



MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

VALDILEIDE FREIRE DE ARAUJO

TEMA DA DISSERTAÇÃO: TRANSMISSÃO DIGITAL EM HF

Niterói

2008

VALDILEIDE FREIRE DE ARAUJO

TRANSMISSÃO DIGITAL EM HF

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Comunicações Móveis.

Orientador: Mauro Soares de Assis, Notório Saber, UFF

Co – Orientador: Ângelo Antônio Caldeira Canavitsas, MSc., PETROBRAS

Niterói

2008

VALDILEIDE FREIRE DE ARAUJO

TRANSMISSÃO DIGITAL EM HF

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Comunicações Móveis.

Aprovada em agosto de 2008.

BANCA EXAMINADORA

Professor Mauro Soares de Assis, Notório Saber, Orientador
Universidade Federal Fluminense

Eng^o Ângelo Antônio C. Canavitsas, MSc., Co-Orientador
PETROBRAS

Engenheiro Dr. Firmiano Ramos Perlingeiro
PETROBRAS

Professora Dra. Leni Joaquim de Matos
Universidade Federal Fluminense

Niterói
2008

Ao meu marido, Alexandre Silvestre de Araujo, que incentiva e participa de todos os projetos a que me dedico; aos meus queridos pais, Adolfo Freire de Lima e Maria do Carmo de Lima, que me incentivaram ao aprendizado e proporcionaram minha formação; à minha família e aos meus amigos. Todos são o meu arrimo, meus amores e minha felicidade.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Mauro Soares de Assis e Eng^o Ângelo Antônio Caldeira Canavitsas, pelo empenho, disposição, colaboração e ensinamentos que contribuíram para a realização deste trabalho. Receber a orientação destes mestres foi um brinde de honra e privilégio.

Ao Dr. Firmiano Ramos Perlingeiro, pela preciosa contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Júlio César Dal Bello, Leni Joaquim de Matos, Edson Luiz Cataldo Ferreira, pelo acréscimo de conhecimento em disciplinas de grande importância para a formação de um mestre, pela receptividade e disponibilidade.

Ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo, pela colaboração, por meio do empréstimo de equipamentos HF que propiciaram a realização das medidas, destacando-se a dedicação do Sargento Pablo Pontes Arraes e de sua equipe: Alcindo Lima Filho, Luiz Carlos Silva do Vale e Felipe Peçanha Moreira.

Aos engenheiros do INMETRO Claiton Pereira Colvero e Vinícius Rangel Duarte Carneiro, pelas participações e contribuições fundamentais para a execução das medidas.

Aos membros do CPqD, pela assistência, presteza e esforços para a realização dos experimentos.

À minha amiga Ana Paula Guimarães Gama, pela colaboração na revisão gramatical deste trabalho.

Aos funcionários da UFF, em particular a Rafael M. Carvalho e Jussara Barcelos O. Espíndola, pela competência em suas tarefas e pela invariável simpatia.

Aos professores da Universidade Estácio de Sá, em especial aos professores Ricardo Edson Lima, Antônio Carlos Castañon Vieira e Jorge Bitencourt, que me incentivaram a fazer o Curso de Mestrado.

O mistério da vida me causa a mais forte emoção. É o sentimento que suscita a beleza e a verdade, cria a arte e a ciência.

EINSTEIN, 1981.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo aprofundar os conhecimentos sobre a propagação ionosférica, através de medições em campo, com a finalidade de aprimorar os procedimentos utilizados nos enlaces. É apresentada a formação da ionosfera, região por onde se propagam as ondas em HF, bem como a propagação na ionosfera, a predição do desempenho do sistema HF (com base na Recomendação UIT-R P.533-8) e as medições realizadas em campo. Comparam-se as predições de propagação em HF, disponíveis na Recomendação UIT-R P.533-8, com os resultados das medidas, e as análises dos dados coletados são ilustradas. O trabalho mostra que os equipamentos do sistema em HF são flexíveis, que se ajustam de acordo com o estado ionosférico, para a obtenção de comunicações robustas. A viabilidade das comunicações com transmissão de voz e dados com excelente qualidade é comprovada no meio de HF, que se confirma seguro e rentável para enlaces de longa distância.

Palavras-chave: Ionosfera, Transmissão Digital, HF.

ABSTRACT

The purpose of this work is to enrich knowledge about ionosphere propagation, through field made measurements, in order to improve usual link procedures. It presents the ionosphere formation – the HF wave propagation region – as well as wave propagation in the ionosphere, HF system performance prediction (based on UIT-R P.533-8 Recommendation) and field made measurements. The HF propagation predictions, available in UIT-R P.533-8 Recommendation, are compared to measurements results and the collected data analyses are showed. The work indicates that HF system equipments are flexible and adjustable themselves in accordance to ionospheric status, in order to achieve strengthen communications. HF communications viability with excellent quality of voice and data transmission is proved in HF channel, which presents itself as a reliable and profitable medium for long distance links.

Keywords: *Ionosphere, Digital Transmission, HF.*

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Radiação sobre as camadas ionosféricas e densidade eletrônica diurna,21
- Figura 2 – Ciclos Solares x Número de Manchas Solares de 1985 a 2007,22
- Figura 3 – A ionosfera e suas camadas durante o dia e à noite,23
- Figura 4 – Densidade eletrônica e frequência de colisão para latitudes médias,26
- Figura 5 – Refração em um meio estratificado em camadas,30
- Figura 6 – Percursos dos raios em função do ângulo de elevação,32
- Figura 7 – Percurso real TBR e percurso virtual TAR,33
- Figura 8 – Tipos de enlaces ionosféricos,34
- Figura 9 – Absorção ionosférica na camada D em um enlace entre Paris e Dakar,40
- Figura 10 – Bolhas Ionosféricas,42
- Figura 11 – Causas da propagação multipercurso,44
- Figura 12 – Local dos testes (vista aérea),67
- Figura 13 – Equipamentos utilizados,68
- Figura 14 – Espectro FFT *versus* tempo e frequência,71
- Figura 15 – Espectro FFT *versus* frequência e intensidade do sinal,71
- Figura 16 – Seqüência de tons CLOVER-2000,72
- Figura 17 – Relação tempo/frequência CLOVER-2000,73
- Figura 18 – Espectro de frequência CLOVER-2000,73
- Figura 19 – SNR *versus* taxa de dados da CLOVER-2000,79

- Figura 20 – Espectros dos sinais de modulação,80
- Figura 21 – Esquema da antena dipolo de banda larga,81
- Figura 22 – Potência direta e refletida medidas no dipolo,82
- Figura 23 – Antena dipolo - medição do espectro de 3 a 30 MHz,83
- Figura 24 – Janela do software PropWiz com resultado em gráfico,88
- Figura 25 – Janela de entrada de dados do *software* ITS-HF,89
- Figura 26 – Resultado em gráfico da predição de propagação ITS-HF,89
- Figura 27 – Resultado em tabela da predição de propagação ITS-HF,90
- Figura 28 – Ângulo de radiação, em graus, em julho de 2007 e SSN = 0,93
- Figura 29 – Intensidade de Campo, dBu, em julho de 2007 e SSN = 0,93
- Figura 30 – Gráfico da Frequência x UTC, 23 a 27 de julho de 2007, e SSN = 1,94
- Figura 31 – Nível médio do sinal,94
- Figura 32 – Comparação entre tamanhos de arquivos da taxa de transmissão,95
- Figura 33 – Quantidade de modulação durante a transmissão do arquivo de 1 kB,96
- Figura 34 – Quantidade de modulação durante a transmissão do arquivo de 2 kB,97
- Figura 35 – Quantidade de modulação durante a transmissão do arquivo de 10 kB,97
- Figura 36 – Frequência utilizada e qualidade de propagação em 25/07/2007,100
- Figura 37 – Frequência utilizada e qualidade de propagação em 26/07/2007,101
- Figura 38 – Frequência utilizada e qualidade de propagação em 27/07/2007,101
- Figura 39 – Taxa de transmissão de arquivo de 1 kB x qualidade de propagação,102
- Figura 40 – Taxa de transmissão de arquivo de 2 kB x qualidade de propagação,102
- Figura 41 – Taxa de transmissão de arquivo de 10 kB x qualidade de propagação,103
- Figura 42 – Comparação entre as MUF e as frequências utilizadas em campo,103
- Figura 43 – Comparação entre as MUF e as frequências utilizadas em 25/07/07,104
- Figura 44 – Comparação entre as MUF e as frequências utilizadas em 26/07/2007,105
- Figura 45 – Comparação entre as MUF e as frequências utilizadas em 27/07/2007,106

Figura 46 – Valores máximo e mínimo de F_a em função da frequência,116

Figura 47 – F_a em função de frequência,116

Figura 48 – Valores médios da potência de ruído produzido pelo homem,118

Figura 49 – Antena dipolo – medição do espectro de 3 a 30 MHz,129

Figura 50 – Antena dipolo – medição do espectro de 3 a 5 MHz,130

Figura 51 – Antena dipolo – medição do espectro de 5 a 7 MHz,130

Figura 52 – Antena dipolo – medição do espectro de 7 a 9 MHz,130

Figura 53 – Antena dipolo – medição do espectro de 9 a 11 MHz,131

Figura 54 – Antena dipolo – medição do espectro de 11 a 13 MHz,131

Figura 55 – Antena dipolo – medição do espectro de 13 a 15 MHz,131

Figura 56 – Antena dipolo – medição do espectro de 15 a 17 MHz,132

Figura 57 – Antena dipolo – medição do espectro de 17 a 19 MHz,132

Figura 58 – Antena dipolo – medição do espectro de 19 a 21 MHz,132

Figura 59 – Antena dipolo – medição do espectro de 21 a 23 MHz,133

Figura 60 – Antena dipolo – medição do espectro de 23 a 25 MHz,133

Figura 61 – Antena dipolo – medição do espectro de 25 a 27 MHz,133

Figura 62 – Antena dipolo – medição do espectro de 27 a 30 MHz,134

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Características gerais do canal ionosférico,43
- Tabela 2 – Resumo das características de desvanecimento na faixa de HF,46
- Tabela 3 – Alturas de reflexão dos percursos dos raios,57
- Tabela 4 – Entelamento da Camada E,58
- Tabela 5 – Absorção ionosférica e associação à girofrequência do elétron,61
- Tabela 6 – Frequências dos tons CLOVER 2000,70
- Tabela 7 – Modos de Modulação – CLOVER-2000,75
- Tabela 8 – Modo ARQ CLOVER - 2000 – *Timing* da camada de bloco de dados,78
- Tabela 9 – Avaliação da clareza e intensidade do sinal,84
- Tabela 10 – Dados coletados em campo e predição de propagação,86
- Tabela 11 – Quantidade de modulação na transmissão digital dos arquivos,98
- Tabela 12 – Quantidade do uso de **uma única modulação** na transmissão digital,99
- Tabela 13 – Valores das constantes c e d,119
- Tabela 14 – Valores de desvios decis do ruído produzido pelo homem,120
- Tabela 15 – Dados coletados em campo,135

LISTA DE SIGLAS

ALE – *Automatic Link Establishment*

AM – *Amplitude Modulation*

ARQ – *Automatic Repeat reQuest*

BPSM – *Binary Phase Shift Modulation*

CBC – Comissão Brasileira de Comunicações

CCIR – Comissão Consultiva Internacional

CLOVER – Nome de uma série ou classe de técnicas de modulação do MODEM

CPqD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações

CW – *Continuous Wave*

DTS – *Data Transmission System*

BER – *Bit Error Rate*

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo

ELF – *Extremely Low Frequency*

ESF – *Equatorial Spread*

FEC – *Forward Error Correction*

FED-STD – *Federal Standard*

FOT – Frequência Ótima de Trabalho

HF – *High Frequency*

HFBC – *High Frequency Broadcasting Conference*

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

LUF – *Lowest Usable Frequency*

MF – *Medium Frequency*

MIL-STD – *Military Standard*

MODEM – Modulador e Demodulador

MUF – *Maximum Usable Frequency*

PropWiz – *Propagation Wizard*

8PSM – *8-level Phase Shift Modulation*

8P2A – *8 pulse 8 phase 2 amplitude*

16P4A – *8 pulse 16 phase 2 amplitude*

SELCALL – *Selective Calling*

SSB – *Single Sideband*

SNR – *Signal-to-Noise Ratio*

SSN – *Sunspot Number*

QPSM – *Quad Phase Shift Modulation*

TRANSCALL – Sistema automático de escolha da melhor frequência em HF

UIT-R – União Internacional de Telecomunicações - Radiocomunicação

UTC – *Universal Time Co-ordinated*

UV – Ultravioleta

VHF – *Very High Frequency*

VLF – *Very Low Frequency*

WARC – *World Administrative Radio Conference*

WP – *Working Party*

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS	XII
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 HISTÓRICO	16
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO	18
1.3 ROTEIRO ADOTADO	19
2 ESTRUTURA FÍSICA DA IONOSFERA	20
2.1 FORMAÇÃO DOS ÍONS	20
2.2 PLASMA IONOSFÉRICO E ATIVIDADE SOLAR	22
2.3 CAMADAS DA IONOSFERA	23
2.3.1 Camada D.....	24
2.3.2 Camada E.....	24
2.3.3 Camada F.....	25
3 PROPAGAÇÃO NO MEIO ESTRATIFICADO	28
3.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS NA IONOSFERA	28
3.1.1 Reflexão em incidência oblíqua	29
3.1.2 Trajetórias dos raios	31
3.1.3 Altura virtual.....	32
3.1.4 Trajetórias na ionosfera e frequência crítica.....	34
3.2 VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA CRÍTICA	36
3.2.1 Dependência do ciclo solar.....	36
3.2.2 Variação diurna, sazonal e anual	37
3.3 MÁXIMA FREQUÊNCIA UTILIZÁVEL.....	37
3.4 MÍNIMA FREQUÊNCIA UTILIZÁVEL.....	38
3.5 ABSORÇÃO NA CAMADA D	39
3.6 CAMADA F ESPALHADA.....	40
3.7 CARACTERÍSTICAS DO SINAL RECEBIDO	42
3.7.1 Propagação multipercurso e dispersão temporal	43
3.7.2 Desvanecimento	45
3.7.3 Dispersão da frequência.....	46
3.7.4 Distorção do retardo	48
3.7.5 Janela de frequência e gerenciamento de frequência.....	48
3.7.5.1 Janela de frequência.....	48
3.7.5.2 Gerenciamento de frequência	50
4 PREDIÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA	51

4.1	RUÍDO.....	51
4.2	POTÊNCIA MÉDIA DISPONÍVEL NO RECEPTOR.....	53
4.3	INTENSIDADE DE CAMPO MÉDIA DA ONDA IONOSFÉRICA.....	54
4.3.1	<i>Ângulo de elevação</i>	54
4.3.2	<i>Intensidade de campo para percursos de até 7.000 km</i>	57
4.3.2.1	Modos considerados.....	57
4.3.2.2	Determinação da intensidade de campo.....	59
4.4	RELAÇÃO SINAL/RUÍDO PARA VÁRIAS PERCENTAGENS DE TEMPO.....	62
4.5	CONFIABILIDADE BÁSICA DO CIRCUITO EM SISTEMAS DIGITAIS.....	63
4.5.1	<i>Parâmetros do sistema</i>	63
4.5.2	<i>Retardo no tempo</i>	64
4.5.3	<i>Procedimento para a predição da confiabilidade</i>	64
5	MEDIÇÕES EM CAMPO.....	66
5.1	LOCAL DOS ENSAIOS.....	67
5.2	INFRA-ESTRUTURA PARA A REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES.....	67
5.3	SISTEMAS DO TRANSECTOR.....	68
5.4	MODEM.....	69
5.4.1	<i>Protocolo de estabelecimento de enlace do MODEM</i>	70
5.4.2	<i>Modulação dos Dados</i>	74
5.4.3	<i>Detecção e Correção de Erros</i>	76
5.4.4	<i>Protocolo ARQ</i>	76
5.5	SISTEMA IRRADIANTE.....	81
5.6	PROCEDIMENTOS DAS MEDIÇÕES.....	82
5.6.1	<i>Medição do nível de ruído no ambiente</i>	82
5.6.2	<i>Estabelecimento de enlaces HF</i>	83
5.6.3	<i>Transmissão de dados</i>	84
5.7	PREDIÇÃO DA PROPAGAÇÃO IONOSFÉRICA.....	87
5.8	ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS.....	94
6	CONCLUSÃO.....	107
7	REFERÊNCIAS.....	110
8	ANEXO A – RUÍDO RADIOELÉTRICO.....	112
8.1	INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS RADIOELÉTRICOS.....	112
8.1.1	<i>Fontes de ruído radioelétrico</i>	112
8.1.2	<i>Termos para a especificação da intensidade de ruído e inter-relação entre eles</i>	113
8.1.3	<i>Ruído produzido pelo homem</i>	117
8.1.4	<i>Ruído atmosférico provocado por descarga atmosférica</i>	120
9	ANEXO B – CÁLCULO DA MUF.....	121
10	ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS.....	126
10.1	TRANSECTOR HF MODELO TW 7000 COM ACESSÓRIOS E FONTE.....	126
10.2	MODEM 5300 PARA HF.....	127
10.3	ANALISADOR DE ESPECTRO ANRITSU.....	127
11	ANEXO D – ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS DO RUÍDO NO AMBIENTE.....	129
12	ANEXO E – TABELA DE DADOS COLETADOS.....	135

1 INTRODUÇÃO

As chamadas ondas celestes foram descobertas em 1901 e sua propagação foi estudada por vários cientistas, entre eles Guglielmo Marconi, Arthur Kennelly e Oliver Heaviside, que comprovaram a existência deste mecanismo de propagação. A região responsável por tal mecanismo é formada por várias camadas e, por suas características peculiares, ficou conhecida como ionosfera. A faixa de frequências adequada para a propagação ionosférica é a de Alta Frequência (*High Frequency* – HF). A partir de 1928, essa faixa tornou-se o principal meio de propagação a longa distância. Com o surgimento das comunicações por satélite, na década de 60, houve significativa redução nos estudos e nas pesquisas sobre transmissão em HF. Entretanto, recentemente, em função dos avanços tecnológicos e do reconhecimento de ser este um meio econômico e seguro, foi renovado o interesse na utilização da faixa de HF.

