30 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão.

A Figura 5.7 apresenta os mapas de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, para o dia 31 de agosto.

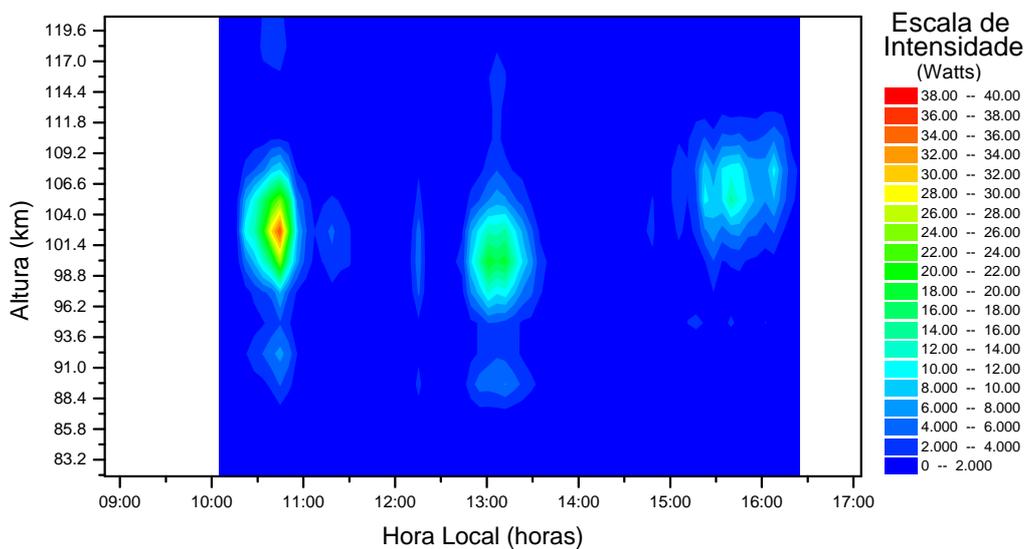


Fig. 5.7 – Mapa de variação temporal da intensidade versus altura, utilizando o feixe oblíquo, para o dia 31 de agosto de 1998, em São Luís do Maranhão.

Dia 31 de agosto foi o último dia de aquisição de dados. Neste dia, o eletrojato somente foi detectado às 10 h e 5 min, quando seu aparecimento normal seria em torno das 8 horas e o desaparecimento do eletrojato deu-se às 16 h e 25 min, quando poderia durar até em torno das 17 horas. Também pode-se identificar uma pequena redução na altura do eletrojato próxima ao meio-dia.

#### **5.4 Análise do Evento do Dia 31 de Agosto**

Na análise dos dados processados encontramos fenômenos interessantes como os do dia 31 de agosto (Figura 5.7), onde temos a detecção das irregularidades do aparecimento do eletrojato equatorial, somente em três horários determinados, ao longo do período de operação do radar. Além disso, neste dia tivemos um aumento súbito no valor do índice Dst, indicando que algum distúrbio magnético estava ocorrendo.

A simples observação de um dia de dados, como é o caso do dia 31, nos proporciona identificar pelo menos três efeitos: o deslocamento do pico de distribuição de frequência causado pelo efeito Doppler, que é visto no gráfico da análise espectral de frequência versus amplitude; a redução da altura do eletrojato equatorial próximo ao meio-dia local, observado no mapa de variação temporal de intensidade e o aparecimento do eletrojato somente durante três períodos específicos do dia, durante um começo de distúrbio magnético. Cada um desses eventos merece igual atenção em sua análise. Portanto, vamos proceder à análise de cada um desses efeitos isoladamente.

##### **5.4.1 O Deslocamento Doppler**

A análise espectral, como discutido no Capítulo anterior, proporciona uma visão das diversas frequências dos sinais que compõem o eco recebido. Em um sinal retroespalhado das irregularidades do eletrojato, temos uma gama de frequência compondo o sinal. Isso é de se esperar, uma vez que o sinal é

espalhado de um conjunto de irregularidades de plasma, que provavelmente não estão igualmente espaçadas entre si e nem perfeitamente alinhadas ao campo geomagnético. Como cada irregularidade retroespalha uma das parcelas que compõem o sinal, teremos pequenas diferenças nas componentes de freqüência de cada parcela componente do eco.

O resultado pode ser visto na Figura 5.8, onde o sinal com a freqüência fundamental do radar de 50 MHz já foi eliminado do eco retroespalhado, através de filtragem de freqüências acima de 50 kHz. A Figura 5.8 mostra, através de osciloscópio, o registro das componentes em fase e em quadratura do sinal filtrado, contendo freqüências geradas pelo efeito Doppler devido ao movimento das irregularidades em relação ao radar. Esse sinal foi adquirido durante a última campanha.

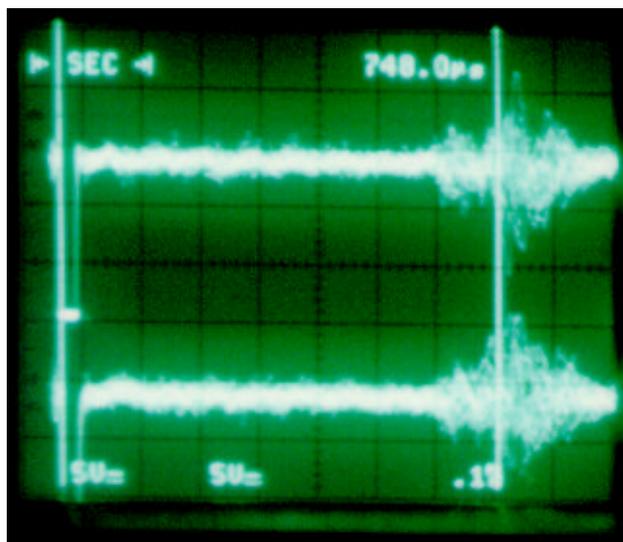


Fig. 5.8 – Sinal retroespalhado nas irregularidades do eletrojato equatorial, adquirido durante a última campanha de agosto de 1998, visto por osciloscópio.

Uma vez que a técnica de análise espectral, utilizando a transformada integral de Fourier, gera vários lóbulos de menor intensidade laterais à freqüência real, é comum estudar-se a velocidade de grupo das irregularidades, ao invés das velocidades individuais de cada irregularidade. Deste modo, uma forma de

determinarmos a frequência devido ao efeito Doppler do grupo das irregularidades, é realizar um ajuste da curva de distribuição de frequência por algum processo de ajuste. Assim, o pico da curva de ajuste representaria a velocidade de grupo mais provável. Para nossa análise, utilizamos o processo de suavização *FFT Filter*, com intervalos de 5 pontos ( $n=5$ ), disponível no próprio *software* de manipulação de dados Origin.

Nesse tipo de ajuste, a série de dados é tratada como se estivesse no domínio do tempo. É novamente aplicada a FFT, e os pontos correspondentes às frequências calculadas acima de  $1/(n\delta)$ , onde  $\delta$  é o tempo entre dois pontos consecutivos, são removidos do conjunto de pontos. Assim, as ondulações da distribuição são desprezadas, permanecendo somente a característica de modulação da curva. Como somente necessitamos saber onde se encontra a maior densidade de frequências da distribuição, em relação ao eixo das abcissas, nosso objetivo é alcançado com a utilização desse método.

A Figura 5.9 apresenta os gráficos de amplitude de potência versus frequência, obtidos da análise espectral para o sinal recebido às 10 h e 40 min do dia 31 de agosto, para as alturas desde 89,6 até 118,2 km, espaçados de 2,6 km entre elas.

Nesta Figura, foram excluídos os gráficos das três alturas inferiores (81,8; 84,4 e 87 km) e da altura superior (120,8 km) por não haver sinal retroespalhado dessas alturas. Podemos ver que a máxima intensidade de sinal recebido é encontrada na altura de 102,6 km, como pode ser visto no mapa de variação temporal de intensidade da Figura 5.7. Baseado na posição do pico de distribuição de frequência e na forma dessa distribuição (Figura 2.9), podemos identificar esse espectro de potência como um exemplo de efeito Doppler causado por irregularidades do tipo 2 (*gradient drift*).

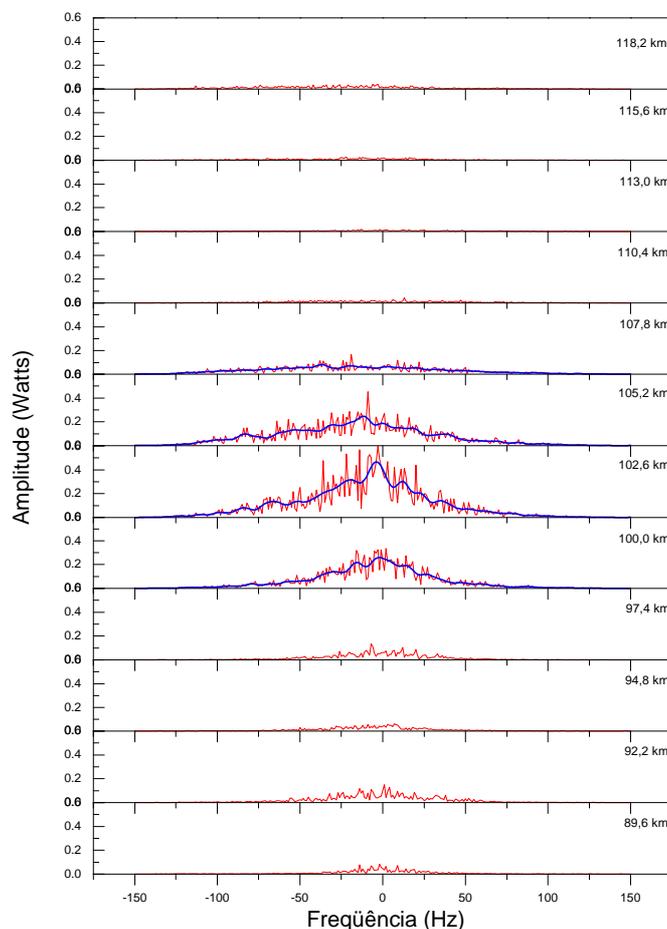


Fig. 5.9 – Gráficos de amplitude de potência versus freqüência da análise espectral para o sinal recebido às 10 h e 45 min do dia 31 de agosto, para as alturas desde 89,6 até 118,2 km, espaçadas de 2,6 km entre elas.

O deslocamento Doppler de  $-3,4$  Hz nesse gráfico, calculado através da equação 4.2, representa uma velocidade de deriva das irregularidades do eletrojato de  $10,2$  m/s na direção oeste, para essa altura de  $102,6$  km. A Figura 5.10 apresenta um mapa vetorial das componentes das derivas das irregularidades, na direção do feixe do radar, nos horários das 10 h e 20 min às 11 h, para o dia 31 de agosto, obtido pela análise dos gráficos de distribuição de freqüência para o feixe oblíquo. Nesta Figura podemos visualizar melhor as velocidades de deriva das irregularidades de plasma naquele instante.

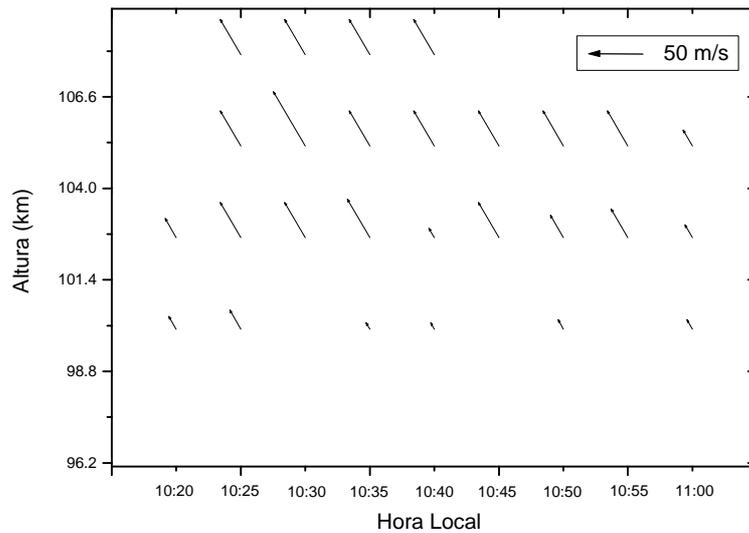


Fig. 5.10 – Mapa vetorial das componentes das derivas das irregularidades, na direção do feixe do radar, nos horários das 10 h e 20 min às 11 h, para o dia 31 de agosto, obtido pela análise dos gráficos de distribuição de frequência para o feixe oblíquo.

#### 5.4.2 A Redução da Altura do Eletrojato Próximo ao Meio-Dia

A geometria entre os campos geomagnético e elétrico, que ocorrem na região equatorial, proporciona alguns eventos ionosféricos típicos do equador geomagnético. A fonte de plasma e a anomalia equatorial são alguns exemplos. A deriva ascendente de plasma ionosférico ocorre sobre o equador geomagnético torna-se um tipo de chafariz que joga o plasma para cima, o qual vai cair acumulando-se a aproximadamente  $\pm 15^\circ$  em torno do equador. Com isso, o perfil de densidade de plasma varia ao longo dos meridianos que cruzam o equador, gerando a anomalia equatorial.

A deriva e a anomalia equatorial são fenômenos, principalmente do lado iluminado. Porém, um aumento da deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  que ocorre ao pôr do sol (pico pré-reverso) mantém a anomalia ativa por grande parte da noite. A geometria é proporcionada pelos campos elétricos do dínamo ionosférico, discutido no Capítulo 2, e exemplificado através da Figura 2.7.