1.1 Histórico

A primeira constatação da propagação da onda celeste ocorreu em 12 de dezembro de 1901 pelo cientista Guglielmo Marconi. O fato ocorreu na cidade de Newfoundland (Canadá), onde Marconi recebeu uma mensagem originada em Poldhu na Cornualha (Inglaterra), a mais de 3.000 km de distância, após atravessar o Oceano Atlântico (MASLIN, 1987). Em 1902, Arthur Kennelly, na América, e Oliver Heaviside, na Inglaterra, postularam, independentemente, a existência de uma camada condutora localizada em uma região acima da atmosfera da Terra. Esses cientistas sugeriram que esta camada pudesse ser capaz de desviar as ondas de rádio, permitindo que tais ondas seguissem a curvatura da Terra. Nesse

mesmo ano, durante uma viagem no transatlântico americano Philadelphia, Marconi recebeu mensagens à distância de 1.000 km ao dia e 3.000 km à noite, fazendo, dessa forma, a primeira descoberta de que as condições de transmissão à noite poderiam ser bastante diferentes daquelas observadas durante o dia, (MASLIN, 1987).

Foi em 1916 que Marconi iniciou os experimentos em transmissões com ondas curtas na faixa de 2 a 30 MHz. Em 1922, com base em outras experiências na Europa, notou diferenças de comportamento do sinal na faixa de 5 a 10 MHz, em percursos distintos. Por exemplo, em Southwold (Inglaterra), a 175 km de Zandvoort (Holanda), a intensidade do sinal à noite era muito maior que durante o dia. Em Birmingham (Inglaterra), a 450 km de Zandvoort, a intensidade de sinal durante o dia era maior do que aquela observada em Southwold, enquanto que à noite não se recebia sinal algum. Embora Marconi não tenha reconhecido isto naquele tempo, tudo indicava que o sinal em Birmingham, durante o dia, era devido à propagação por onda celeste, enquanto que, no enlace de Zandvoort a Southwold prevalecia a onda terrestre.

A primeira evidência concreta da camada condutora proposta por Kennelly-Heaviside veio em 1925 quando Appleton e Barnett provaram a presença de ondas celestes comparando, simultaneamente, as intensidades de desvanecimento dos sinais recebidos em uma antena de quadro (*loop*) e em uma antena vertical. A existência de mais de uma camada foi anunciada. Como acreditavam que as camadas eram compostas de trocas de partículas elétricas, conhecidas como íons, a região tornou-se então conhecida como ionosfera.

Em 1926, Breit e Tuve (MASLIN, 1987) mostraram que um pulso de pequena duração, enviado de um transmissor, produzia algumas vezes, dois impulsos em vez de um, no receptor localizado a poucos quilômetros do transmissor. Chegou-se à óbvia conclusão de que o impulso que chegara primeiro fora causado pela onda direta percorrida ao longo da terra. Aquele que chegara mais tarde fora resultado de ondas indiretas ou ecos refletidos na ionosfera.

Em 1928 a faixa de HF foi estabelecida como o principal meio de propagação a longa distância. Pioneiros de rádio concentraram experimentos de longo alcance nesta faixa. Tais esforços trouxeram uma série contínua de refinamentos na tecnologia que, em troca, melhorou o nível de desempenho dos sistemas em HF.

O crescente uso das comunicações em HF levou à necessidade de aprimoramento dos equipamentos e à qualificação do pessoal técnico. Nas primeiras gerações de equipamentos o

controle de frequência de operação era efetuado manualmente. As chamadas de saída e resposta eram iniciadas pela estação do operador, que também controlava o tráfego existente, para não haver interferência. Indicava-se, então, a importância da coordenação de frequência e de tempo com outras estações na rede de trabalho, para que comunicações de qualidade satisfatória fossem obtidas.

Entre os anos 60 e 70, as comunicações por satélite emergiram como concorrentes dos sistemas em HF. Nesse período, os sistemas em HF perderam a posição de destaque que ocupavam no cenário das telecomunicações e houve significativa redução em pesquisa e desenvolvimento dos sistemas em HF.

1.2 Motivação e Objetivo

A vulnerabilidade do satélite foi reconhecida e, atualmente, estudos militares táticos e estratégicos estão sendo direcionados com vigor para o cenário de comunicações. Isto se deve ao fato de que atividades de controle e comando de comunicações requerem o uso combinado de diferentes tipos de enlace, um dos quais em HF. Os rádios em HF, projetados no período 1955-70, contudo, são considerados obsoletos. Algumas dessas unidades não cobrem integralmente o espectro de HF (2 a 30 MHz), com a operação limitada na parte inferior da faixa. Muitos desses rádios foram projetados para operar apenas em Banda Lateral Única (*Single Sideband - SSB*) com modulação em amplitude convencional (*AM - Amplitude Modulation*), nos modos de onda contínua (*CW - Continuous Wave*) ou FSK (*Frequency Shift Keying*), este na taxa de 75 *bits* por segundo. Tais equipamentos utilizavam osciladores de cristal, que não oferecem sintonização contínua, ao contrário dos aparelhos modernos, de alta precisão, que são sintetizados possibilitando incrementos de frequência de 100, 10 ou mesmo 1 Hz. Assim, o casamento entre as tecnologias de computação e comunicações constitui uma promessa significativa de melhoria para o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de HF.

Nesse cenário, o foco deste estudo concentra-se em aprofundar o conhecimento da propagação ionosférica, com a finalidade de aprimorar os procedimentos a serem utilizados nos enlaces atuais. Ênfase particular será dada à transmissão digital, uma vez que essa tecnologia representa a melhor solução para a propagação ionosférica. Logo, este trabalho

tem como objetivo: realizar medições de propagação ionosférica, avaliar os atuais sistemas HF, verificar como os equipamentos digitais contribuem para a melhoria do desempenho da transmissão e comparar os resultados das medidas com as previsões disponíveis na Recomendação da União Internacional de Telecomunicações – Radiocomunicações UIT–R P.533-8.

1.3 Roteiro Adotado

Inicia-se o estudo com a descrição da estrutura física da ionosfera, mostrando a origem da ionização, à qual tem a ação do sol como a contribuição predominante, assim como as camadas que compõem a ionosfera, com suas altitudes e características. Em seguida é apresentada a propagação em um meio estratificado, onde é descrita a refração das ondas nas várias camadas da ionosfera, as trajetórias dos raios ao partir de um transmissor fixo na Terra, o conceito de frequência crítica, MUF (*Maximum Usable Frequency*) e LUF (*Lowest Usable Frequency*) e as características do sinal recebido. A previsão do desempenho de enlaces HF segundo a Recomendação da UIT-R P.533-8 é descrita, sendo destacados o ruído, a potência média, a relação sinal-ruído e a confiabilidade de sistemas digitais. Finalmente, faz-se um relato sobre toda a infra-estrutura utilizada nas medições em campo, os procedimentos para a coleta de informação e os resultados obtidos das análises efetuadas.

2 ESTRUTURA FÍSICA DA IONOSFERA

A ionosfera é formada por íons positivos e elétrons livres, cuja maior fonte de ionização é o Sol. O objetivo deste capítulo é descrever os aspectos básicos da estrutura física da ionosfera, destacando os mecanismos responsáveis pela formação de íons e a estratificação em camadas, através das quais ocorre a propagação ionosférica.

2.1 Formação dos Íons

A ionosfera é composta por íons e elétrons livres, e está situada entre 60 km e 400 km de altitude. A fonte principal de produção de íons na alta atmosfera é o sol, através da radiação ultravioleta (UV), dos raios X e da emissão de partículas eletrizadas que insere grande quantidade de elétrons livres em seu meio. Outras fontes, de menor relevância, tais como rastros de meteoros e radiação de estrelas mais distantes, também contribuem para a formação da ionosfera.

A intensidade da radiação solar e a ionização eficiente dos gases neutros são as responsáveis pela variação da taxa de ionização no meio ionosférico. A radiação UV e raio X, ao percorrerem a atmosfera, são, progressivamente, absorvidos e a capacidade de ionização depende da extensão do percurso na atmosfera e, conseqüentemente, do ângulo zenital solar (χ). A maior taxa de ionização ocorre quando o sol está no alto ($\chi = 0$), mas a localização geográfica, a estação do ano e a hora do dia contribuem para a variação da densidade de ionização. As variações dos elétrons livres com a altitude provocam a estratificação da região ionosférica. A Figura 1 mostra uma visão geral da radiação que atinge cada camada

ionosférica, da densidade eletrônica diurna e das alturas onde cada faixa de frequência é refletida.

Os rastros de meteoros ionizados são produzidos por partículas pequenas (0,1 mg), de duração individual muito curta (poucos segundos) e em alturas de ,aproximadamente, 100 km (BOITHIAS, 1987). Considerando que a contribuição predominante para a formação de íons é o sol, as características da ionosfera variam principalmente com a atividade solar.

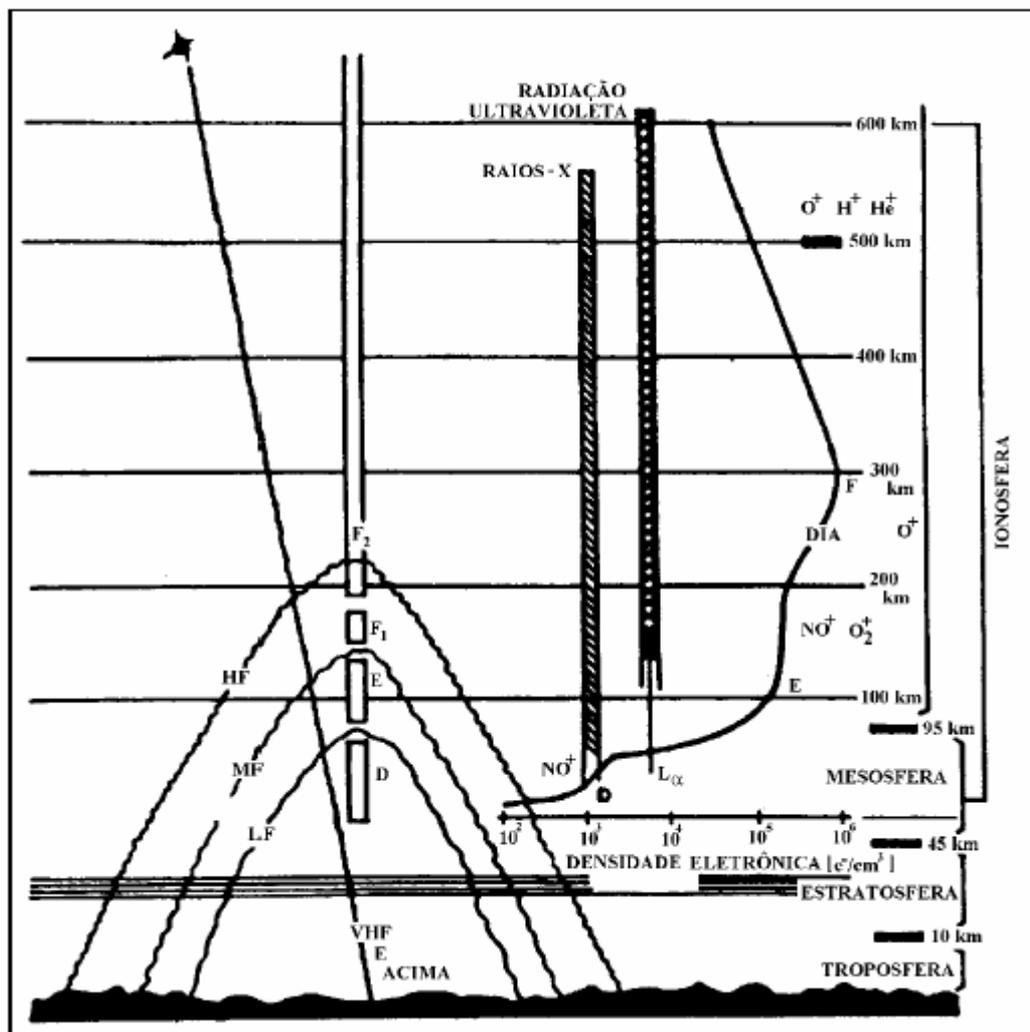


Figura 1 – Radiação sobre as camadas ionosféricas e densidade eletrônica diurna

Fonte: (BISPO, 2001)

2.2 Plasma Ionosférico e Atividade Solar

Em altitudes acima de 60 km, a incidência diurna da radiação, provinda do sol, faz com que parte das moléculas dos gases atmosféricos, ali presentes, seja ionizada continuamente. A mistura das moléculas neutras com as ionizadas cria um meio conhecido como plasma ionosférico. Pode-se definir a concentração de elétrons livres como a densidade do plasma, desde que a ionização ocorra quando um ou mais elétrons ganham energia suficiente para escapar de uma molécula, que passa a ter carga positiva e a ser conhecida como íon.

A densidade do plasma ionosférico está relacionada com a intensidade de radiação solar, e esta intensidade está associada ao aparecimento de manchas na superfície do sol, conhecidas como manchas solares. Convencionou-se que a quantidade de manchas solares seria medida pelo Número Médio de Manchas Solares (*Sunspot Number* – SSN). Ao se analisar o SSN durante longos períodos, pode-se observar a existência de um ciclo solar, com duração de aproximadamente 11 anos. Este ciclo caracteriza a variação média da atividade solar, (BISPO, 2001).

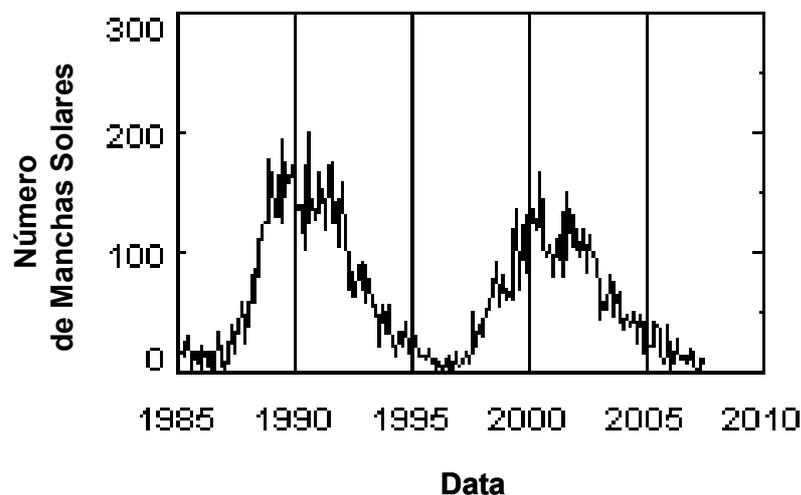


Figura 2 – Ciclos Solares x Número de Manchas Solares de 1985 a 2007

Fonte: (NASA / Marshall Polar PHYSICS, 2007)

A Figura 2 ilustra ciclos solares de 1985 a 2007. Deve ser destacado que o SSN é produto da variação média da atividade solar em longo prazo, onde o ciclo de 11 anos é uma indicação da tendência do comportamento solar. Portanto, pode haver variações abruptas da atividade solar em um curto espaço de tempo, como por exemplo, em algumas poucas horas de observação.

2.3 Camadas da Ionosfera

A ionosfera é composta por três regiões ou camadas, designadas por D, E e F, respectivamente, de acordo com o aumento da altitude. Essa estratificação em camadas é decorrente da variação da densidade de elétrons livres, que se intensifica com o aumento da altura. A Figura 3 ilustra as camadas ionosféricas e suas altitudes para o dia e para a noite. Embora as ondas VLF e ELF sejam refletidas nas altitudes da camada D, essa região atua principalmente na absorção de energia, causando atenuação do sinal nas frequências mais baixas da faixa HF.