Esse comportamento diurno varia muito pouco ao longo das estações do ano. Na Figura 5.11, Abdu (1993) apresenta o deslocamento vertical médio medido durante os períodos de equinócio, inverno e verão sobre Jicamarca (Fejer, 1991). Pela observação desses gráficos, podemos identificar uma clara variação diurna na deriva vertical, iniciando seu crescimento aproximadamente às 6 horas e diminuindo em torno das 18 horas, com um máximo aparecendo em torno das 12 horas (HL). O pico de velocidade da deriva, observado entre às 18 e 19 horas, está fora do horário de observação do eletrojato equatorial em todos os dias de estudos, mas é o responsável pela manutenção da anomalia equatorial nas horas noturnas.

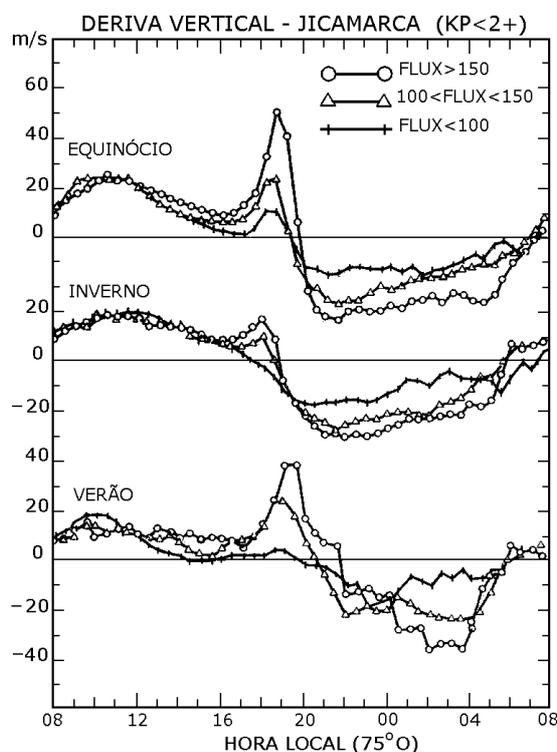


Fig. 5.11 – Deslocamento vertical médio medido durante os período de equinócio (março-abril e setembro-outubro), inverno (maio-agosto) e verão (novembro-fevereiro) sobre Jicamarca para três níveis de fluxo solar.  
 FONTE: Fejer et al. (1991, p. 13.902).

A Figura 5.12 apresenta o gráfico dos vetores fluxo de plasma, obtido através de modelo ionosfera-plasmasfera (*Sheffield University Plasmasphere*–

*Ionosphere Model* - SUPIM) para a região de Fortaleza, no qual podemos ratificar a presença da deriva ascendente como fonte de plasma.

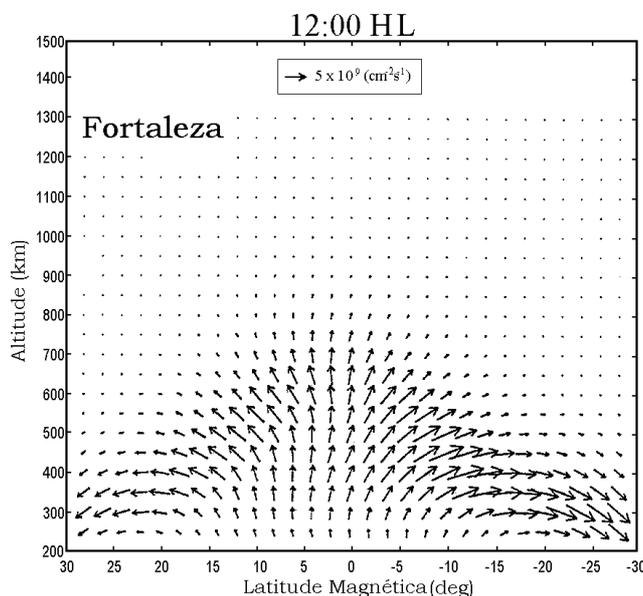


Fig. 5.12 – Vetores fluxo de plasma às 1200 HL, obtidos através do modelo SUPIM para a região de Fortaleza. Os vetores são plotados em escala linear com o menor vetor tendo comprimento zero, correspondendo a fluxos de plasma menores que  $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  e sendo positivo na direção norte.  
FONTE: Balan et al. (1997, p. 2.049).

Entretanto, apesar de os fenômenos mencionado acima indicarem que poderíamos esperar uma elevação do eletrojato, estes são observados nas alturas da camada F (150-400 km), e o que observamos no dia 31 de agosto de 1998 foi a redução da altura do eletrojato (Figura 5.7, 5.14) que está localizado à aproximadamente entre 100-105 km.

Kudeki e Fawcett (1993) conduziram, em agosto de 1992 e janeiro/fevereiro de 93, observações de radar para o estudo da parte superior da região E (150 km de altitude), sobre *Jicamarca Radio Observatory*, próximo ao equador magnético. Eles operaram um radar emitindo sinal pulsado de 50 MHz durante os horários diurnos. Em seus estudos foi observado um decréscimo regular pela parte da manhã e uma aparente ascensão pela parte da tarde na altura observada das irregularidades ionosféricas, em todos os mapas de variação

temporal de intensidade de sinal recebido. A Figura 5.13 apresenta: (a) o sinal retroespalhado, detectado em 6 de Janeiro de 1993, versus tempo e amplitude; (b) a velocidade Doppler, versus tempo e amplitude; (c) a média da velocidade Doppler; e (d) as variações na componente **H** do campo geomagnético, obtidas na estação de Ancor (11,74° N; 76,9 ° O).