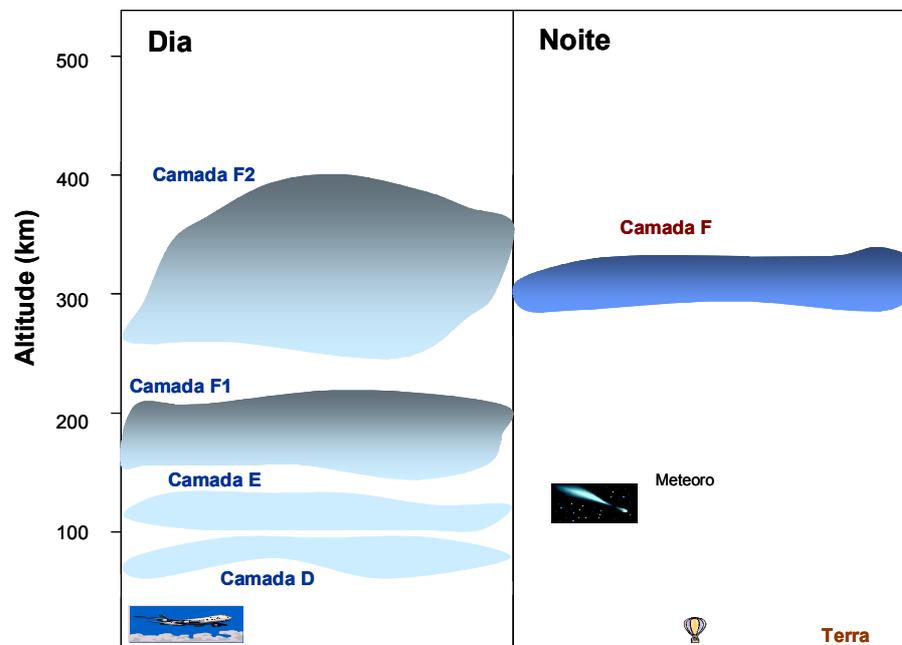


Figura 3 – A ionosfera e suas camadas durante o dia e à noite

2.3.1 Camada D

A região D é a mais próxima do solo e a menos energética. É definida ao amanhecer e localiza-se entre 50 e 90 km de altitude. A densidade de ionização na região D exhibe significativas variações diurnas, ocorrendo um valor máximo após o meio dia e um valor muito pequeno à noite. Essa variação diurna é maior na faixa de altitude entre 70-90 km, com valores ao meio dia em torno de $10^8 - 10^9$ elétrons/m³. Há, também, uma variação acentuada de densidade de elétrons livres na região D, com a mudança das estações do ano, ocorrendo um máximo no verão.

Durante o dia, a ionização da Camada D é produzida principalmente pelos raios cósmicos energéticos e, ao anoitecer, o processo se inverte, ocorrendo a recombinação de íons. O ponto de equilíbrio entre os dois processos determina o grau de ionização do meio em determinado momento. Se um elétron livre se desloca aleatoriamente próximo a um íon positivo, ou cátion, que também esteja se deslocando, existe grande possibilidade de ambos se atraírem e, portanto, se recombinarem. Ao anoitecer, isto é, quando diminui a energia provinda do Sol, os elétrons são atraídos pelos íons positivos, formando moléculas neutras. Como a densidade atmosférica é mais elevada na altitude da camada D, então há maior facilidade de recombinação nesta camada do que nas demais, e o efeito de ionização torna-se muito baixo, conseqüentemente, as ondas de rádio, em especial na faixa baixa de HF, não são refletidas nesta camada. A frequência de colisão entre elétrons e outras partículas na região D durante o dia, é, aproximadamente, de 10 milhões de colisões por segundo (SITE GEOCITIES, 2008). Portanto, esta camada é a principal responsável pela absorção de energia de uma onda radioelétrica em propagação na ionosfera, particularmente em frequências abaixo de 10 MHz.

2.3.2 Camada E

A camada E é constituída de gás ionizado e localiza-se na faixa de altitude entre 90 e 130 km, englobando as camadas E normal e E esporádica. A camada E normal é regular,

dependente do ângulo zenital solar, atinge densidade máxima próximo ao meio dia e uma máxima sazonal no verão. A densidade máxima alcança valores da ordem de 10^{11} elétrons/m³ e sua altitude é de aproximadamente 110 km (MASLIN, 1987). À noite, somente um pequeno nível residual de ionização permanece na região E. A camada E normal é importante para a propagação HF durante o dia, em distâncias menores do que 2.000 km.

Radiofrequências abaixo de 10 MHz são, normalmente, refletidas na camada E. Acima dessa frequência, entretanto, há um efeito negativo, devido à absorção parcial nesse comprimento de onda. A estrutura vertical dessa camada é determinada, principalmente, pelos efeitos de ionização e recombinação, que competem entre si. À noite, a camada E começa a desaparecer, pois a fonte primária de sua ionização, o sol, não está presente. O resultado é o aumento da altura onde a camada é maximizada.

A camada E esporádica ocorre quando a ionização na região E é elevada e tem a particularidade de ficar mais ativa no verão e em condições em que o ciclo solar (que se repete a cada 11 anos, aproximadamente) esteja propício. Os ângulos de incidência dos raios solares na ionosfera contribuem para o surgimento da Camada E esporádica, portanto, quanto mais perpendiculares, maiores serão as probabilidades de surgirem. A ocorrência desse fenômeno depende fortemente da latitude. Por exemplo, em latitudes da Europa central, ocorre com maior frequência no verão do que no inverno, e mais durante o dia do que à noite. Há ocasiões em que a camada E esporádica impede que frequências, que normalmente penetram na camada E, alcancem camadas mais elevadas.

2.3.3 Camada F

A camada F localiza-se acima de 130 km e durante o dia é subdividida nas camadas F1 e F2, conforme a densidade de elétrons livres. A camada F1 é a região situada entre 130 e 210 km de altitude, cuja máxima densidade de elétron situa-se em torno de 2×10^{11} elétrons/m³, (MASLIN, 1987). Formada durante o dia, nessa camada ocorre, às vezes, reflexão da transmissão em HF. Porém, normalmente, a incidência oblíqua da onda que penetra a região E também atravessa a camada F1. Nesse caso, a reflexão se dá na camada F2.

A camada F2 é a mais alta da ionosfera e normalmente exibe maior densidade de elétrons livres. Atinge em torno de 10^{12} elétrons/m³ durante o dia e em torno de 5×10^{10} elétrons/m³ à noite. Situada entre 250 e 400 km, a camada F2 é a principal região onde há reflexão das ondas HF para longas distâncias (MASLIN, 1987). A altura e a densidade de ionização variam conforme a hora do dia, época do ano, vento solar e ciclo solar. À noite, a camada F1 se funde com a camada F2 na altitude de 300 km aproximadamente. A ausência da camada F1 e a redução da absorção da região E causam, à noite, intensidade de campo e ruído geralmente mais elevados do que durante o dia. Há variação da ionização da região F quanto à latitude, nas proximidades do equador é significativa, enquanto que, em latitudes altas, existe uma região de baixa densidade de elétrons livres.

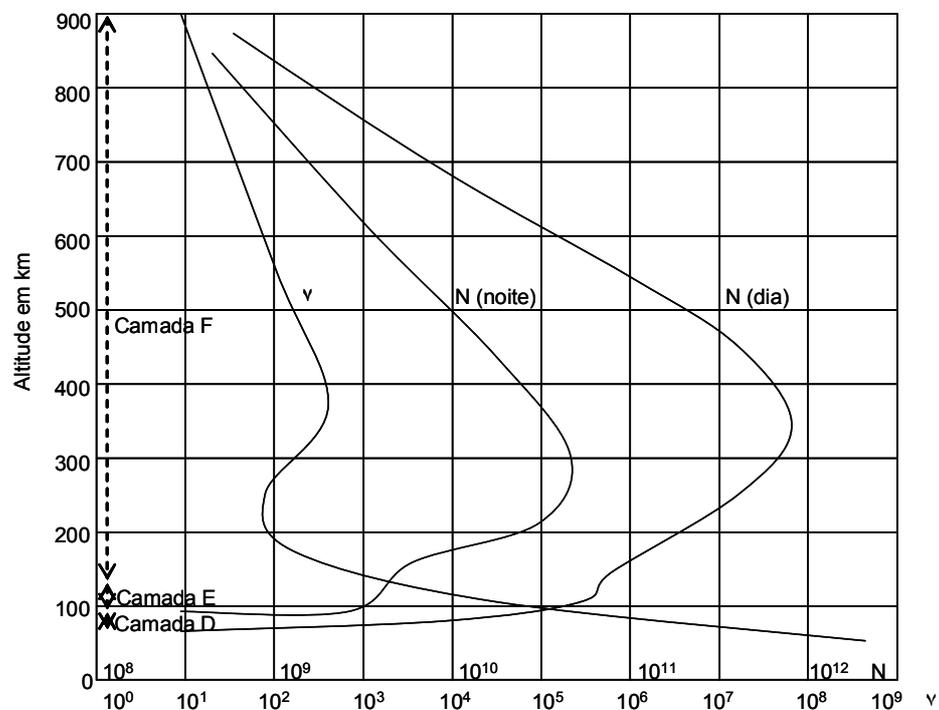


Figura 4 – Densidade eletrônica e frequência de colisão para latitudes médias

Fonte: (BOITHIAS, 1987)

A Figura 4, adaptada de BOITHIAS (1987), mostra os perfis de ionização da densidade eletrônica N (elétron/m³) durante o dia e à noite, assim como a frequência de colisão ν (s⁻¹). Cumpre assinalar que o produto $N\nu$, parâmetro diretamente associado à absorção das ondas em propagação, atinge seu valor máximo no entorno de 70 km, ou seja, na altura da região D.

A posição e ionização durante o dia das regiões D, E normal e F1 são dependentes da direção do sol. A ionização depende principalmente do ângulo zenital χ do sol, que é uma função do tipo $(\cos \chi)^n$, onde n é da ordem de 0,75, entretanto, a ionização da região F2 é permanente e quase não depende da posição do sol. Isso ocorre devido à lentidão com que os elétrons se recombinam nessa altitude e porque esta região é suprida com elétrons das regiões mais baixas, através de difusão. Além disso, enquanto a ionização para as regiões mais baixas é maior no verão do que no inverno, o oposto aplica-se para a região F. Este fenômeno, chamado de anomalia de inverno da região F, é perceptível, sobretudo, em períodos de máxima atividade solar.

Em resumo, a estrutura da ionosfera mostra-se extremamente variável em função da potência de radiação do sol e da latitude geográfica. Os perfis de ionização afetam o comprimento dos enlaces, os quais dependem acentuadamente da hora do dia, estação do ano, número de manchas solares e de estar ou não perturbada a ionosfera.

3 PROPAGAÇÃO NO MEIO ESTRATIFICADO

O capítulo 2 descreve a constituição do meio ionosférico, formado por camadas estratificadas – conhecidas como D, E e F – com densidade de elétrons livres variando com a altitude e com a hora do dia. A propagação da onda radioelétrica na ionosfera deve-se ao efeito de refração que ocorre nessas camadas, possibilitando que o raio retorne à Terra, em maior ou menor distância, de acordo com a frequência de operação, a estação do ano, o número de manchas solares e o ângulo de elevação da irradiação da antena. Neste contexto, conforme será visto neste capítulo, para se obter comunicações adequadas em HF é necessário estabelecer um relacionamento ótimo entre as características do canal ionosférico, a frequência e a distância entre os terminais do enlace. E também aqui abordado o problema da multiplicidade de percursos da energia na ionosfera responsável pelo fenômeno do desvanecimento dos sinais.

3.1 Propagação de Ondas na Ionosfera

Ao se propagar na ionosfera, o campo elétrico da onda de rádio, proporciona um movimento oscilatório nos elétrons, os quais re-irradiam a energia como se fossem micro-antenas. A re-irradiação modifica a velocidade de propagação da onda (BUDDEN, 1985). Quando a concentração de elétron é alterada ocorre a refração da onda. Se não houvesse o campo magnético da Terra, o movimento oscilatório dos elétrons seria paralelo à direção do campo elétrico da onda incidente e as ondas re-irradiadas teriam a mesma polarização da onda incidente; a onda se propagaria na ionosfera sem troca de polarização. O campo magnético da Terra modifica o movimento oscilatório dos elétrons proporcionando-lhes movimentos em

órbitas complexas. Geralmente, a re-irradiação destes não tem a mesma polarização da onda incidente. Assim, ocorre uma troca contínua da polarização da onda resultante, enquanto a onda se propaga na ionosfera (MASLIN, 1987).

Na propagação através da ionosfera, uma onda radioelétrica cede uma minúscula, mas significativa, quantidade de energia para os elétrons. Como os elementos constituintes da ionosfera possuem movimento aleatório contínuo, isto proporciona colisões entre elétrons e partículas mais pesadas. Quando ocorre uma colisão, a energia ordenada fornecida pela onda de rádio para um elétron é convertida em energia desordenada (calor) e a onda é atenuada. Por isso, quanto maior a frequência de colisões de elétrons, maior será a atenuação.

3.1.1 Reflexão em incidência oblíqua

Ignorando os efeitos do campo magnético da Terra, o índice de refração n da ionosfera é dado por (DAVIES, 1966),

$$n^2 = 1 - (f_p / f)^2 \quad \text{Equação 1}$$

onde f é a frequência da onda e f_p é a frequência do plasma.

Para a frequência, em hertz, e N como o número de elétrons por m^3 , obtém-se uma ótima aproximação dada por:

$$f_p = 9\sqrt{N_p}$$

em que N_p é a densidade eletrônica do plasma em elétrons livres / m^3 (BOITHIAS, 1987). Por definição, o índice de refração no vácuo é unitário. À medida que uma onda ascendente percorre as camadas da ionosfera, encontra índices de refração progressivamente descendentes, uma vez que a concentração de elétrons aumenta. Se a camada ionizada for espessa, a refração continuará até o ângulo de refração atingir 90° . O raio então terá alcançado o ponto mais alto da sua trajetória e iniciará seu retorno à Terra. Na prática, a variação da concentração de elétrons é contínua e o percurso do raio será uma curva contínua.

Considere-se uma região ionosférica dividida em camadas finas, onde a densidade de elétrons apresenta um aumento progressivo de uma camada para outra. A onda em propagação nesta região sofre sucessivos efeitos de refração nos limites entre as camadas, causando o encurvamento da trajetória mostrado na Figura 5. Aplicando a Lei de Snell no limite de cada camada, tem-se,

$$n_0 \operatorname{sen} \phi_0 = n_1 \operatorname{sen} \phi_1 = \dots = n_n \operatorname{sen} \phi_n \quad \text{Equação 2}$$

Desta forma, um raio penetrando a ionosfera com um ângulo de incidência ϕ_0 será refletido em uma altura onde a ionização é tal que n tem o valor:

$$n_0 \operatorname{sen} \phi_0 = n \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{2} \right)$$

Como $n_0 = 1$ no vácuo, então:

$$n = \operatorname{sen} \phi_0 \quad \text{Equação 3}$$

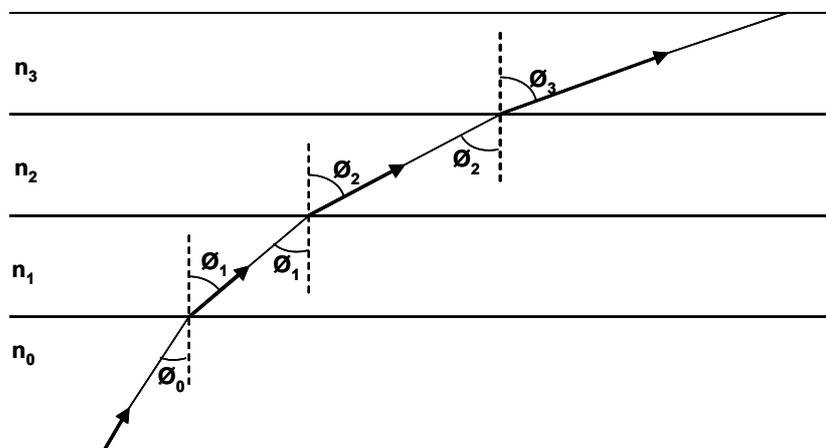


Figura 5 – Refração em um meio estratificado em camadas

Fonte: (MASLIN, 1987, p.61)

Na incidência vertical,

a condição de reflexão ocorre quando n é igual a zero e $f = f_p$ na Equação 1. Se $f = f_v$ representa a frequência de incidência oblíqua refletida no nível em que a frequência do plasma é f_p , então:

$$\operatorname{sen}^2 \phi_0 = 1 - (f_p / f)^2 = 1 - (f_v / f)^2 \quad \text{Equação 4}$$

e portanto:

$$f = f_v \sec \phi_0 \quad \text{Equação 5}$$

Logo, uma frequência f incidente na ionosfera, com um ângulo ϕ_0 , será refletida com a mesma densidade de elétrons livres que a frequência incidente vertical equivalente, $f_v = f \cos \phi_0$; conseqüentemente, uma dada camada ionosférica sempre refletirá frequências mais altas em incidência oblíqua do que em incidência vertical.

3.1.2 Trajetórias dos raios

A Figura 6 ilustra os percursos dos raios, a partir do transmissor, com frequência fixa. Para pequenos ângulos de elevação, o percurso (1) é longo e o alcance é grande. À medida que o ângulo de elevação aumenta, o alcance é reduzido (2) até a distância mínima (3), denominada distância de salto (*skip*). Para os ângulos de elevação maiores, os alcances aumentam rapidamente (4 e 5). A partir do ângulo crítico de incidência, indicado na Figura 6, ocorre a penetração do raio na camada, pois a densidade de elétrons livres não é suficiente para que o raio seja totalmente refletido (6). Este raio é chamado de raio de escape. O pequeno feixe de raios entre o raio de salto e o raio de escape é disperso em uma enorme extensão. Embora de baixa intensidade, estes sinais são utilizáveis e são recebidos em percursos de ângulo elevado. Neste caso, a propagação se dá sem que haja reflexão intermediária. Tal mecanismo acontece na região de anomalia equatorial da ionosfera, sendo o trajeto em questão denominado de *chordal path*, devido à sua característica geométrica como uma corda entre dois pontos de uma circunferência. O ângulo crítico é função da frequência.