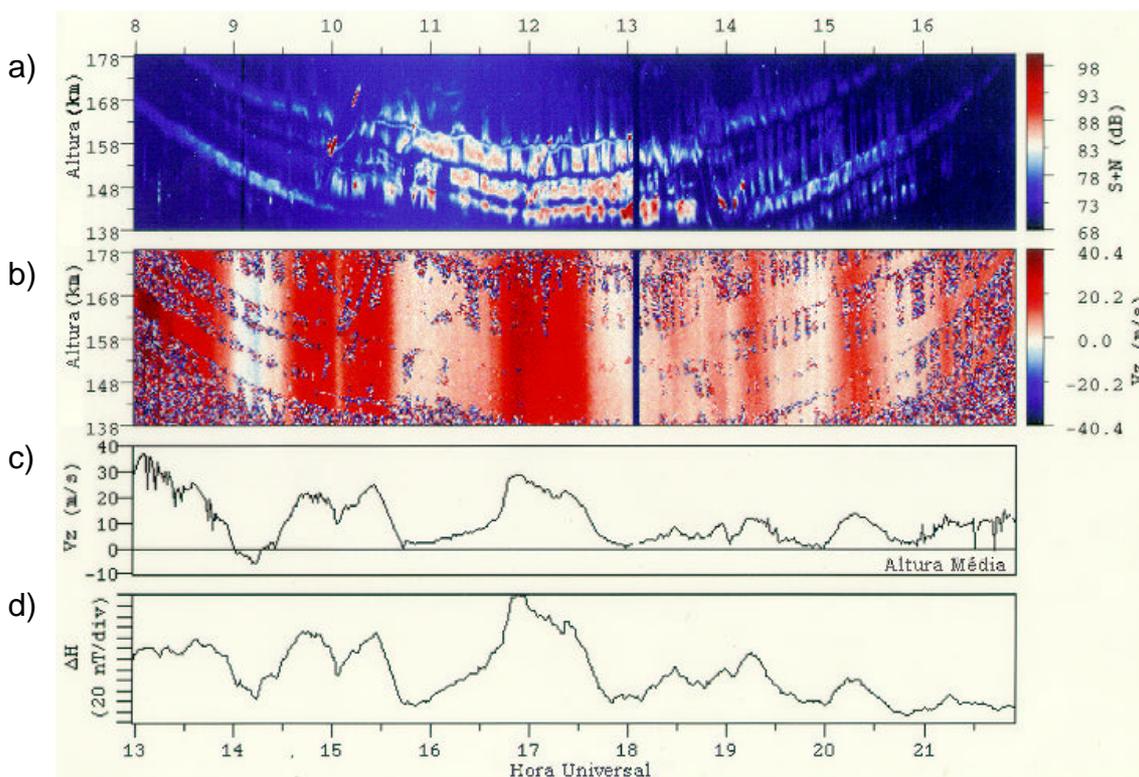


Fig. 5.13 – (a) Sinal retroespalhado, detectado em 6 de janeiro de 1993, versus tempo e amplitude; (b) Velocidade Doppler, versus tempo e amplitude; (c) Média da velocidade Doppler; e (d) Variações na componente **H** do campo geomagnético, obtidas na estação de Ancor.

FONTE: Kudeki e Fawcett (1993, p. 1.980).

Uma vez que Kudeki e Fawcett (1993) não encontraram nenhuma referência na literatura para qualquer tendência de deslocamento vertical nos ecos obtido da parte superior da região E, eles atribuíram a presença dessa característica à variação do ângulo de zênite solar. Durante os horário em que o ângulo de zênite é mínimo, a ionização fotoquímica intensifica-se e a altitude de penetração de partículas ionizantes ocorre até altitudes mais baixas. Dessa

forma, o perfil de distribuição vertical de plasma possivelmente variou de acordo com o ângulo de zênite solar.

Portanto, podemos concluir que a redução na altura do eletrojato próximo ao meio-dia do dia 31 de agosto de 1998, poderá ser atribuída à intensificação da ionização fotoquímica e à redução na altitude do pico de ionização exatamente no horário em torno das 12 horas. Esta intensificação provoca a redução na altura da densidade eletrônica do plasma ionosférico relacionada com a máxima condutividade e, por conseqüência, a corrente do eletrojato equatorial poderá ser observada em alturas mais baixas.

#### 5.4.3 O Aparecimento do Eletrojato Somente Durante Três Períodos Específicos do Dia 31 de agosto

Na Figura 5.14, apresentamos o mapa de variação temporal da intensidade de sinal recebido pelo radar ionosférico, utilizando feixe oblíquo, no dia 31 de agosto de 1998.

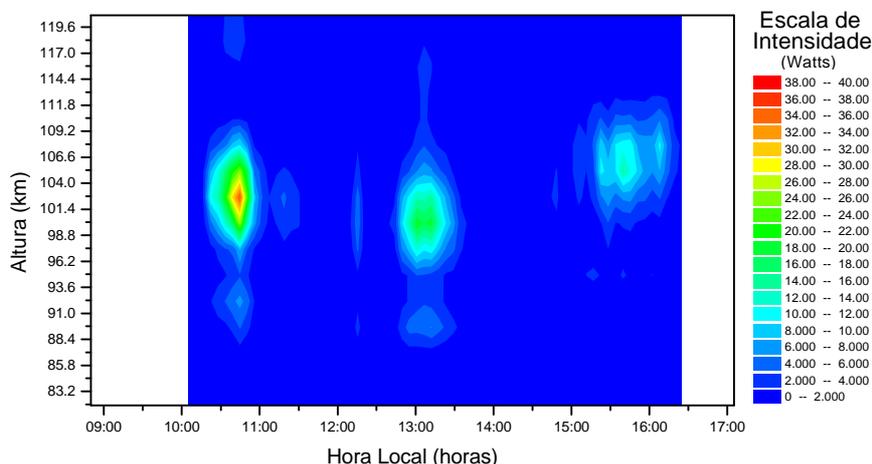


Fig. 5.14 – Mapa de variação temporal da intensidade de sinal recebido pelo radar ionosférico, utilizando feixe oblíquo, no dia 31 de agosto de 1998.

Em mapas como o apresentado acima, em condições de dia calmo, é esperado que o eletrojato esteja a uma altura em torno de 105 km, durante o período do

dia que vai desde, aproximadamente, às 8 horas até em torno das 17 horas. Durante tempestades magnéticas ou nos primeiros dias da fase de recuperação de uma tempestade é esperado que o eletrojato não apareça, ou apareça muito enfraquecido (Abdu et al., 1997).

Devemos lembrar que nesse dia o índice Dst estava indicando um distúrbio geomagnético crescente. Em geral, durante tempestades magnéticas, mesmo que moderadas, temos o desaparecimento total do eletrojato devido à configuração dos campos do dínamo responsável pelo eletrojato equatorial ser sobreposta a uma série de campos oriundos dos distúrbios magnéticos, os quais penetraram para a ionosfera equatorial através da região auroral. No entanto, podemos notar que em três horários específicos, por um determinado período, ocorreu um aparecimento do eletrojato com uma relativa intensidade.

Gonzales et al. (1979) investigaram possíveis fontes de perturbação do campo elétrico equatorial e concluíram que podem ocorrer perturbações devido a: (a) ventos neutros; (b) correntes alinhadas ao campo geomagnético durante subtempestades magnéticas e (c) penetração direta de campos plasmasférico e magnetosférico para a ionosfera equatorial.

Recentemente Abdu et al. (1997) apontaram que associado com distúrbios magnetosféricos ocorrem fenômenos de latitude equatoriais conhecidos como: (1) campos elétricos transientes associados com começo súbito de tempestades; (2) campos elétricos de vida curta (~2 horas) que ocorrem nas fases de desenvolvimento e de recuperação de subtempestades e (3) campos elétricos persistentes, durando várias horas, provenientes de distúrbios no dínamo (*Disturbance Dynamo* - DD) ionosférico. Uma constatação importante no seu trabalho é que os campos elétricos do tipo (3) ocorrem com um atraso de várias horas em relação aos eventos de alta latitude, ao passo que os campos elétricos dos tipos (1) e (2) ocorrem quase que ao mesmo tempo que

os eventos de alta latitude e, portanto, são chamados de campos de penetração imediata (*Prompt Penetration - PP*).

Outro fator importante é a condutividade elétrica na região E equatorial. Como ela apresenta valores bastante elevados, a ionosfera desta região é muito sensível a estes efeitos provocados por distúrbios polares devido à interação vento solar-magnetosfera (Rastogi, s/d). Gonzales et al. (1979) já apontaram evidências através de estudos com magnetômetros indicando que as ionosferas equatorial e polar ficam fortemente acopladas durante períodos magneticamente ativos. Abdu et al. (1998) concluíram de seus estudos, que a ocorrência coerente de flutuações magnéticas em altas latitudes e no equador, implica que campos elétricos magnetosféricos penetram na ionosfera equatorial através da ionosfera polar, durante o período iluminado pelo Sol. Esta penetração dos campos dá-se quase que instantaneamente, dirigida por correntes Pedersen ionosféricas responsáveis pelas flutuações do tipo DP 2 e amplificados pelo efeito Cowling.

Flutuações geomagnéticas do tipo DP 2 são caracterizadas por variações quase periódicas com escala de tempo que vão de aproximadamente 30 minutos até várias horas (Sastri et al., 1993), e que ocorrem coerentemente em altas latitudes e no equador durante o período iluminado. Flutuações DP 2 se desenvolvem durante a fase de crescimento de uma tempestade e persistem durante a fase de expansão.

Como nossa análise envolve o estudo da atividade na zona auroral, é necessário escolhermos também um índice que maximize a contribuição do eletrojato auroral para relacionarmos com o evento observado. Neste caso, o índice mais adequado é o *Auroral Electrojet (AE)*, o qual é construído usando somente a componente **H** do campo geomagnético. Ele é composto sobrepondo os magnetogramas das estações de medição próximas aos pólos

e tomando a diferença entre os valores máximos positivos e negativos da intensidade da componente para cada determinado intervalo de tempo, independente de qual estação pertençam estes pontos. A amplitude de todos os valores máximos positivos da componente **H**, independente das estações que mediram esses máximos, é usualmente chamada *AU*. Analogamente, a amplitude de todos os valores máximos negativos da componente **H**, independente das estações que mediram esses máximo, é usualmente chamada *AL*.

Fisicamente, *AU* poderia ser representado pela máxima magnitude gerada por uma perturbação num eletrojato auroral dirigido para leste. Usualmente, esse tipo é mais pronunciado no setor do meio-dia. Similarmente, *AL* representa a máxima perturbação magnética gerada por um eletrojato dirigido para oeste, e esse tipo tende a ocorrer mais intensamente durante os períodos da noite e manhã. Os eletrojatos para leste e oeste podem variar independentemente (Rostoker, 1972), significando que os índices *AU* e *AL* podem ser considerados separadamente. Portanto, o índice *AE* poderia ser considerando como a diferença entre os envelopes superior e inferior ( $AE = AU - AL$ ) da família de magnetogramas, a cada instante.

Na Figura 5.15, apresentamos: o índice Dst horários, durante a aquisição de dados pelo radar; o valor da componente **H** do campo geomagnético medida com magnetômetro fluxgate em São Luís; o mapa de variação temporal de intensidade versus altura; e os índices aurorais *AU* e *AL*, com resolução de 2,5 min, durante a aquisição de dados pelo radar, para o dia 31 de agosto.

Nessa Figura, podemos observar que a medida que o índice Dst está decaindo, a intensidade com que o eletrojato aparece está diminuindo. Isto indica que está ocorrendo uma dificuldade para que as condições de campos que formam o eletrojato sejam estabelecidas. Podemos verificar também que, durante a

operação do radar, há um acréscimo na componente **H** do campo medido pelo magnetômetro de São Luís e o aparecimento de máximos no índice auroral *AU*, aproximadamente em concordância com os horários onde verificamos a presença do eletrojato. Um estudo mais detalhado desse evento está em andamento.

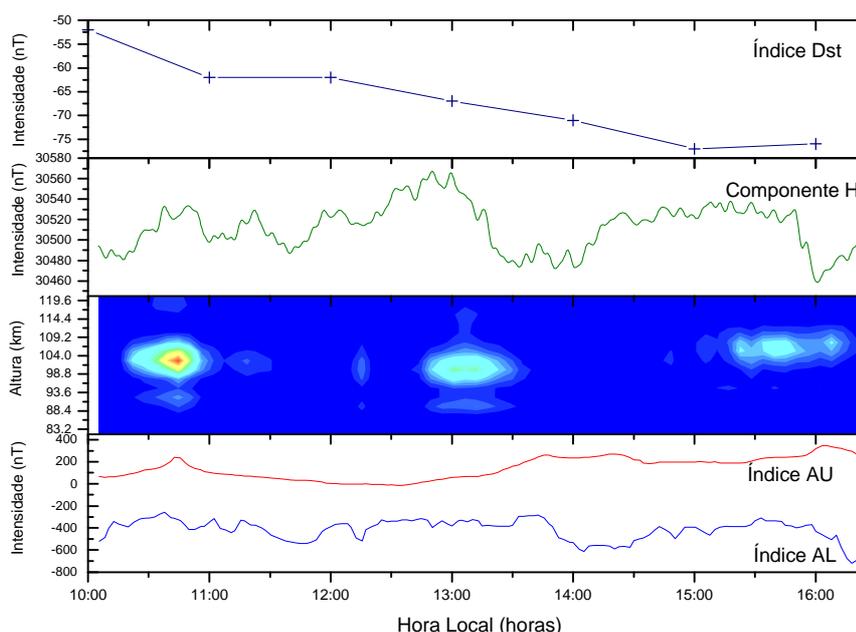


Fig. 5.15 – De cima para baixo: índice Dst horários durante a aquisição de dados pelo radar; o valor da componente horizontal do campo geomagnético medida com magnetômetro fluxgate; o mapa de variação temporal da intensidade de sinal recebido pelo radar ionosférico; e os índices aurorais *AU* e *AL* para o dia 31 de agosto de 1998.

O acréscimo na componente **H** do campo geomagnético, provavelmente é devido a campos magnéticos induzidos provocados por campos elétricos ionosférico na direção leste. E os máximos apresentados no índice *AU* indicam que está ocorrendo uma intensificação de campos elétricos no eletrojato auroral dirigido para leste.