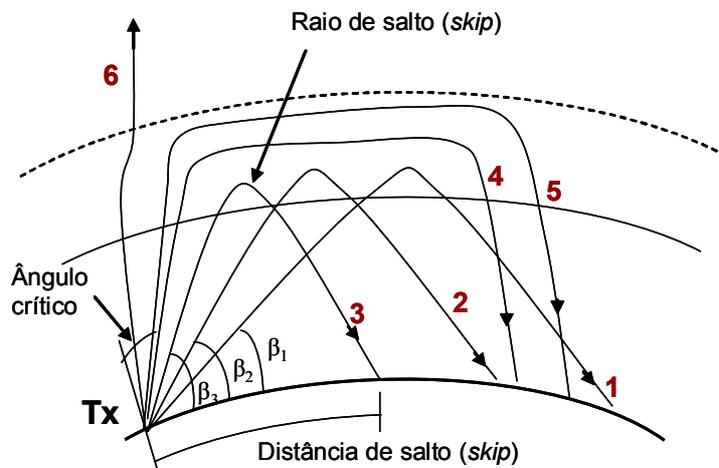


Figura 6 – Percursos dos raios em função do ângulo de elevação

Fonte: (MASLIN, 1987)

3.1.3 Altura virtual

As características da ionosfera podem ser determinadas através de medidas de frequências críticas de várias camadas. O método mais usual é o de um transmissor que emite pulsos curtos verticalmente, e um receptor próximo que capta o sinal direto e o refletido da ionosfera, medindo-se em seguida o retardo de tempo entre eles. Com estas medidas, calcula-se a altura virtual h' , que corresponde à altura em que ocorreria a reflexão caso a ionosfera fosse uma superfície de reflexão perfeita e a velocidade da onda, igual à velocidade da luz. A ionosfera é constituída por íons e elétrons livres em quantidade suficiente para alterar a velocidade de propagação da onda. Portanto, a velocidade da onda na ionosfera é sempre menor do que a velocidade da luz no vácuo, e a altura virtual é sempre maior do que a altura real h . O teorema de Breit e Tuve afirma que o percurso virtual P' , entre um transmissor T e um receptor R , é dado pelo comprimento do triângulo equivalente TAR (DAVIES, 1966), visto na Figura 7.

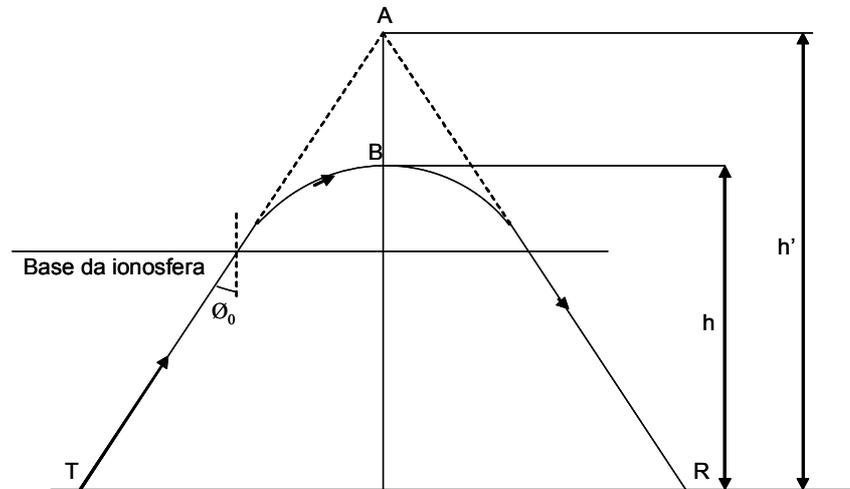


Figura 7 – Percurso real TBR e percurso virtual TAR

Fonte: (MASLIN, 1987)

Ao considerar um pulso incidente vertical na ionosfera com velocidade c , o percurso equivalente P' é:

$$P' = 2h' = ct \quad \text{Equação 6}$$

em que h' é a altura equivalente de reflexão (ver Figura 7), (MASLIN, 1987). Por outro lado, o teorema de Martyn (BUDDEN, 1985) afirma que a altura virtual de reflexão de uma onda incidente oblíqua é a mesma que uma onda vertical equivalente. A partir da Equação 5 e da Equação 6, tem-se:

$$P'(f) = 2h'(f_v) \sec \phi_0 \quad \text{Equação 7}$$

Como $f_v = \frac{f}{\sec \phi_0}$, da Equação 5

então, $\cos \phi_0 P'(f) = 2h'(f \cos \phi_0)$.

Os teoremas equivalentes não são válidos quando as curvaturas da Terra e da ionosfera são consideradas. Neste caso, a $\sec \phi_0$ não depende somente de h' e do alcance, mas também, da distribuição da densidade de elétrons livres. Assim, a secante variará de acordo com as

mudanças na ionosfera, por exemplo, com a hora do dia, e a expressão para determinar a secante ϕ_0 , segundo MASLIN, necessita da introdução de um fator de correção k , em função do qual a lei da secante na Equação 5, torna-se:

$$f = k f_v \sec \phi_0 \quad \text{Equação 8}$$

3.1.4 Trajetórias na ionosfera e frequência crítica

Na faixa de HF, a Terra se comporta como se fosse uma superfície refletora. Dessa forma, um percurso entre dois pontos na superfície da Terra pode incluir sucessivas reflexões, alternadamente na ionosfera e na Terra, inclusive em mais de uma camada da ionosfera. A Figura 8 ilustra possíveis enlaces entre dois pontos e os símbolos convencionalmente usados para esses enlaces. O sinal negativo mostra que houve mais de um salto no percurso, sem que a reflexão tenha ocorrido no solo.

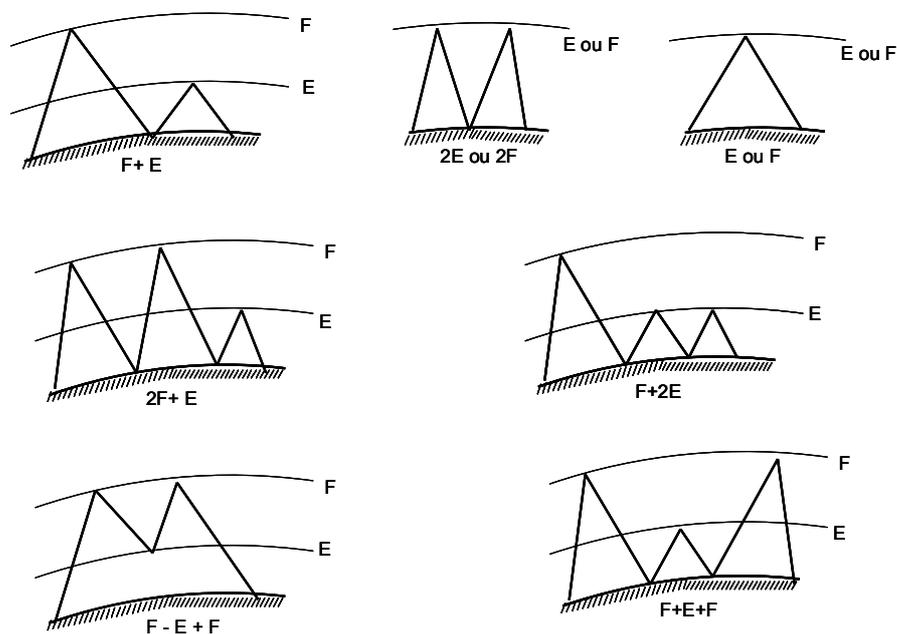


Figura 8 – Tipos de enlaces ionosféricos

Fonte: (BOITHIAS, 1987)

Conforme visto anteriormente (item 3.1.1), a frequência do plasma é dada por:

$$f_p = 9\sqrt{N_p}$$

em que N_p é a densidade eletrônica do plasma (elétrons / m^3) e f_p é a frequência do plasma, em hertz. Definindo $N_{máx}$ como a densidade de elétrons máxima em uma dada camada ionizada, toda onda com frequência menor do que a frequência do plasma, ao penetrar na ionosfera com incidência vertical, será refletida e retornará à Terra. A frequência crítica é dada aproximadamente por:

$$f_c = 9\sqrt{N_{máx}}$$

A frequência crítica se caracteriza como a frequência a partir da qual uma determinada camada deixa de refletir um sinal em uma incidência perpendicular à superfície da Terra. Uma onda em incidência vertical, com frequência de operação abaixo da frequência crítica, retornará na direção da Terra. Caso a frequência seja maior do que a frequência crítica, a onda não retornará, seguindo para o espaço.

Por outro lado, a máxima distância alcançada em um único salto é limitada pela geometria, pela altura das camadas refletoras e pela curvatura da Terra. Para uma dada frequência f , maior do que f_c , existe uma distância mínima em que o ângulo ϕ_0 alcança o valor máximo dado pela relação:

$$(\text{sen } \phi_0)_{\max} = \frac{f_c}{f} \quad \text{Equação 9}$$

Como essa distância é pequena, a curvatura da Terra pode ser ignorada. Assim,

$$d_{\min} = 2h' \cot \phi_{0\max} \quad \text{Equação 10}$$

Da qual se pode concluir que:

$$d_{\min} = 2h' \sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1}. \quad \text{Equação 11}$$

Essa distância, mostrada na Figura 6, foi denominada distância de salto (*skip*) no item 3.1.2. Geometricamente, essa distância delimita um círculo dentro do qual nenhum ponto pode ser alcançado pela ionosfera. Se a distância de salto é suficientemente grande, existe

dentro desse círculo uma coroa que também não pode ser alcançada pela onda difratada ao longo da superfície da Terra. Essa coroa circular forma, então, uma zona de silêncio. O diâmetro do círculo interno é aproximadamente constante, enquanto o diâmetro do círculo externo depende da ionização e, portanto, da hora do dia.

3.2 Variação da Frequência Crítica

As frequências críticas das camadas E e F da ionosfera conhecidas, respectivamente, por f_0E e f_0F2 , são as mais altas frequências passíveis de reflexão nas duas regiões. Tais frequências são relacionadas à densidade máxima de elétrons livres nessas regiões. O valor de f_0F2 é sempre maior do que f_0E , uma vez que a concentração de elétrons livres na camada F é muito maior do que na camada E.

3.2.1 Dependência do ciclo solar

O laboratório Rutherford-Appleton, em Slough (Inglaterra) (MASLIN, 1987) realizou a análise das sondagens verticais em um período de onze anos e detectou que as frequências críticas são influenciadas pelo ciclo solar. As frequências críticas da camada F2 se elevavam à medida que o número de manchas solares aumentava, e se reduziam, conforme diminuía o número de manchas solares. Entretanto, as frequências críticas da camada E variavam sazonalmente, sendo maiores nos meses de verão.

A camada F2 é a mais importante do ponto de vista das comunicações radioelétricas em HF e, também, a mais variável. Diferentemente da camada E (e da camada F1, quando presente), a camada F2 não segue uma lei de ângulo zenital solar simples, nem durante o dia, nem sazonalmente. Com a baixa elevação do sol durante o inverno, comparando-se com o verão, a frequência crítica da camada F2 no inverno atinge o dobro do valor do verão. Isso implica em um pico na taxa de densidade de elétrons livres, quatro vezes maior. Esse efeito de anomalia no inverno ocorre somente durante o dia.

3.2.2 Variação diurna, sazonal e anual

As medidas realizadas em Slough mostraram que, durante baixa atividade solar, as frequências críticas máximas chegaram a 6 MHz, enquanto que em alta atividade solar as frequências críticas eram maiores do que 6 MHz, em 70% do tempo. Durante o dia, as maiores variações das frequências críticas F2, no ciclo solar, ocorrem no inverno, com menos variação no verão. Porém, à noite, no inverno, as frequências críticas F2 não são afetadas pelo número de manchas solares. As maiores variações das frequências críticas F2 ocorreram no período de maior atividade solar.

Existem ocasiões – no inverno de anos de baixo número de manchas solares – em que a frequência crítica F2 não atinge 2 MHz. Há circunstâncias em que a frequência crítica mais alta na presença de E esporádica atinge 15 MHz, à qual é mais alta do que a da camada F2, em condições normais, cuja frequência crítica máxima é, aproximadamente, 10 MHz.

3.3 Máxima Frequência Utilizável

A máxima frequência utilizável (*Maximum Usable Frequency* – MUF), para uma dada distância de transmissão, é calculada a partir da frequência crítica, multiplicada por um fator MUF, que é função da distância de transmissão. Essa distância é associada a certo ângulo de elevação, da onda transmitida, e definida por:

$$f_{MUF} = f_c \sec \phi_i$$

Devido à curvatura da Terra e da ionosfera, o maior ângulo ϕ_i que pode ser usado é cerca de 74° , o que leva a $f_{MUF}(\text{máx}) \approx 3,6 f_c$ [BISPO, 2001]. Essa é a MUF básica. A MUF, medida em um determinado enlace, é normalmente conhecida como MUF operacional. Esses termos podem variar conforme o autor ou mesmo entre entidades, que tratam das comunicações ionosféricas.

O percurso do raio da MUF é o raio de salto, mostrado na Figura 6. Neste caso, a distância de transmissão é a distância mínima (*skip*) em que a onda ionosférica retorna à Terra. Para distâncias de até 2.000 km, máximo alcance em uma única reflexão na camada E, a MUF deve ser determinada pelas camadas E, F1 ou F2, tomando-se o maior valor encontrado. Para distâncias de até 3.000 km, as camadas F1 ou F2 controlam a MUF. Entre 3.000 e 4.000 km – valor limite para trajetória com um único salto – a propagação se dá apenas pela camada F2.

A frequência ótima de trabalho é selecionada abaixo da MUF, de modo a prover uma margem de segurança que compense os efeitos de irregularidades e turbulências ionosféricas. É conhecida como FOT, sigla tomada de designação em francês, que se ajusta também ao português, estimada em 0,85 do valor médio mensal da MUF para um dado circuito.

3.4 Mínima Frequência Utilizável

A absorção de uma onda de rádio HF na região D da ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da frequência. A sensibilidade de um receptor HF é geralmente limitada pelo ruído externo, que aumenta quando a frequência é reduzida. Existe, então, uma frequência limite, abaixo da qual a taxa sinal/ruído fica muito reduzida, impedindo o alcance de valores aceitáveis para operacionalizar os enlaces. A mínima frequência utilizável (*Lowest Usable Frequency* – LUF) depende, portanto, das características de engenharia do enlace, bem como da potência do transmissor.

Além das limitações de absorção, o sinal também pode perder energia por vários mecanismos, que tornam mais complexa a avaliação do desempenho do circuito (DAVIES, 1966), como por exemplo:

- a) espalhamento espacial de energia;
- b) processos de dispersão;
- c) troca de polarização causada pelo campo magnético da Terra;
- d) focalização e desfocalização causadas pela curvatura ionosférica.

3.5 Absorção na Camada D

A camada D existe apenas durante o dia, quando a radiação solar incidente ioniza a atmosfera, nas altitudes entre 50 e 90 km. Essa camada apresenta uma densidade de partículas neutras relativamente alta em relação às outras camadas, pois, à medida que a altitude aumenta, esse parâmetro decresce exponencialmente. As taxas de densidade eletrônica, embora mais baixas, são suficientes para apresentar absorção de energia. Esse fenômeno ocorre quando a onda eletromagnética incide em um meio ionizado onde a densidade de partículas neutras seja alta. O resultado é um índice de colisão (ν) relativamente elevado entre os elétrons livres e as moléculas neutras. Os elétrons livres do meio ionizado absorvem energia e iniciam um movimento oscilatório, ao sofrerem a incidência da onda eletromagnética, entrando em ressonância com a onda em propagação. Caso os elétrons não encontrem nenhum obstáculo, sua oscilação faz com que re-irradiem a mesma quantidade de energia para o ambiente, imediatamente. Mas, com a presença de grande quantidade de partículas neutras, esses elétrons têm grande probabilidade de se chocarem com tais partículas, muito mais pesadas, perdendo, assim, energia e quantidade de movimento. Nesta situação, o total de energia re-emitada para o ambiente é menor e o resultado líquido é a absorção das ondas eletromagnéticas. Esse efeito é dominante na camada D, que tem como característica a baixa ionização, que não causa a reflexão da onda eletromagnética, mas é suficiente para proporcionar uma razoável absorção.

A atenuação, devida à absorção ionosférica, limita severamente a transmissão ionosférica, de acordo com a frequência e a hora do dia. A atenuação, em dB/km, é geralmente proporcional ao número de colisões por segundo, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência, exceto para baixas frequências. A Figura 9, adaptada de BOITHIAS (1987), ilustra os valores médios obtidos de um enlace de 4.200 km entre Paris (França) e Dakar (Senegal), para dois períodos típicos de um ano de baixa atividade solar. O enlace envolve uma reflexão na superfície da Terra. É notório que a absorção na camada D, baixa durante a noite, aumenta consideravelmente durante o dia, principalmente no verão.