Isso nos leva a concluir que os distúrbios magnéticos que estavam ocorrendo, caracterizados pelo índice Dst (Figura 5.3), provocaram campos elétricos para

direção leste na região auroral e se propagaram para a região equatorial através de campos elétricos transientes associados com o súbito distúrbio. A Figura 5.16 apresenta os valores da componente **H** do campo geomagnético, medidos por magnetômetros das estações de Valentia (51,9° N; 10,2° O) e São Luís (2,4° S; 44,4° O). Observando estes gráficos, verificamos que a mesma característica de acréscimo na componentes **H**, nos horários de aparecimento do eletrojato, está ocorrendo nas duas estações simultaneamente (correlação = 0,63382). Com isto, reforçamos a idéia de que campos elétricos gerados na região auroral estão sendo propagados quase que simultaneamente para a região equatorial.

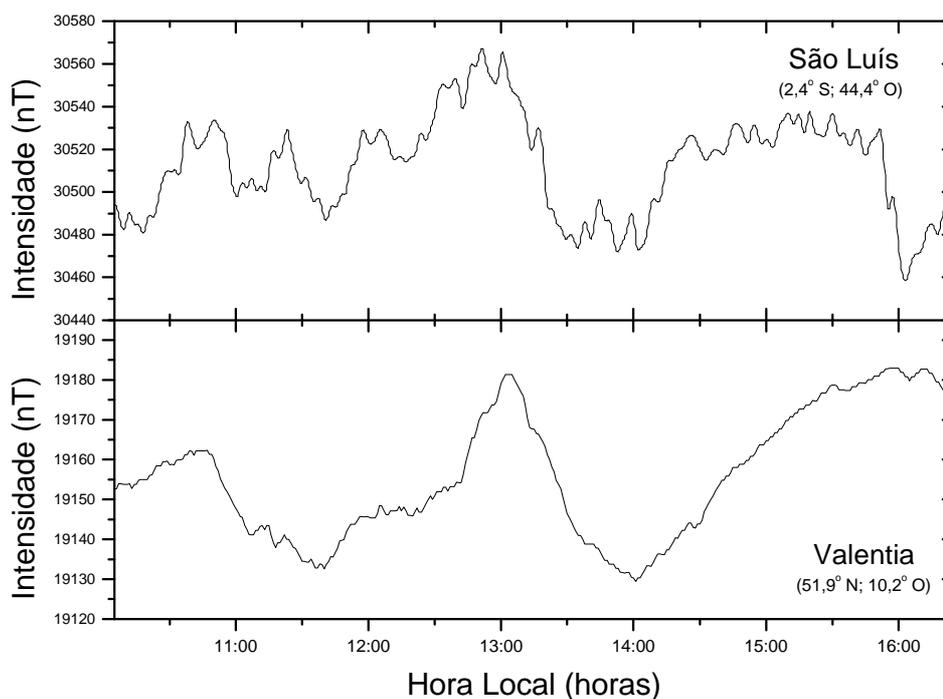


Fig. 5.16 – Variação da componente horizontal do campo geomagnético, medida com magnetômetro das estações de Valentia (51,9° N; 10,2° O) e São Luís (2,4° S; 44,4° O).

FONTE: Adaptada de NOAA.NGDC, 1998.

De acordo com o que foi exposto nesta seção e dos estudos de Gonzales et al. (1979), Sastri et al. (1993), Abdu et al. (1997) e Abdu et al. (1998), acredita-se

que esse campos elétricos dirigidos para leste provavelmente propagaram-se até regiões equatoriais através de flutuações geomagnéticas do tipo DP 2, e foram amplificados na região equatorial pelo efeito Cowling. Isso é justificável, se observarmos que a duração do aparecimento do eletrojato nesse dia é aproximadamente o período de duração desse tipo de pulsação. Portanto, com a propagação desta perturbação pode ter sido restabelecida a condição de campos elétricos necessária para a formação de eletrojato nesse três horários específicos.



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

A complexidade do sistema de oito transmissores utilizado no radar ionosférico de São Luís do Maranhão gerou a necessidade de um controle mais eficaz das fases dos transmissores. Assim, concebemos um sistema de monitoramento e controle automático das fases de cada um dos oito transmissores do radar. Esse sistema foi utilizado, como protótipo, na última campanha de agosto de 1998, e já conta sua versão final em fase de acabamento, com modificações e modernizações incorporadas.

Durante os seus testes, a unidade controladora detectou todas as diferenças de fases introduzidas, e alterou com sucesso a fase de referência, compensando essas diferenças. Alguns circuitos apresentaram um desempenho acima do esperado. O circuito amplificador de sinal, na saída de cada canal da unidade, ofereceu um ganho de 35 dB quando necessitávamos apenas 15 dB. Assim, ficou disponível um ganho extra que pode ser utilizado sempre que necessário. O circuito amplificador com filtro passa baixa mostrou desempenho em torno de 3% acima do esperado.

Graças à utilização desse sistema, e em conjunto com os esforços de toda a equipe para realizar as modificações necessárias nos circuitos do radar, obtivemos êxito na campanha de operação do radar, realizada no período de 07 a 31 de agosto de 1998. Operamos os sistemas do radar durante um período suficiente para proporcionar os primeiros resultados de pesquisa ionosférica realizada com radar de espalhamento coerente no Brasil.

Durante a campanha, coletamos dados durante uma semana para o estudo do eletrojato equatorial, com resolução temporal de 6 segundos entre dados do mesmo conjunto. Com o aparecimento de fenômenos como o do dia 31 de

agosto, mostrou-se muito importante termos uma grande base de dados, pois foi descartada a hipótese de haver qualquer tipo de problema nos dados, pelo fato da estabilidade das fases ter sido garantida, e por optarmos pela média entre os cinco melhores dados do mesmo conjunto para consolidação do resultado.

No dia 31 de agosto, o eletrojato equatorial apareceu somente em três horários determinados durante o período de operação do radar. Além disso, foram observados o efeito Doppler, devido à deriva das irregularidades ionosféricas em relação ao radar, e a redução na altura do eletrojato equatorial próxima ao meio-dia local. Nesse dia, tivemos também um aumento no valor do índice Dst, indicando que um distúrbio magnético estava ocorrendo. Para determinarmos o efeito Doppler foi utilizada a técnica da transformada integral de Fourier. O ajuste da curva de distribuição de frequência foi feito utilizando o processo de suavização *FFT Filter*, o qual mostrou-se suficiente para o nosso objetivo.

O deslocamento Doppler de  $-3,4$  Hz observado às 10 h 45 min do dia 31 de agosto representa uma velocidade de deriva das irregularidades do eletrojato de  $10,2$  m/s na direção oeste, para a altura de  $102,6$  km. Uma possível redução na altura do eletrojato próximo ao meio-dia poderia ser atribuída à intensificação da ionização fotoquímica e à redução na altitude do pico de ionização exatamente no horário em torno das 12 horas. Campos elétricos dirigidos para leste provavelmente propagaram-se até as regiões equatoriais através de flutuações geomagnéticas do tipo DP 2, e foram amplificados na região equatorial pelo efeito Cowling. A propagação dessa perturbação pode ter restabelecido a condição de campos elétricos necessária para a formação de eletrojato nos três horários específicos.