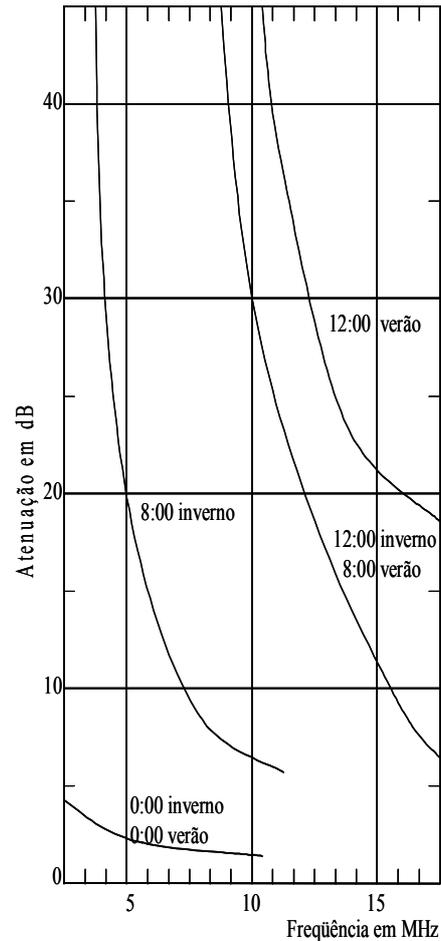


Figura 9 – Absorção ionosférica na camada D em um enlace entre Paris e Dakar

Fonte: (BOITHIAS, 1987)

3.6 Camada F Espalhada

Na região equatorial as linhas do campo magnético terrestre têm orientação horizontal. Essa orientação forma uma estrutura fechada, impedindo a entrada de partículas solares e, conseqüentemente, causa anomalias imprevisíveis, porém, essas linhas do campo magnético são perpendiculares às linhas do campo gravitacional, proporcionando o aparecimento do fenômeno denominado camada F espalhada, do inglês *Equatorial Spread* (ESF). O nome camada F espalhada é devido ao intenso espalhamento do sinal refletido na camada F, como se cada frequência tivesse um grande conjunto contínuo de alturas virtuais. Esse fenômeno

ocorre geralmente à noite, entre 19h00 e 03h00, horário local (BISPO, 2001). A camada F nas regiões equatoriais é, normalmente, bem comportada durante o dia.

Acredita-se que a causa desse espalhamento seja a instabilidade de Rayleigh-Taylor, fenômeno que ocorre quando um fluido está acima de outro menos denso, de forma instável. No caso da ionosfera, os dois fluidos em questão correspondem ao plasma ionosférico com camadas de densidades diferentes superpostas, com a de menor densidade situada sob a de maior. A presença do campo geomagnético horizontal, nas proximidades do equador, restringindo o movimento vertical do plasma ionosférico e sustentando-o contra a força gravitacional, é a condição necessária para a ocorrência da instabilidade de Rayleigh-Taylor. Devido ao fato de estarem instavelmente um sobre o outro, ocasionalmente pode ocorrer a ascensão de bolhas do fluido menos denso através do fluido mais denso. Portanto, a ESF compõe-se de formações de bolhas de plasma de baixa densidade eletrônica (10^3 a 10^4 elétrons/cm³), incrustadas no plasma padrão da camada F (10^6 elétrons/cm³), que viajam de leste para oeste com velocidades entre 100 e 200 m/s (BISPO, 2001). O tamanho dessas bolhas pode variar de frações de metros a centenas de quilômetros, como ilustra a Figura 10.

Wernic faz uma descrição do processo de espalhamento da camada F em estágios, (BISPO, 2001). No primeiro estágio, logo após o pôr do sol, abaixo do ponto de máxima densidade da camada F, começam a aparecer irregularidades na densidade eletrônica. Por algum processo não linear, essas irregularidades de baixa densidade começam a subir rapidamente para o topo da camada F, com velocidades da ordem de até uma centena de metros por segundo, deixando para trás uma trilha de irregularidades de diversas ordens de grandeza. Durante esse estágio, a propagação de ondas de rádio é afetada por gradientes irregulares de densidade eletrônica que causam, na faixa de HF, uma reflexão das ondas, quase contínua no tempo, dentro das irregularidades, além de elevado espalhamento Doppler, devido às altas velocidades que o plasma em movimento pode atingir. Normalmente, esse estágio acontece antes da meia noite. No estágio seguinte, os gradientes de densidade eletrônica, bem como as turbulências, começam a diminuir e as estruturas de pequena escala começam a desaparecer. O último estágio se caracteriza pela permanência de bolhas de grande escala. A característica marcante dessas bolhas é a extensão mais alongada no sentido Norte – Sul. Por exemplo, pode haver bolhas de até 1.000 km de extensão no sentido Norte – Sul e 100 km no sentido Leste – Oeste.

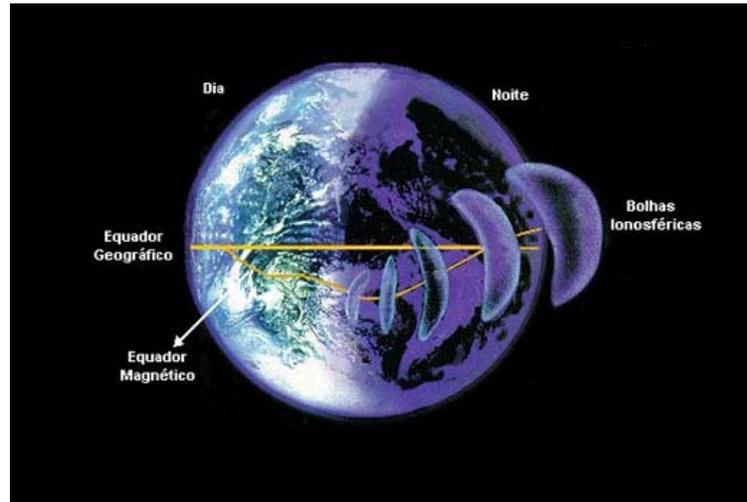


Figura 10 – Bolhas Ionosféricas

Fonte: INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), 2007

3.7 Características do sinal recebido

As ondas que se refletem na ionosfera e retornam para a Terra são modificadas durante o trajeto, devido ao dinamismo dessa região. No percurso de propagação, essas ondas sofrem os seguintes efeitos: atenuação, retardo, desvanecimento, espalhamento e deslocamento de frequência (Doppler), dispersão de tempo e distorção de retardo. Tais efeitos, associados às características no canal ionosférico, estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Características gerais do canal ionosférico

MECANISMO DE PROPAGAÇÃO	CARACTERÍSTICAS DO CANAL	PARÂMETROS RELEVANTES
<i>Onda Terrestre</i>	Atenuação Retardo	Condutividade do solo Relevo Alcance Polarização da onda Frequência da onda
<i>Onda Ionosférica (único modo)</i>	Atenuação Retardo Desvanecimento Distorção do retardo Deslocamento Doppler Espalhamento Doppler	Hora do dia Estação do ano Atividade de manchas solares Alcance Polarização da onda Frequência da onda
<i>Onda Ionosférica (multimodo)</i>	Dispersão do tempo Desvanecimento por interferência	Salto diferentes Modos diferentes Raios angulares alto/baixo Efeitos magnético-iônico Atenuação relativa Retardo relativo

Fonte: (MASLIN,1987)

3.7.1 Propagação multipercurso e dispersão temporal

As características dos multipercursos podem ser descritas pela dispersão produzida na resposta do meio ao impulso unitário. As causas da dispersão temporal, ilustradas na Figura 11, podem ser:

- a) Percursos de onda terrestre e ionosférica.
- b) Retorno da onda ionosférica de diferentes camadas desta região.
- c) Retorno da onda ionosférica envolvendo diferentes números de saltos.
- d) Percursos de onda ionosférica com ângulos baixo e elevado.
- e) Separação das componentes magneto-iônica, Ordinária e Extraordinária, resultantes dos efeitos do campo magnético da Terra.

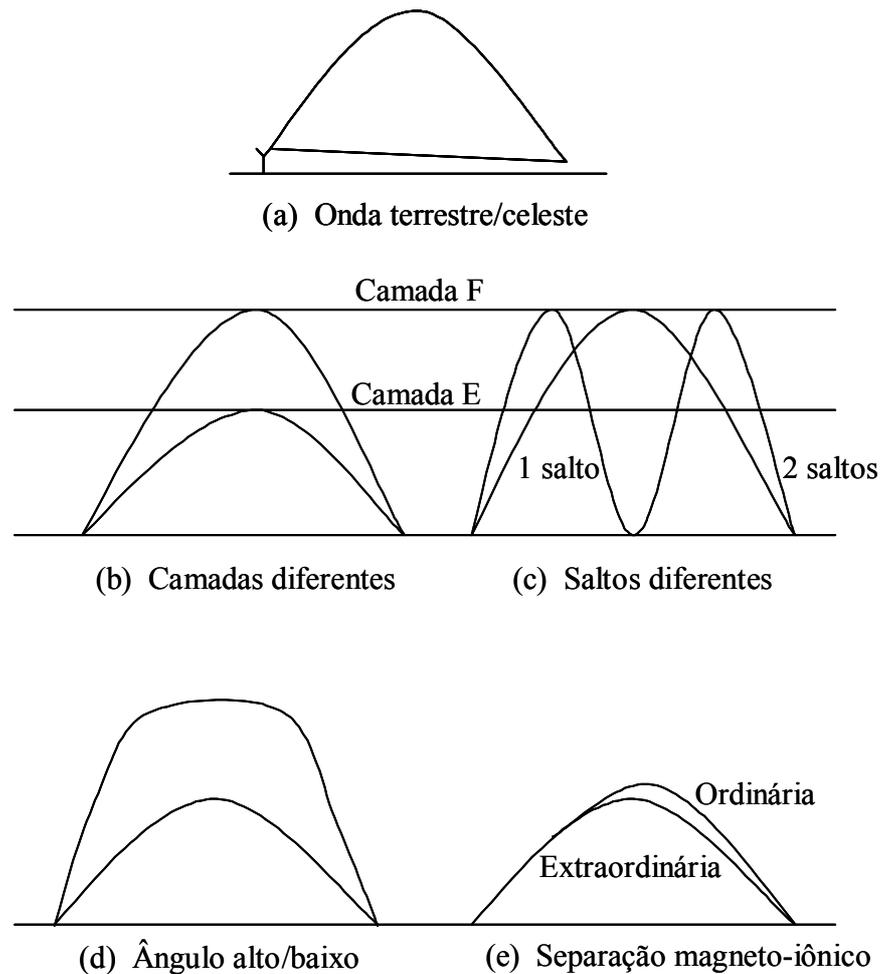


Figura 11 – Causas da propagação multipercursos

Fonte: (MASLIN, 1987)

Cada percurso ou modo de propagação tem suas características próprias de retardo de grupo. A dispersão temporal no canal de propagação é causada pela diferença dos retardos de grupo entre os diferentes modos. Tal dispersão pode aumentar a interferência intersimbólica se a taxa de sinalização for próxima aos retardos relativos dos multipercursos. A máxima taxa de transmissão em seqüência de dados é, então, limitada à faixa de tempo de propagação de multipercursos, a qual é uma função da freqüência, extensão do percurso, localização geográfica, hora local, estação do ano e atividade solar. A taxa de dados, contudo, pode ser maximizada trabalhando próxima à MUF. Para um percurso de 2.500 km, a máxima dispersão de tempo se aproxima de 3 ms (DAVIES, 1966); para 1.000 km aumenta para 5 ms e para 200 km fica em torno de 8 ms. Em propagação de único modo, ocorre um espalhamento, aproximadamente, de 100 μ s devido às pequenas diferenças das componentes

das trajetórias do raio, que são causadas pela diversidade das camadas da ionosfera e largura do feixe da antena. A dispersão no tempo pode ser maior em condições anômalas, quando a ionosfera apresenta muitas irregularidades, como o espalhamento da camada F (MASLIN, 1987).

O multipercurso produz vários efeitos importantes em técnicas de comunicações e é associado ao equipamento quando transmite dado digital HF em alta velocidade. A seguir são mostrados alguns desses efeitos:

- a) O equipamento é mais complexo, com MODEMS especiais, combinação de diversidade, etc. Por exemplo, em sistemas de chaveamento de fases, mudanças bruscas de fase ocorrem quando sucessivos modos alcançam o receptor, necessitando da provisão de um intervalo de guarda no fim de cada período de sinalização. Em sistemas de faixa limitada, usa-se sinalização multiton, o que reduz o número de tons disponíveis, já que uma maior separação de frequência é necessária.
- b) Caso haja interferência intersimbólica, o desempenho do canal em relação à taxa de erro é degradado, e as taxas de erro devem ser elevadas, mesmo com altas taxas sinal/ruído.
- c) A escolha da frequência de operação é limitada a uma faixa de frequência abaixo da MUF. O trabalho com frequências bem abaixo da MUF aumenta a probabilidade de se obterem retardos de multipercurso maiores.

3.7.2 Desvanecimento

Os sinais de onda ionosférica variam em amplitude e fase. A amplitude do sinal em um receptor fixo permanecerá constante, se não forem consideradas as irregularidades da ionosfera, isto é, supondo-se um meio estático. Portanto, a largura do espectro da potência recebida (i.e., a taxa de desvanecimento) é relacionada às mudanças na ionosfera.

Há uma variedade de tipos de desvanecimento, os quais são definidos de acordo com sua origem. As principais causas de desvanecimento são: os movimentos e mudanças na curvatura do refletor ionosférico, a rotação dos eixos da elipse de polarização na recepção, as

variações no momento da absorção, e as mudanças na densidade de elétrons livres. Adicionalmente a esses efeitos, que são produzidos independentemente para cada modo, o desvanecimento mais significativo é causado por interferência entre dois ou mais modos, particularmente quando têm a mesma amplitude. Os diferentes tipos de desvanecimento, com suas taxas típicas, são resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo das características de desvanecimento na faixa de HF

CAUSA	TIPO DE DESVANECIMENTO	PERÍODO DE DESVANECIMENTO	OBSERVAÇÃO
Irregularidades em pequena escala na região F	Flutuação	10-100 ms	Associado ao espalhamento F.
Movimento de irregularidades na ionosfera	Difração	10-20 s	Segue uma distribuição Rayleigh.
Rotação dos eixos da polarização elíptica	Polarização	10-100 s	Os componentes magneto-iônicos estão presentes.
Varição da hora da MUF	Salto	normalmente não periódica	Evitar trabalhar muito abaixo à MUF.
Curvatura da camada refletiva	Focalização	15-30 min	-
Varição da hora da absorção ionosférica	Absorção	60 min	Maiores efeitos ao nascer e pôr do sol.
Comparação de intensidades de diferentes modos de propagação	Onda terrestre/ onda ionosférica	2-10 s	-
	Ondas ionosféricas	1-5 s	
	Ângulo dos raios alto/baixo	0,5-2 s	
	Separação magneto-iônica	10-40 s	

Fonte: (MASLIN, 1987)

3.7.3 Dispersão da frequência

Para um dado percurso de propagação, um espalhamento ν_j em frequência pode ser causado pela variação do tempo da:

- a) Altura da camada refletiva;

- b) Densidade eletrônica (e conseqüentemente do índice de refração) ao longo do percurso.

Assim, para transmissor e receptor fixos e considerando ψ como o ângulo de fase de um raio no tempo t (MASLIN, 1987), tem-se então:

$$v_j = -\frac{f d\psi}{c dt} \quad \text{Equação 12}$$

Experiências realizadas (BAKER, 1966) mostraram que os deslocamentos de frequência (deslocamento Doppler) são menores à noite, se comparados com os efeitos diurnos. Deslocamento Doppler é o desvio de frequência sofrido pelo sinal transmitido, devido às variações de estado da ionosfera que podem gerar movimentos espalhadores. Em geral, utiliza-se nos cálculos o valor máximo deste desvio. Frequências mais altas implicam em maiores deslocamentos Doppler e propiciam um ruído mais intenso. Tal ruído deriva da variação da fase do sinal recebido com o tempo, causando uma modulação em frequência aleatória. Por outro lado, valores grandes e positivos ocorrem ao amanhecer, e valores grandes e negativos ao entardecer. Em dias mais estáveis, a faixa de valores (WATTERSON, 1970) é de 0,01-1 Hz para percursos de um salto. O deslocamento Doppler nos modos E tende a ser menor do que nos modos F, e razoavelmente menor para a incidência oblíqua do que para a vertical. Quando a ionosfera está perturbada, entretanto, como ocorre durante o espalhamento F, há um contínuo deslocamento de 5-10 Hz. Durante fortes explosões solares, desvios acima de 50 Hz são encontrados (BAKER, 1966), mas isso ocorre, eventualmente, com duração de poucos minutos. Porém, deslocamentos típicos causados por explosões são de 1-2 Hz.

Assim, cada modo de propagação é composto por um número de raios que percorre diferentes trajetórias rapidamente e, em cada trajetória, há uma ligeira diferença de deslocamento de frequência. Isso resulta em um espalhamento Doppler (desvio padrão eficaz do deslocamento Doppler, significando o espalhamento espectral da taxa de variação no tempo do canal de propagação) nas frequências recebidas. Espalhamento Doppler é um desvio do deslocamento Doppler que altera a taxa de variação no tempo do canal rádio. Seu conhecimento é útil na especificação e projeto de algoritmos adaptativos tais como controle de ganho automático e circuitos de recuperação de fase ou de temporização. O espalhamento pode ser formado a partir da variação aleatória da frequência percebida por cada multipercurso. Em condições ionosféricas moderadas, espalhamento de 0,02 Hz pode ser aplicado nos modos E e de 0,15 Hz nos modos F (WATTERSON, 1970). O espalhamento

Doppler contínuo modula cada pulso transmitido e, portanto, contribui para o desvanecimento dos pulsos recebidos.

3.7.4 Distorção do retardo

O retardo de grupo é função da frequência, o que causa a distorção do retardo e este, conseqüentemente, não é constante na faixa do sinal. Para um dado percurso na ionosfera, o ionograma¹ oblíquo dá as características de dispersão frequência-tempo. A importância da distorção de retardo para transmissão de dados é a taxa de mudança de retardo com a frequência e o tempo. Os canais ionosféricos não são estacionários em frequência e nem no tempo. No entanto, ao se considerarem canais de faixa limitada (10 kHz) e um tempo curto (10 minutos), os canais tornam-se quase estacionários e podem ser representados adequadamente por um modelo estacionário (WATTERSON, 1970). Isso significa, que desde que a propagação seja limitada por um discreto número de modos, o canal pode ser modelado por uma linha de retardo, com um discreto número de derivações (*taps*), cada qual modulada em amplitude e fase, por uma quantidade variável de tempo.

3.7.5 Janela de frequência e gerenciamento de frequência

A natureza dinâmica do meio ionosférico necessita do uso de um processo rápido, capaz de otimizar o desempenho do sistema. Para isso utilizam-se ferramentas como janela de frequência e gerenciamento de frequência.

3.7.5.1 Janela de frequência

¹ Ionograma é o diagrama que ilustra a altura virtual de cada camada ionosférica ao longo do percurso do sinal.

A janela de frequência é uma complicada função do percurso de propagação, localização geográfica, horário, estação do ano e número de manchas solares, na qual são viabilizadas comunicações com qualidade satisfatória (na ausência de interferência). O centro dessa janela se move ao longo do eixo da frequência de acordo com as condições existentes. A largura da janela também se modifica. Variações diurnas afetam a largura e o centro de frequência da janela.

Tempestades ionosféricas também causam uma mudança radical na janela de frequência. Suas características mais importantes são uma redução na f_oF2 e um aumento na absorção da região D. Como consequência básica tem-se a redução na MUF e o aumento na LUF, ocorrendo um estreitamento da janela de frequência utilizável. Os efeitos de uma tempestade magnética na f_oF2 em certa localização dependem, em uma determinada trajetória, da hora local, estação do ano, latitude magnética, e momento da tempestade (DAVIES, 1966). As depressões mais severas da densidade de elétrons livres e, conseqüentemente, a redução da f_oF2 ocorrem, aproximadamente, 24 horas após o início da tempestade, para latitudes geomagnéticas maiores ou iguais a 45° . Em latitudes intermediárias ocorrem depressões amenas e, nas regiões equatoriais, é observado um aumento efetivo da depressão (MASLIN, 1987).

O desempenho do enlace é calculado em relação às probabilidades de obtenção da taxa sinal/ruído. Conseqüentemente, a qualidade de um circuito ou o fator de confiabilidade pode ser avaliado por uma faixa de frequências. Desta forma são definidos os limites da janela de frequência requerida. É importante notar que tais predições fornecem apenas estimativas médias mensais. A confiabilidade do circuito não deve ser otimizada somente em um período específico, mas deve ser mantida em um nível elevado durante todo o período de operação do circuito.

O ponto de partida para a predição da MUF e, conseqüentemente, de um limite superior de frequência de interesse, é uma estimativa das frequências críticas das camadas E e F. Há uma faixa de frequência crítica da camada E (f_oE) que depende do ângulo zenital solar, hora local e latitude. Não existe, entretanto, dependência para a frequência crítica da camada F2 (f_oF2). A predição do limite inferior de frequência é mais complexa do que a do limite superior, pois não depende somente das características ionosféricas, mas também dos equipamentos do sistema. Portanto, abaixo do limite inferior de frequência não se consegue um valor aceitável da taxa sinal/ruído para o serviço requerido.

3.7.5.2 Gerenciamento de frequência

Para se obter uma comunicação com qualidade satisfatória em HF, é necessária certa habilidade na operação do radioenlace através do uso de frequências apropriadas. A escolha da frequência certa na hora certa é fundamental para se manter um desempenho aceitável de comunicações. O processo de selecionar as melhores frequências de acordo com as condições características ionosféricas é conhecido como gerenciamento de frequências.

O sucesso do gerenciamento de frequências depende da capacidade em prever, medir e reagir à faixa de parâmetros que caracteriza o percurso de propagação e o ruído. Existem três categorias de técnicas associadas ao gerenciamento de frequência:

1. Predições – Estas são subdivididas em:
 - a. Longo prazo: requerida para planejamento de sistemas de comunicações, projeto de engenharia e alocação de canal. As predições de longo-prazo devem cobrir um ciclo de manchas solares.
 - b. Curto prazo: requer operação do circuito dia a dia, planejamento diário de frequências e instrução do operador.
2. Sondagens – Estas provêm uma indicação de características de propagação atualizada em percursos vertical e oblíqua.
3. Avaliações do canal – Fornecem a avaliação da qualidade do canal em tempo real, considerando a propagação dominante, os efeitos do ruído e as interferências.

4 PREDIÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA

A propagação da onda radioelétrica na ionosfera, descrita no capítulo 3, possui trajetória curva devido a refração nas camadas desta região e o alcance do sinal transmitido depende da frequência de operação, do ângulo de elevação e do comportamento do canal ionosférico. De acordo com a distância do enlace, frequência de operação e variação do meio ionosférico os mecanismos de propagação podem ser de modo único ou multimodo. Para o estabelecimento de um enlace HF é necessário efetuar a predição do valor da MUF e estimar a intensidade do sinal. Este Capítulo trata da Recomendação UIT-R P.533-8, que se refere ao método de predição de propagação na faixa de frequências entre 2 a 30 MHz. Esta Recomendação detalha os procedimentos a serem observados na predição de propagação ionosférica, onde são definidas a intensidade de campo, a potência média disponível no receptor, a taxa sinal-ruído e a confiabilidade do circuito em sistemas digitais. Entretanto, a predição do valor da MUF da camada F envolve cálculos bastante complexos, dependendo de um grande número de fórmulas e gráficos que se encontram em diversas Recomendações do UIT-R. Conseqüentemente, trata-se de um procedimento que requer o uso de software específico. Por este motivo, a título de ilustração da importância dos parâmetros acima relacionados (distância, frequência, etc.), o anexo B exemplifica o cálculo da predição do valor da MUF da camada E, onde o roteiro de cálculo é bem mais simples de ser visualizado.

4.1 Ruído

O ruído eletromagnético que atinge a Terra, proveniente do sol e do espaço cósmico, estabelece um limite na informação e pode estar em todo espectro de HF. Esse limite é modificado pela radiação das fontes de ruído na troposfera, pelo ambiente terrestre e pelas fontes de radiofrequências produzidas pelo homem. Características de longo prazo desse ruído afetam a potência de transmissão requerida, enquanto características de curto prazo determinam como o sinal deverá ser projetado e detectado para transportar a informação desejada. Na faixa HF, ambientes de campos de ruído eletromagnético são as fontes de ruído dominante. Embora diversos tipos estejam sempre presentes, as maiores fontes de contribuição, para a faixa HF, podem ser identificadas como aquelas associadas a descargas atmosféricas, ao espaço sideral (ruído cósmico ou galáctico) e ao ruído produzido pelo homem.

A Recomendação UIT-R P.372-8 provê valores médios de potência de ruído atmosférico para a recepção em antena do tipo monopolo vertical curto acima da superfície terrestre, sem perda, como também fornece as potências de ruído produzido pelo homem e do ruído galáctico. A resultante do fator de ruído externo, em função da frequência, é dada por F_a (dB (kTb)), isto é, dB em relação a kTb, sendo k a constante de Boltzmann, T a temperatura (Kelvin) de referência e b a largura de faixa da potência de ruído no sistema de recepção, em função da frequência f (MHz). Ao usar outras antenas de recepção, o fator de ruído resultante difere desse valor de F_a . Contudo, não há disponibilidade de medidas de ruído para diferentes antenas sendo apropriado assumir que o valor obtido F_a da Recomendação UITR P.372-8 pode ser aplicado como uma primeira aproximação.

Nesse caso, a relação sinal-ruído média mensal, obtida com uma largura de faixa de b (Hz) é:

$$S/N = P_r - F_a - 10 \log_{10} b + 204$$

em que:

P_r : é a potência média disponível no receptor, determinada no item 4.2.

A citada Recomendação apresenta as seguintes considerações:

- a) a combinação dos ruídos radioelétricos limita o desempenho dos sistemas de comunicação via ionosfera;

- b) a fator de ruído da antena efetiva, ou a temperatura de ruído da antena, em conjunto com a distribuição de probabilidade de amplitude da envoltória do ruído recebido, são parâmetros adequados (quase sempre necessários, mas algumas vezes não suficientes) para o uso em projetos e determinações de desempenho de um sistema;
- c) geralmente é inapropriado usar sistemas de recepção com fatores de ruído menores do que os especificados pelo ruído externo mínimo;
- d) o conhecimento da emissão de rádio das fontes naturais é requerido para:
 - avaliação dos efeitos da atmosfera nas ondas radioelétricas;
 - atribuição de frequências, para percepção remota do ambiente da Terra.

Informações necessárias para a análise e projeto de sistemas radioelétricos segundo a Recomendação UIT-R P.372-8, 2005 encontram-se no anexo A.

4.2 Potência média disponível no receptor

Em enlaces² até 7.000 km, um dado modo w possui intensidade de campo de onda ionosférica E_w (dB(1 μ V/m)) na frequência f (MHz). A potência do sinal disponível correspondente P_{rw} (dBW) de uma antena receptora, sem perda (antena ideal), e com ganho G_{rw} (dB relativo a uma antena isotrópica), na direção do sinal incidente, é:

$$P_{rw} = E_w + G_{rw} - 20 \log_{10} f_{MHz} - 107,2 \quad dBW \quad \text{Equação 13}$$

A resultante da potência média do sinal disponível P_r (dBW) é dada pela soma das potências de chegada dos diferentes modos de propagação, e a contribuição de cada modo depende do ganho da antena receptora, na direção de incidência daquele modo. Para N modos contribuindo no somatório, tem-se:

$$P_r = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{P_{rw}/10} \quad dBW \quad \text{Equação 14}$$

² Enlaces de até 7.000 km porque engloba o enlace das medições realizadas em campo. O cálculo para enlaces acima de 7.000 km encontra-se na Recomendação UIT-R P.533-8.

O item a seguir demonstra o cálculo da intensidade de campo da onda ionosférica (E_w (dB(1 μ V/m))), necessária para a obtenção da potência do sinal recebido.

4.3 Intensidade de campo média da onda ionosférica

A predição da intensidade de campo é representada pela média mensal sobre todos os dias do mês. Os métodos de predição estão apresentados em três partes, dependentes do comprimento do percurso.

4.3.1 Ângulo de elevação

Para o cálculo da intensidade de campo é necessário obter o ângulo de elevação, que é dado por:

$$\Delta = \arctan \left(\cot \frac{d}{2R_0} - \frac{R_0}{R_0 + h_r} \sin^{-1} \frac{d}{2R_0} \right) \quad \text{Equação 15}$$

em que:

d é o comprimento do salto de um modo com n saltos, dado por $d = D(\text{comprimento do percurso})/n$;

R_0 é o raio da Terra, 6371 km;

h_r é equivalente à altura de reflexão.

Para os modos E, $h_r = 110$ km

Para os modos F2, h_r é função do horário, localização e comprimento do salto.

Cálculo da altura de reflexão, h_r , para os modos F2:

Definindo,

$$x = foF2 / foE \quad \text{Equação 16}$$

e

$$H = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 316 \quad \text{Equação 17}$$

com:

$$M(3000)F2 = MUF(3000)/f_0F2$$

MUF(3000) é a maior frequência que, refratada na ionosfera, pode ser recebida a uma distância de 3.000 km.

$$\Delta M = \frac{0,18}{y-1,4} + \frac{0,096(R_{12} - 25)}{150} \quad \text{Equação 18}$$

em que R_{12} é o número de manchas solares e $y = x$ ou 1,8, o que for maior.

a) Para $x > 3,33$ e $x_r = f/foF2 \geq 1$, onde f é a frequência da onda:

$$h_r = h \text{ ou } 800 \text{ km, o que for menor} \quad \text{Equação 19}$$

em que:

$$h = A_1 + B_1 2,4^{-a} \quad \text{para } B_1 \text{ e } a \geq 0$$

$$h = A_1 + B_1 \quad \text{para } B_1 \text{ e } a < 0$$

com $A_1 = 140 + (H - 47) E_1$

$$B_1 = 150 + (H - 17) F_1 - A_1$$

$$E_1 = -0,09707 x_r^3 + 0,6870 x_r^2 - 0,7506 x_r + 0,6$$

F_1 é tal que:

$$F_1 = -1,862 x_r^4 + 12,95 x_r^3 - 32,03 x_r^2 + 33,50 x_r - 10,91 \quad \text{para } x_r \leq 1,71$$

$$F_1 = 1,21 + 0,2 x_r \quad \text{para } x_r > 1,71$$

e 'a' varia com a distância "d" e com a distância de salto d_s tal como:

$$a = (d - d_s) / (H + 140)$$

em que: $d_s = 160 + (H + 43) G$

$$G = -2,102 x_r^4 + 19,50 x_r^3 - 63,15 x_r^2 + 90,47 x_r - 44,73 \quad \text{para } x_r \leq 3,7$$

$$G = 19,25 \quad \text{para } x_r > 3,7$$

b) Para $x > 3,33$ e $x_r < 1$:

$$h_r = h \text{ ou } 800 \text{ km, o que for menor} \quad \text{Equação 20}$$

em que:

$$h = A_2 + B_2 b \quad \text{para } B_2 \geq 0$$

$$h = A_2 + B_2 \quad \text{para } B_2 < 0$$

$$\text{com } A_2 = 151 + (H - 47) E_2$$

$$B_2 = 141 + (H - 24) F_2 - A_2$$

$$E_2 = 0,1906 Z^2 + 0,00583 Z + 0,1936$$

$$F_2 = 0,645 Z^2 + 0,883 Z + 0,162$$

em que, $Z = x_r$ ou 0,1, o que for maior, e b varia com a distância normalizada d_f , Z e H como segue:

$$b = -7,535 d_f^4 + 15,75 d_f^3 - 8,834 d_f^2 - 0,378 d_f + 1$$

em que: $d_f = \frac{0,115d}{Z(H+140)}$ ou 0,65; o que for menor.

c) Para $x \leq 3,33$:

$$h_r = 115 + HJ + Ud \text{ ou } 800 \text{ km, o que for menor} \quad \text{Equação 21}$$

com $J = -0,7126 y^3 + 5,863 y^2 - 16,13 y + 16,07$

$$e \quad U = 8 \times 10^{-5}(H - 80) (1 + 11 y^{-2,2}) + 1,2 \times 10^{-3} H y^{-3,6}$$

No caso de percursos de até d_{\max} (km), d_{\max} é o comprimento do maior salto para o modo F2 e h_r é calculado no ponto médio do percurso. Para maiores percursos, h_r é determinado em todos os pontos de controle definidos na Tabela 3 e o valor médio é usado.

4.3.2 Intensidade de campo para percursos de até 7.000 km

4.3.2.1 Modos considerados

No caso de até três modos E (para percursos de até 4.000 km) e até seis modos F2, são utilizados os seguintes critérios:

- a) Alturas de reflexão
 - para modos E, $h_r = 110$ km
 - para modos F2, h_r é determinada por:

$$h_r = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176 \text{ km} \quad \text{ou} \quad 500 \text{ km, o que for menor} \quad \text{Equação 22}$$

onde $M(3000)F2$ é calculado no meio do percurso (comprimento do percurso até d_{\max} (km)), ou no ponto de controle dado na Tabela 3 para que se obtenha o valor mais baixo da f_oF2 (comprimentos dos percursos de d_{\max} a 9000 km);

Tabela 3 – Alturas de reflexão dos percursos dos raios

Comprimento do percurso, D (km)	Modos F2
$0 < D \leq d_{\max}$	M
$d_{\max} < D < 9000$	$T + d_0/2, M, R - d_0/2$

Fonte:(UIT-R P.533-8, 2006)

- M: ponto médio do percurso
 T: localização do transmissor
 R: localização do receptor
 d_{\max} : comprimento do maior salto para o modo F2
 d_0 : comprimento do salto do modo de menor ordem

As distâncias são cotadas em quilômetros.

Tabela 4 – Entelamento da Camada E

Comprimento do percurso, D (km)	Modos F2
$0 < D \leq 2000$	M
$2000 < D < 9000$	T + 1000, R – 1000

Fonte: (UIT-R P.533-8, 2006)

- b) Modos E – o modo de menor ordem com comprimento do salto até 2.000 km, e os dois modos de ordem mais alta;
- c) Modos F2 – o modo de menor ordem com um comprimento de salto até d_{\max} (km) e os cinco modos de ordem mais alta, com frequência *screening* máxima na camada E (f_s) menor do que a frequência de operação.