Para a seqüência deste trabalho, sugerimos a continuidade da análise dos dados adquiridos durante a última campanha, para ratificação dos efeitos

observados e estudos de outras características de irregularidades do eletrojato. Também sugerimos promover estudos das bolhas de plasma, através das irregularidades da região F, em especial no período de máxima atividade solar (1999–2002), devido a sua grande interferência nas telecomunicações.



## Referências Bibliográficas

- Abdu, M. A. *Equatorial spread F and ionosphere – thermosphere system: a review*. **Trends in Geophysical Research**, n. 2, p. 193-209, 1993.
- Abdu, M. A.; Batista, I. S.; Bittencourt, J. A. *Some characteristics of spread F at the magnetic equatorial station Fortaleza*. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A8, p. 6836-6842, Ago. 1981.
- Abdu, M. A.; Batista, I. S.; Sobral, J. H. A. *A new aspect of magnetic declination control of equatorial spread F and F region dynamo* **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. A10, p. 14897-14904, Oct. 1992.
- Abdu, M. A.; Medeiros, R. T.; Sobral, J. H. A.; Bittencourt, J. A. *Spread F plasma bubble vertical rise velocities determined from spaced ionosonde observations*. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, n. A11, p. 9197-9204, Dec. 1983.
- Abdu, M. A.; Sastri, J. H.; MacDougall, J.; Batista, I. S.; Sobral, J. H. A. *Equatorial disturbance dynamo electric field longitudinal structure and spread F: a case study from GUARA/EITS campaigns*. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 13, p. 1707-1710, July 1997.
- Abdu, M. A.; Sastri, J. H.; Luhr, H.; Tachihara, H.; Kitamura, T.; Trivedi, N. B.; Sobral, J. H. A. *DP 2 electric field fluctuations in the dusk-time dip equatorial ionosphere*. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 9, p. 1511-1514, May 1998.

- Akasofu, S. I.; Chapman, S. ***Solar–Terrestrial physics***. Oxford: Oxford University Press, 1972.
- Balan, N.; Bailey, G. J.; Abdu, M. A.; Oyama, K. I.; Richards, P. G.; MacDougall, J.; Batista, I. S. *Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F3 layer*. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A2, p. 2047-2056, Feb. 1997.
- Balsley, B. B.; Haerendel, G.; Greenwald, R. A. *Equatorial spread F: recent observations and a new interpretation*. **Journal of Geophysical Research**, v. 77, n. A28, p. 5625-56028, Oct. 1972.
- Batista, I. S.; Abdu, M. A.; Bittencourt, J. A. *Equatorial F region vertical plasma drifts: seasonal and longitudinal asymmetries in the american sector*. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. A11, p. 12055-12064, Nov. 1986.
- Batista, I. S.; Medeiros, R. T.; Abdu, M. A.; Sousa, J. R.; Bailey, G. J.; Paula, E. R. *Equatorial ionospheric vertical plasma drifts model over the Brazilian region*. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. A5, p. 10887-10892, May 1996.
- Bergland, G. D. *A guided tour of the fast Fourier transform*. **IEEE Spectrum**, v. 6, p. 41-52, 1969.
- Booker, H. G.; Wells, H. W. *Scattering of radio waves in the F region of ionosphere*. **Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity**, n. 43, p.249, 1938.

Bowles, K. L.; Cohen, R. *A study of radio wave scattering from sporadic E near the magnetic equator.* In: Smith, E. K. e Matsushita, S. ed., **Ionospheric sporadic E**, London: Pergamon Press, 1962.

Bowles, K. L.; Cohen, R.; Ochs, G. R.; Balsley, B. B. Radio echoes from field-aligned ionization above the magnetic equator and their resemblance to auroral echoes. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. A6, p. 1853-1855, June 1960.

Budden, K. G. **Radio waves in the ionosphere.** Cambridge: Cambridge University Press, 1966.

Chapman, S.; Bartels, J. **Geomagnetism.** London: Oxford University Press, 1940. v. 2.

Cochran, T. W.; Cooley, J. W.; Favin, D. L.; Helms, H. D.; Kaenel, R. A.; Lang, W. W.; Maling Jr., G. C.; Nelson, D. E.; Rader, C. M.; Welch, P. D. *What is the fast Fourier transform?* **IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics**, v. AU-15, p. 45-55, 1967.

Cooley, J. W.; Tukey, J. W. *An algorithm for the machine calculation of complex of complex Fourier series.* **Mathematics of Computation:** The American Mathematical Society, v. 19, p. 297-301, 1969.

Cragin, B. L.; Valladares, C. E.; Hanson, W. B.; McClure, J. P. *Bottomside sinusoidal irregularities in the equatorial F region: cross-correlation and spectral-analysis.* **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. A2, p. 1721-1734, Feb. 1985.

- Denardini, C. M.; Abdu, M. A.; Sobral, J. H. A.; Janardhanan, K. V.; Vasudevanpillai, M. V. *VHF Ionospheric Radar for Studying the Electrodynamics of Equatorial Electrojet in Brazil*. In: **Latin–American Conference on Space Geophysics**, 5., San José, Costa Rica, Nov. 1998, San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 1998. p. 60. Resumo.
- Farley, D. T.; Balsley, B. B.; Woodman, R. F.; McClure, J. P. *Equatorial spread F: implications of VHF radar observations*. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. A34, p. 7199-7216, Dec. 1970.
- Farley, D. T.; Fejer, B. G.; Balsley, B. B. *Radar observations of two-dimensional turbulence in the Equatorial Electrojet, Pt. 3, nighttime observations of type-1 waves*. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, n. A12, p. 5625-5623, Dec. 1978.
- Fejer, B. G. *Low latitude electrodynamic plasma drifts: a review*. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 53, n. 8, p. 677-693, Aug. 1991.
- Fejer, B. G.; Balsley, B. B.; Woodman, R. F. *Radar observations of two-dimensional turbulence in the Equatorial Electrojet, Pt. 3*. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, n. A1, p. 130-134, Jan. 1976.
- Fejer, B. G.; Paula, E. R.; Gonzales, S. A.; Woodman, R. F. *Average vertical and zonal F region plasma drift over Jicamarca*. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. A8, p. 13901-13906, Aug. 1991.
- Fejer, B. G.; Paula, E. R.; Scherliess, L.; Batista, I. S. *Incoherent scatter radar, ionosonde, and satellite measurements of equatorial F region vertical plasma drifts in the evening sector*. **Journal of Geophysical Research**, v. 23, n. A14, p. 1733-1736, July 1996.