O entelamento³ da camada E (Camada E *screening*) dos modos F2 é considerado para percursos de até 9.000 km (ver Tabela 4). O valor f_{0E} , no ponto médio do percurso (para percursos de até 2.000 km), ou a maior altura em um dos valores f_{0E} nos dois pontos de controle de 1.000 km, em cada extremidade do percurso (para percursos maiores do que 2.000 km), é tomado para o cálculo da frequência *screening* máxima da camada E (f_s).

³ Ocorre entelamento da camada E quando a MUF dessa camada é próxima ou maior do que a frequência de operação. O sinal não pode alcançar a camada F, então, propaga-se em múltiplos saltos na camada E.

$$f_s = 1,05 f_o E \sec i \quad \text{Equação 23}$$

com:

$$i = \arcsin\left(\frac{R_0 \cos \Delta_F}{R_0 + h_r}\right) \quad \text{Equação 24}$$

em que:

i: ângulo de incidência na altura $h_r = 110$ km

R_0 : raio da Terra, 6371 km

Δ_F : ângulo de elevação para o modo da camada F2 (determinado na Equação 15)

4.3.2.2 Determinação da intensidade de campo

Para cada modo w selecionado no § 4.3.2.1, a intensidade de campo média é dada por:

$$E_w = 136,6 + P_t + G_t + 20 \log f - L_b \quad \text{dB}(\mu\text{V} / \text{m}) \quad \text{Equação 25}$$

em que:

f: frequência de transmissão (MHz)

P_t : potência do transmissor (dB(1 kw))

G_t : ganho da antena transmissora, no ângulo de azimute requerido, e ângulo de elevação (Δ), relativo a uma antena isotrópica (dB)

L_b : perda no percurso de transmissão do modo, dada por:

$$L_b = 32,45 + 20 \log f + 20 \log p' + L_i + L_m + L_g + L_h + L_z \quad \text{Equação 26}$$

com:

p' : alcance do ponto virtual (km)

$$p' = 2R_0 \sum_1^n \left[\frac{\text{sen}(d/2R_0)}{\cos[\Delta + (d/2R_0)]} \right] \quad \text{Equação 27}$$

em que Δ é calculada pela Equação 15 e R_0 é o raio da Terra.

L_i : Perda por absorção (dB) para o modo de n saltos, que é dada por:

$$L_i = \frac{n(1 + 0,0067R_{12}) \cdot \sec i}{(f + f_L)^2} \cdot \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k AT_{\text{meio-dia}} \cdot \frac{F(\chi_j)}{F(\chi_{\text{jmeio-dia}})} \cdot \varphi_n \left(\frac{f_y}{f_oE} \right) \quad \text{Equação 28}$$

com:

$$F(\chi) = \cos p(0,881 \chi) \text{ ou } 0,02, \text{ o que for maior} \quad \text{Equação 29}$$

em que:

$$f_y = f \cos i \quad \text{Equação 30}$$

e

i : ângulo de incidência em 110 km;

k : número de pontos de controle (da Tabela 3);

f_L : média dos valores de girofrequência do elétron, sobre a componente longitudinal do campo magnético da Terra, para uma altura de 100 km, determinado nos pontos de controle dados na Tabela 3.

Tabela 5 – Absorção ionosférica e associação à girofrequência⁴ do elétron

Comprimento do percurso, D (km)	Modos E	Modos F2
$0 < D \leq 2000$	M	M
$2000 < D < 4000$	T + 1000, M, R - 1000	-
$2000 < D \leq d_{\max}$	-	T + 1000, M, R - 1000
$d_{\max} < D < 9000$	-	T+1000, T + $d_0 / 2$, M, R - $d_0 / 2$, R - 1000

Fonte: (UIT-R P.533-8, 2006)

M: ponto médio do percurso

T: localização do transmissor

R: localização do receptor

d_{\max} : comprimento do maior salto para o modo F2

d_0 : comprimento do salto do modo de menor ordem

As distâncias são cotadas em quilômetros.

Os cálculos das perdas a seguir encontram-se na Recomendação UIT-R P533-8.

L_m : Perda no uso de frequências acima da MUF. Para frequência menor ou igual a MUF de determinado modo, a perda L_m é igual a zero. A perda L_m pode chegar a 81 dB, para modos de propagação que refletem na camada E, e 62 dB para modos que refletem na camada F2.

L_g : Perda total devido a reflexões da onda na terra.

$L_g = 2(n-1)$ dB, em que n é o número de saltos.

⁴ Girofrequência consiste na oscilação natural de partículas carregadas quando estão submetidas a campos magnéticos. É conhecida como frequência fundamental da ionosfera (BISPO, 2001).

L_h : Perda auroral. Para latitudes geomagnéticas menores do que $42,5^\circ$ a perda L_h é igual a zero. A maior perda L_h se dá entre as latitudes de $67,5^\circ$ e $72,5^\circ$, que é de 21,4 dB, e ocorre no período das 7 às 10 horas no equinócio.

L_z : Perda por efeitos da propagação ionosférica não incluída neste método. Recomenda-se o valor de 9,9 dB.

4.4 Relação sinal/ruído para várias percentagens de tempo

A intensidade de campo da onda ionosférica, a potência disponível no receptor e a relação sinal/ruído podem ser determinadas por uma percentagem especificada de tempo em relação aos desvios horários e diários dos sinais e do ruído. Na ausência de outros dados, é permitido o uso dos limites de desvanecimento de sinal, para curto prazo, adotados pela WARC HFBC⁵ – 87, com um desvio decil⁶ superior de 5 dB e um desvio decil inferior de 8 dB. Para desvanecimento do sinal em longo prazo, os desvios decis são tomados como uma função da taxa de frequência de operação, para o percurso da MUF, conforme a Tabela 2 da Recomendação UIT-R P.842. No caso do ruído atmosférico, os desvios decis de potência de ruído, que surgem da variabilidade diária, estão na Recomendação UIT-R P.372-8. Para o ruído produzido pelo homem, na ausência de informação direta na variabilidade temporal, os desvios decis estão na Tabela 14 (anexo A, no Capítulo 8). O decil da combinação da variabilidade horária e diária do ruído galáctico é de $\pm 2 \text{ dB}$.

A taxa sinal-ruído excedida 90% do tempo é dada por:

$$S / N_{90} = S / N_{50} - \left(S_{wh}^2 + S_{dd}^2 + N_{dd}^2 \right)^{1/2} \quad \text{Equação 31}$$

em que:

S_{wh} : é o desvio decil inferior do sinal desejado da intensidade de campo média horária que surge com as mudanças horárias (dB);

⁵ WARC HFBC – 87, *World Administrative Radio Conference* para o planejamento de alocação de bandas em HF para o serviço de *broadcast* (Geneva, 1987).

⁶ Decil é a divisão de dados em dez subgrupos iguais.

S_{dd} : é o desvio decil inferior do sinal desejado da intensidade de campo média mensal que surge com as mudanças diárias (dB);

N_{dd} : é o desvio decil superior do ruído da intensidade de campo média mensal que surge com as mudanças diárias (dB).

Para outras percentagens de tempo, os desvios podem ser obtidos através da distribuição log-normal encontrada na Recomendação UIT – R P.1057.

4.5 Confiabilidade básica do circuito em sistemas digitais

A confiabilidade básica de um circuito é definida na Recomendação UIT-R P.842. Nesse documento, a confiabilidade é definida como sendo a probabilidade de que o critério (i.é., a relação sinal-ruído especificada) de desempenho especificado seja obtido. Para os sistemas modulados digitalmente, a confiabilidade é a percentagem de tempo (descrita no item 4.4) em que a relação sinal-ruído requerida é realizada. Os sistemas com modulação digital são bastante robustos em relação ao tempo e ao espalhamento de frequência do sinal recebido. Portanto, estes parâmetros são usados para a avaliação da confiabilidade de tais sistemas.

4.5.1 Parâmetros do sistema

Para cada técnica de modulação, a estimativa de confiabilidade é baseada em quatro parâmetros:

- Relação sinal-ruído requerida, $(S/N)_r$: É a relação entre o somatório das potências dos modos do nível médio do sinal, a cada hora, e o ruído. Atender a este valor de relação $(S/N)_r$ é necessário para obter o desempenho específico.

- Relação de Amplitudes, A: Para cada modo de propagação o valor médio horário da intensidade de campo é previsto através da potência do transmissor e do ganho da antena para aquele modo. O modo mais forte em um certo horário é determinado, e a relação de amplitudes (A) é a relação entre a intensidade de um modo subdominante e o modo dominante, que afeta o desempenho do sistema se o sinal chegar com um retardo de tempo além da T_w ou com um espalhamento de frequência maior do que F_w .
- Janela de tempo, T_w : Intervalo de tempo dentro do qual os modos do sinal contribuem para o desempenho do sistema. Quando os modos chegam além deste intervalo ocorre redução no seu desempenho.
- Janela de frequência, F_w : Intervalo de frequência dentro do qual os modos de propagação contribuem para o desempenho do sistema. Quando os modos chegam além deste intervalo, ocorre redução no seu desempenho.

4.5.2 Retardo no tempo

O retardo no tempo de um modo individual de propagação é dado por:

$$\tau = \left(\frac{p'}{c} \right) \times 10^3 \text{ (ms)}$$

Equação 32

em que:

p' : alcance do ponto virtual (km) dado pela Equações 27;

c : velocidade da luz (km/s) no espaço livre.

4.5.3 Procedimento para a predição da confiabilidade

O procedimento proposto pela Recomendação UIT-R P.533-8, para percursos⁶ de até 9.000 km, é descrito nos seguintes passos:

- 1) a intensidade do modo de propagação dominante (E_w) é determinada usando o método dado no item 4.3;
- 2) são identificados os demais modos ativos com intensidades excedidas ($E_w - A$ (dB));
- 3) dos modos identificados nos passos 1) ou 2), o primeiro modo, ao chegar, é identificado, e todos os modos dentro da janela de tempo (T_w) são identificados e medidos, a partir desse primeiro modo;
- 4) para percursos de até 7.000 km, faz-se um somatório de potência dos modos que chegam dentro da janela. Para percursos entre 7.000 e 9.000 km é usado o procedimento de interpolação descrito na UIT-R P.533-8. O circuito de confiabilidade é determinado pela Tabela 1 da Recomendação UIT-R P.842 e a relação sinal-ruído requerida $(S/N)_r$ encontra-se no passo 10 dessa Tabela;
- 5) se algum dos modos ativos, identificados no passo 2) acima, tem retardo diferencial além da janela (T_w), a redução da confiabilidade devida a esses modos é determinada por um método similar ao de confiabilidade do circuito total encontrado na Tabela 3 da Recomendação UIT-R P.842;
- 6) além do espalhamento, que varia conforme a região geográfica e o horário, também se prevê que o deslocamento de frequência, devido às reflexões das camadas ionosféricas, é da ordem de 1 Hz, e este método assume que tais deslocamentos de frequência são insignificantes.

⁶ Para percursos acima de 9.000 km o procedimento se encontra na Recomendação UIT-R P.533-8.

5 MEDIÇÕES EM CAMPO

O capítulo 4 apresentou a predição de propagação da onda radioelétrica na faixa de HF, segundo a UIT-R P.533-8. Concluindo o estudo desenvolvido nesta dissertação, este capítulo realiza uma comparação entre a teoria descrita na citada Recomendação e medidas experimentais. Para o estudo prático da propagação ionosférica em HF, as medidas foram realizadas em uma estação receptora em HF, instalada na área do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Telecomunicações (CPqD) de Campinas - São Paulo. O local possui relevo plano, raras edificações em torno da estação e muitas árvores. Foram recebidas mensagens transmitidas por uma estação similar à receptora, localizada em Brasília. O experimento foi efetivado no período de 23 a 27 de julho de 2007, quando o número de manchas solares encontrava-se em torno de zero. A seguir, estão relacionados os objetivos destas medições:

- 1) comparar os cálculos teóricos de predição da propagação ionosférica, baseados na Recomendação UIT-R P.533-8, com medidas reais de comunicações com voz e dados;
- 2) investigar o desempenho de MODEM para transmissões de dados em HF, avaliando o comportamento do sistema, afetado por variações na qualidade de propagação;
- 3) verificar os níveis de sinal por meio de medidas na antena de um sistema de comunicações em HF, operando em condição real.

5.1 Local dos Ensaios

Os ensaios foram realizados nas dependências do CPqD, em Campinas, São Paulo, na área de testes indicada na foto da Figura 12.



Figura 12 – Local dos testes (vista aérea)

5.2 Infra-Estrutura para a Realização das Medições

Para a experiência realizada, foram utilizados os seguintes recursos:

- duas estações de comunicações transportáveis em HF (uma instalada em Brasília e outra em Campinas), preparadas para estabelecer enlaces de HF por meio de voz e dados;
- faixa de frequências de operação em HF: 3 MHz a 30 MHz;
- equipamentos transceptores sintetizados, operando em toda a faixa HF;
- sistema de estabelecimento de enlace HF: TRANSCALL/SELCALL;
- sistemas irradiantes transportáveis para a faixa de HF;

- protocolo de estabelecimento do enlace de dados HF, XCLOVER;
- frequências na faixa de HF, disponibilizadas pelo Comando da Aeronáutica;
- *softwares* de propagação em HF, com previsão da MUF, FOT, LUF, disponibilidade dos enlaces, taxa sinal/ruído e nível de sinal recebido;
- *software* DTS (*Data Transmission System*), para transmissão de dados em HF, acoplado ao MODEM digital;
- equipamentos, analisadores de espectro e computadores portáteis.

As especificações dos equipamentos encontram-se no anexo C. A Figura 13 mostra os equipamentos utilizados, *in loco*, durante as medições em campo.



Figura 13 – Equipamentos utilizados

5.3 Sistemas do Transceptor

Os sistemas disponíveis no transceptor são o TRANSCALL, SELCALL e o ALE, definidos a seguir:

- a) TRANSCALL – Realiza um gerenciamento automático de frequência, que examina todos os canais programados no equipamento e, depois, escolhe o melhor entre eles. Para fazer isso, tenta sincronizar o transceptor e o receptor envolvidos no enlace e envia sinais de teste em cada canal disponibilizado. A maior desvantagem desse processo é o tempo de processamento, que é longo.
- b) SELCALL – É um sistema que efetua chamadas seletivas em um canal predeterminado, necessitando, porém, de coordenação ou conhecimento prévio de uma frequência boa para o enlace, pelo fato do canal ser escolhido pelo operador.

Observação: No caso do transceptor utilizado o TRANSCALL e o SELCALL são protocolos proprietários e estão residentes em um *software* na mesma placa.

- c) ALE – Examina uma lista de frequências pré-selecionadas com um programa controlado por computador e realiza uma avaliação da qualidade de enlace (LQA – *Link Quality Analysis*) em cada frequência examinada. A avaliação é realizada usando a taxa de erros de bits (BER – *Bit Error Rate*) para a transmissão de um pacote de dados conhecido. A BER é também diretamente relacionada à relação sinal-ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*). A frequência com BER mais baixa ou a SNR mais alta é então selecionada a enviar e receber tráfego no enlace HF. Esse processo de obter a frequência ótima em tempo real permite que o sistema ALE encontre um canal com a melhor condição de propagação, isto é, a SNR mais alta. Como o desempenho de rádio em HF é limitado pelo ruído externo, a SNR é gerada pela combinação dos ruídos produzidos pelo homem, galáctico e da atmosfera. O ruído em RF diminui exponencialmente com o aumento da frequência.

5.4 MODEM

5.4.1 Protocolo de estabelecimento de enlace do MODEM

O MODEM 5300 utiliza a forma de onda CLOVER-2000 para estabelecimento de enlace de dados em HF. CLOVER é o nome de uma série ou de uma classe de técnicas de modulação (formas de onda) do MODEM, especificamente projetado para ser utilizado em rádios de altas frequências – HF (CLOVER-II WAVEFORM PROTOCOL, 1997). A CLOVER-2000 é a versão com mais alta taxa de dados e maior largura de faixa. A sua forma de onda usa oito tons em rajadas (*bursts*), com espaçamento de 250 Hz. As frequências dos tons utilizadas na CLOVER-2000 são indicadas na Tabela 6. Os analisadores de espectro baseados em Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) trabalham através da digitalização do sinal de interesse usando um conversor analógico/digital. Os valores armazenados são, então, processados usando o algoritmo de FFT. A vantagem deste método é que o espectro de uma forma de onda de um ciclo de curta duração pode ser capturado (IMPAC, 2008).