- Forbes, J. M. *The equatorial electrojet*. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 19, n. 3, p. 469-504, Aug. 1981.
- Gill, T. P. *The Doppler effect*. London: Academic Press, 1965.
- Gonzales, S. A.; Kelley, M. C.; Fejer, B. G.; Vickrey, J. F.; Woodman, R. F. *Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions 2. Implications of simultaneous auroral and equatorial measurements*. **Journal of Geophysics Research**, v. 84, n. A10, p. 5803-5812, Oct. 1979.
- Gordon, W. E. *Incoherent scattering of radio waves by free electrons with applications to space exploration by radar*. **Proceeding of the IRE**, v. 46, n. 11, p. 1824-1829, 1958.
- Hargreaves, J. K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- Haykin, S. *An introduction to analog and digital communications*. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- Heelis, R. A.; Kendall, P. C.; Moffett, R. J.; Windle, D. W.; Rishbeth, H. *Electrical coupling of the E and F regions and its effect on F region drifts and winds*. **Planetary and Space Science**, v. 22, p. 725-733, 1974.
- Institut Pierre Simon Laplace.Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaire (IPSL.CETP). **Homepage of ISGI**. [online]  
<<http://www.cetp.ipsl.fr/~isgi/homepag1.htm>> Oct. 1998.
- Janardhanan, K. V. *A coherent VHF backscatter radar for INPE*. São José dos Campos: INPE, 1983. (INPE-2808-NTI/180).

Kane, R. P.; Trivedi, N. B. *Equatorial electrojet movements at Huancayo and Eusébio (Fortaleza) on selected quiet days*. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 37, n. 1, 1985.

Kane, R. P.; Trivedi, N. B. *Comparison of equatorial electrojet characteristics at Huancayo and Eusébio (Fortaleza) in the south american region*. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 44, n. 9, p. 785-792, May. 1982.

Kelley, M. C. ***The Earth's ionosphere***. San Diego: Academic Press, 1989.

Kelley, M. C.; Larsen, M. F.; LaHoz, C. A.; McClure, J. P. *Gravity wave initiation of equatorial spread f: a case study*. **Journal of Geophysics Research**, v. 86, n. A11, p. 9087-9100, Out. 1981.

Kirchhoff, V. W. J. H. ***Introdução à geofísica espacial***. São Paulo: Nova Stella, EDUSP, 1991.

Kivelson, M. G.; Russel, C. T. ed. ***Introduction to space physics***. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

Kudeki, E. ***Plasma turbulence in the equatorial electrojet***. Cornell. 186p. Tese (Doutorado) – Cornell University, 1983.

Kudeki, E; Fawcett, C. D. *High resolution observations of 150 km echoes at Jicamarca*. **Geophysical Research Letters**, v. 20, n. 18, p. 1987-1990, Sept. 1993.

Lindzen, R. S.; Chapman, S. *Atmospheric tides*. **Space Science Review**, v. 10, n. 3, 1969.

- Maeda, K.; Kato, S. *Electrodynamics of the ionosphere*. **Space Science Review**, v. 5, n. 57, 1966.
- McClure, J. P.; Hanson, W. B. *A catalog of ionospheric F region irregularities behavior based on OGO 6 retarding potential analysis data*. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. A31, p. 7431-7440, Nov. 1973.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. National Geophysical Data Center (NOAA.NGDC). **Geomagnetic Observatory Data Sampled at One Minute and Hourly Rates On-Line at NGDC**. [online]  
<[http://spidr.ngdc.noaa.gov:8080/production/html/GEOMAG/geo\\_search\\_frames.html](http://spidr.ngdc.noaa.gov:8080/production/html/GEOMAG/geo_search_frames.html)> Oct. 1998.
- Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- Rastogi, R. G. **Critical problems of equatorial electrojet**. Ahmedabad, India, sem data. Palestra realizada no Physical Research Laboratory.
- Reddy, C. A. *The equatorial electrojet*. **Pure and Applied Geophysics**, v. 131, n. 3, p. 486-508, 1989.
- Reinisch, W. B. *New Techniques in ground-based ionospheric sounding and studies*. **Radio Science**, v. 21, n. 3, p. 331-341, May-June 1986.
- Reinisch, W. B.; Bibl, K.; Kitrosser, D. F.; Sales, G. S.; Tang, J. S.; Zhang, Z.; Bullett, J. W.; Ralls, J. *The digisonde 256 ionospheric sounder*. In: Liu, C. H. ed., **World ionosphere/thermosphere study**, Urbana, IL: SCOSTEP, 1989. v. 2, Cap. 13, p. 350-380.

- Rishbeth, H. *Dynamics of the equatorial F region*. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 39, p. 1159-1168, 1977.
- Rishbeth, H.; Garriott, O. K. *Introduction to ionospheric physics*. New York: Academic, 1969.
- Rostoker, G. *Geomagnetic indices*. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 10, n. 4, p. 935-950, Nov. 1972.
- Sastri, J. H.; Rao, J. V. S. V.; Ramesh, K. B. *Penetration of polar electric field to the nightside dip equator at times of geomagnetic sudden commencements*. **Journal of Geophysics Research**, v. 98, n. A10, p. 17517-17523, Oct. 1993.
- Scali, J. L.; Reinisch, B. W.; Kelley, M. C.; Miller, C. A.; Swartz, W. E.; Zhou, H.; Radicella, S. *Incoherent scatter radar and digisonde observations at tropical latitudes, including conjugate point studies*. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A4, p. 7357-7367, Apr. 1997.
- Skolnik, M. I. *Introduction to radar systems*. New York: McGraw Hill, 1962.
- Sobral, J. H. A.; Abdu, M. A. *Solar activity effects on equatorial plasma bubble zonal velocity and its latitude gradient as measured by airglow scanning photometers*. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 53, n. 8, p. 729-742, Aug. 1991.
- Sobral, J. H. A.; Abdu, M. A.; Sahai, Y. *Equatorial plasma bubble eastward velocity characteristics from scanning airglow photometer measurements over Cachoeira Paulista*. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 47, n. 8-10, p. 895-900, Aug. 1985.

Terman, F. E. *Electronic and Radio Engineering*. New York: McGraw-Hill, 1955.

United States Geological Survey (USGS). *DOD World Magnetic Field Charts*. [online] <<http://geomag.usgs.gov/dod.html>> Feb. 1998.

Valladares, C. E.; Hanson, W. B.; McClure, J. P.; Cragin, B. L. *Bottomside sinusoidal irregularities in the equatorial F region*. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, n. A10, p. 8025-8042, Oct. 1983.

Vestine, E. H. *The upper atmosphere and geomagnetism*. In: Ratcliffe, J. A. ed., **Physics of the upper atmosphere**, New York, 1960. Cap. 10.

Woodman, R. F. *Vertical drifts velocities and East–West electric fields at the magnetic equator* **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. A31, p. 6249-6259, Nov. 1970.

Woodman, R. F.; LaHoz, C. *Radar observations of F-region equatorial irregularities*. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, n. A31, p. 5447-5466, Nov. 1976.