Tabela 6 – Frequências dos tons CLOVER 2000

Tom	Frequência
Fc (central)	1500 Hz
1	625 Hz
2	1625 Hz
3	875 Hz
4	1875 Hz
5	1125 Hz
6	2125 Hz
7	1375 Hz
8	2375 Hz

Fonte: (CLOVER-II WAVEFORM PROTOCOL, 1997)

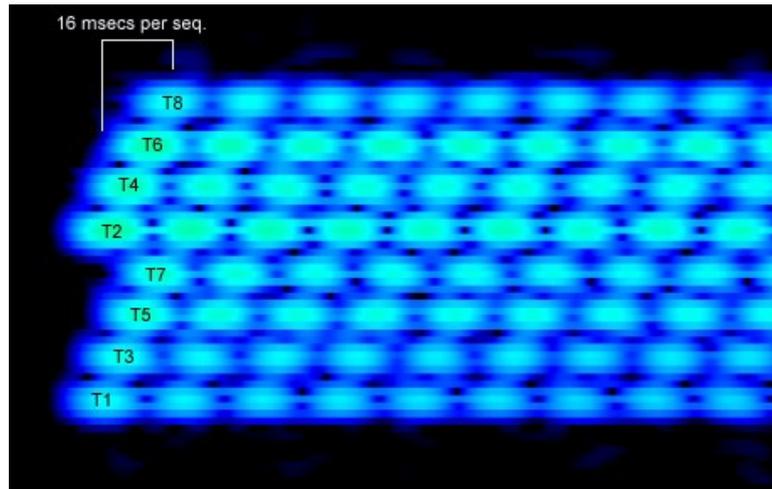


Figura 14 – Espectro FFT *versus* tempo e frequência

Fonte: (CLOVER-2000/XCLOVER WAVEFORM)

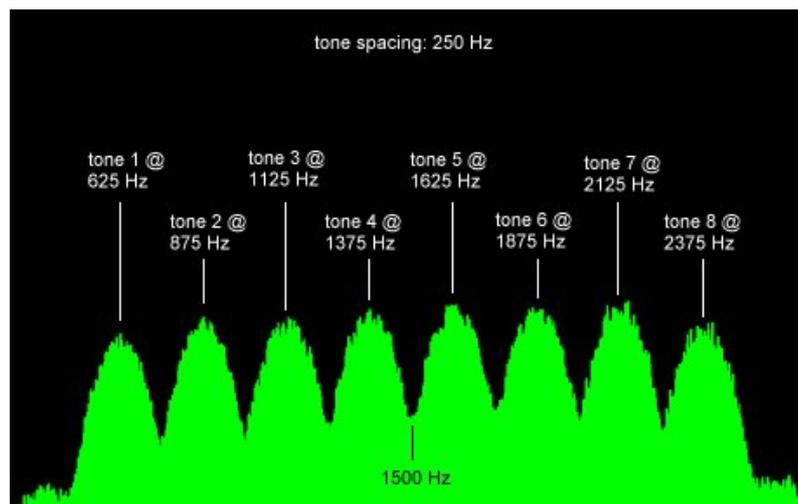


Figura 15 – Espectro FFT *versus* frequência e intensidade do sinal

Fonte: (CLOVER-2000/XCLOVER WAVEFORM)

Os tons em rajadas (*bursts*) não são transmitidos em uma certa ordem de frequências, mas em seqüência de tons (Figuras 14 e 15), na qual são enviados dados pelo circuito. O espaçamento utilizado, ou seja, a seqüência de frequências tem o objetivo de minimizar a interferência de tom-canal adjacente. A seqüência é enviada com dois milisegundos (ms) de espaçamento entre cada tom. Uma seqüência completa ocorre em 16 ms, que corresponde ao quadro (*frame*) da CLOVER-2000. Os oito tons em rajadas são, então, combinados para produzir o composto diagramado na Figura 16. A Figura 17 mostra uma representação tridimensional da amplitude, tempo e frequência do sinal sendo modulado na CLOVER-2000.

A eficiência espectral de um sinal CLOVER 2000 está ilustrada na Figura 18, em que o espectro é obtido usando-se a amplitude formada pelos 8 tons.

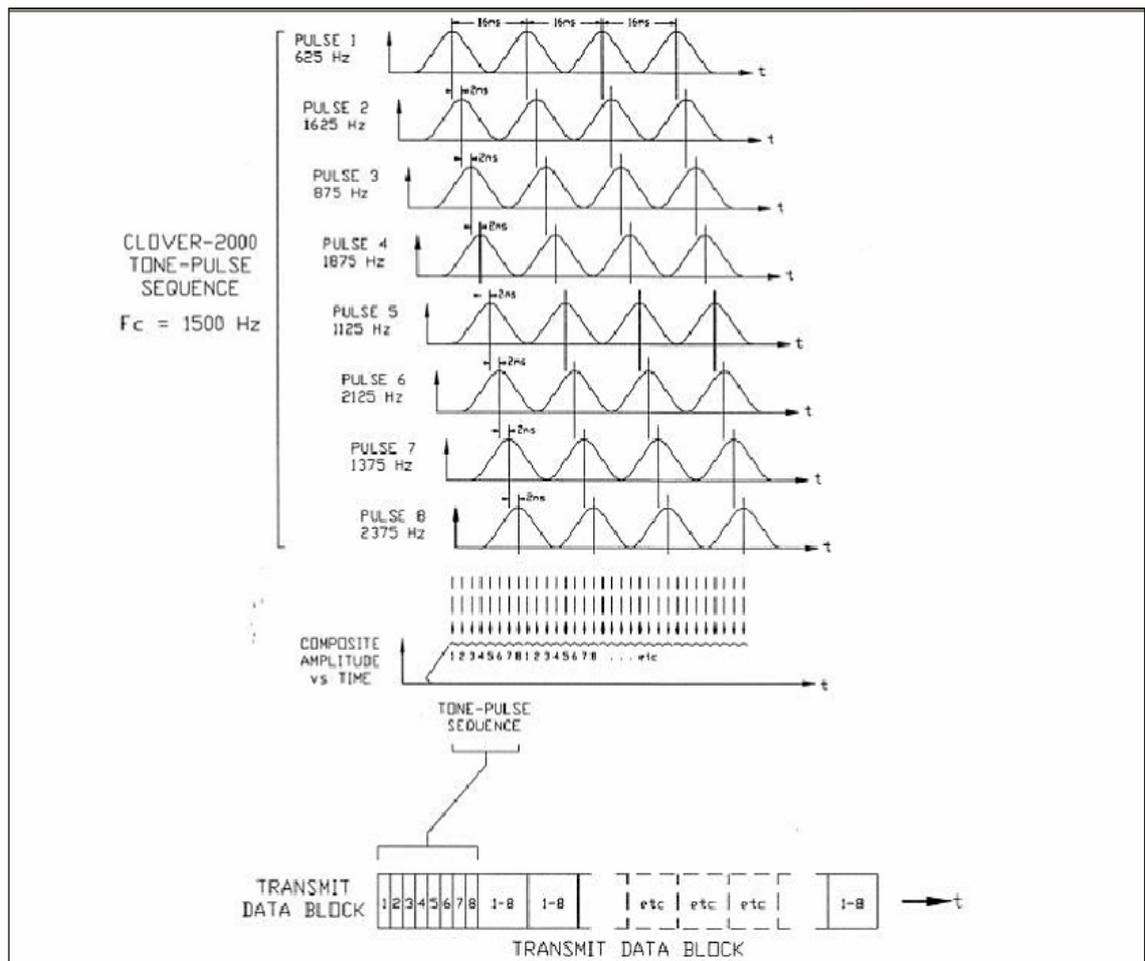
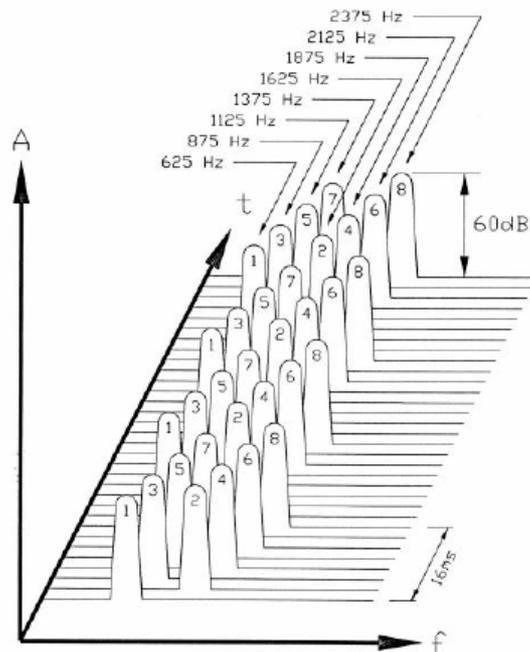


Figura 16 – Seqüência de tons CLOVER-2000

Fonte: (CLOVER-II *WAVEFORM PROTOCOL*, 1997)



Espectro de tons CLOVER 2000

Seqüência de Frequência = 625-1625-875-1875-1125-2125-1375-2375 Hz

Figura 17 – Relação tempo/frequência CLOVER-2000

Fonte: (CLOVER-II *WAVEFORM PROTOCOL*, 1997)

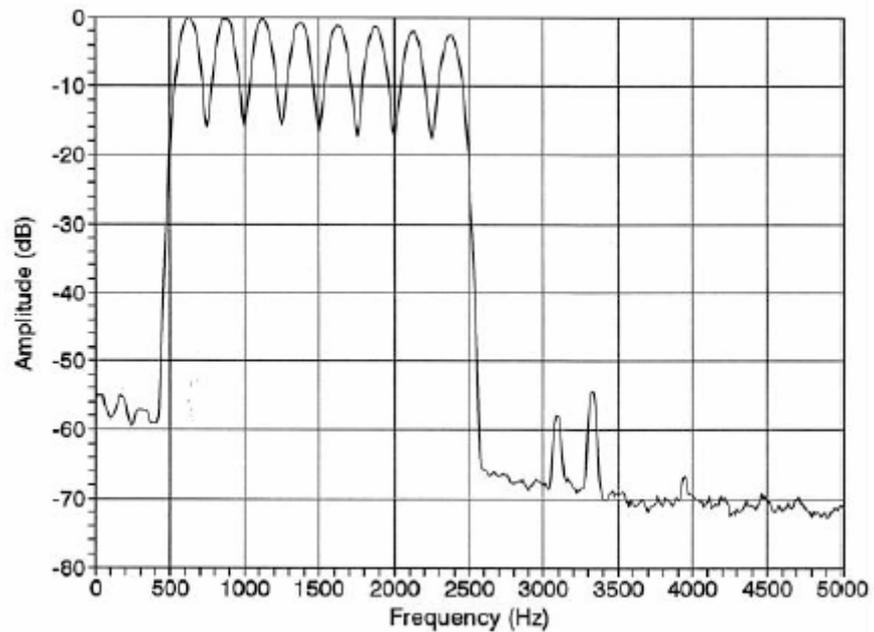


Figura 18 – Espectro de frequência CLOVER-2000

Fonte: (CLOVER-II *WAVEFORM PROTOCOL*, 1997)

5.4.2 Modulação dos Dados

Ao modular o dado no sinal CLOVER-2000, a fase e/ou amplitude dos tons pode variar. Uma característica da CLOVER 2000 é que toda modulação de dados é diferencial no mesmo tom; o dado é representado pela diferença de fase (ou amplitude) de um pulso para o outro. A CLOVER-2000 usa oito tons e seu espectro é o mesmo para todas as formas de modulação. A fase e/ou amplitude de cada tom é modulada e demodulada como uma faixa estreita separada, do canal de dados. O espaçamento entre os *frames* dos tons é fixado em 16 ms e, por conseguinte, a taxa base de modulação de um sinal CLOVER-2000 será sempre de 62,5 símbolos/segundo (1/0,016). A baixa taxa de símbolos faz com que a demodulação CLOVER-2000 seja extremamente resistente à distorção largura/atraso do tom, causada pelo múltiplo percurso da propagação em HF. Por exemplo, o tempo de dispersão, no sinal recebido é, normalmente, de um a cinco milissegundos, causado pela distorção do multipercurso em HF.

A CLOVER 2000 usa múltiplos canais de tom para aumentar a taxa *throughput* efetiva de dados. Ao usar o modo de modulação BPSM, o mesmo formato de modulação é aplicado nos oito tons da CLOVER 2000. Então, oito bits de dados são enviados pela modulação diferencial de fase binária, para cada *frame* de tons de 16 ms. Ainda que a taxa base de modulação seja de apenas 62,5 *bits* por segundo (bps), a taxa de dados efetiva usando BPSM em todos os oito tons é oito vezes àquela, ou seja, 500 bps. Essa é uma forma em que a CLOVER-2000 envia dados em uma taxa de dados relativamente alta, mas mantém uma taxa de símbolos muito baixa.

Da mesma forma que o uso de múltiplos tons aumenta o *throughput* de dados, a CLOVER-2000 também utiliza modulação de fase diferencial multinível, em cada tom do pulso, para aumentar a taxa de dados efetiva. Por exemplo, se cada pulso é modulado usando QPSM (*Quad Phase Shift Modulation*), a fase diferencial de cada pulso pode ser trocada em incrementos de 90 graus, dois bits de dados modulados em cada tom do pulso, e 16 bits de dados enviados em cada quadro tom-pulso em 16 ms. Isso aumenta a taxa de dados da rede em 16 vezes a taxa base (para 1.000 bps). Da mesma forma, o uso de 8PSM com três bits de dados modulados em cada tom do pulso, e 24 bits de dados enviados em cada *frame* em 16 ms, proverá uma taxa de *bit* efetiva de 1.500 bps. Apesar do formato de modulação, a taxa base de símbolos, para o tom CLOVER-2000, permanece em 62,5 bps e o espectro total fica como ilustra a Figura 18.

Os modos de modulação requerem sinais muito estáveis e alta precisão do detector. Considerando, por exemplo, que a modulação de 16 níveis de fase use troca de fase em 22,5 graus para representar o estado de quatro bits de dados por tom em pulso, para detectar precisamente esta troca, o *jitter* ou dispersão causada pela propagação deve ser menor do que, aproximadamente, 11 graus. Além disso, o detector do receptor deve ser capaz de resolver trocas de fase tão pequenas como 11,25 graus aproximadamente, o que significa que a referência interna de fase para detecção deve dispor de fase muito estável.

Como as condições de propagação HF são instáveis e podem ocorrer deteriorações rápidas das condições ideais, a CLOVER-2000 inclui vários modos de modulação robustos, como também, modos rápidos. Um total de dez modos de modulação diferencial são originalmente definidos pelo uso da CLOVER-2000. Os modos de modulação múltipla permitem que a CLOVER opere em uma ampla faixa de condições ionosféricas. Os testes de vários modos mostraram que seis desses são particularmente bem adequados para comunicações HF. Um desses modos, o 2DPSM (2-Diversidade Canal BPSM), possui taxa de 250 bps, é usado somente para *broadcast* e não foi empregado nos testes. Os demais modos de modulação da CLOVER-2000 utilizados neste trabalho são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Modos de Modulação – CLOVER-2000

MODULAÇÃO	DESCRIÇÃO	TAXA EFETIVA de BIT
BPSM	Troca de Fase: Binária	500 bps
QPSM	Troca de Fase: 4-níveis	1000 bps
8PSM	Troca de Fase: 8-níveis	1500 bps
8P2A	8 Fases 2 Amplitudes	2000 bps
16P4A	16 Fases 4 Amplitudes	3000 bps

Fonte: (CLOVER-II *WAVEFORM PROTOCOL*, 1997)

5.4.3 Detecção e Correção de Erros

Na propagação em HF ocorrem severas distorções nos sinais, causando erros e perda de dados. A tarefa do equipamento MODEM HF é admitir a ocorrência da distorção ionosférica e ajustar, corrigir ou compensar o sinal, recuperando-o para minimizar os erros ou a perda de dados. A CLOVER-2000 usa códigos do tipo FEC (*Forward Error Correction*), que permite a correção de erros pela estação receptora sem repetição da transmissão. O modo FEC é considerado a correção de erro primária na CLOVER e é também conhecido por *broadcast*, pois permite a transmissão para mais de uma estação receptora. O código Reed-Solomon é usado em todos os modos da CLOVER.

A utilização de blocos de dados orientados para a transmissão em HF é adequada, pois erros devidos a desvanecimentos ou interferências são freqüentes, causando destruição total de um número de seqüências de bits de dados. Os dados da CLOVER 2000 são enviados em blocos de comprimento fixo de 17, 51, 85 ou 255 *bytes*. A correção de erro, no receptor, é determinada por *bits* de checagem, que são inseridos em cada bloco pelo transmissor. O receptor usa esses *bits* de checagem para reconstruir os dados que foram deformados durante a transmissão. A capacidade da correção de erro para recuperar as informações é limitada, pois *bits* de checagem são *overhead* no sinal e sua adição reduz a eficiência de transmissão.

A CLOVER-2000 tem três opções de taxa de código Reed-Solomon (eficiência): 60%, 75% e 90%. Eficiência 60% corrige mais erros, mas tem o *throughput* de dados da rede mais baixa. Eficiência 90% tem o *throughput* mais alto, porém corrige poucos erros. Existe, portanto, um *throughput* de dados bruto multiplicado pelo número de erros que pode ser corrigido com a retransmissão do bloco de dados.

5.4.4 Protocolo ARQ

A transmissão de dados da CLOVER-2000 usa protocolos FEC ou ARQ. Para coordenar o uso desses protocolos é utilizado o sinal de controle CCB (*Control Block*). O CCB informa, ao MODEM de recepção, detalhes dos blocos de dados que seguirão. Esse bloco de controle é sempre enviado sob um formato de onda robusto. O protocolo ARQ da

CLOVER-2000 fornece a adaptação e a correção de erro nas comunicações entre duas estações. É um modo ponto a ponto, com as vantagens da forma de onda adaptativa, o qual controla e faz correção de erros através da repetição da transmissão efetuada pelas duas estações. O MODEM receptor envia comando para o MODEM transmissor indicando qual formato de modulação deverá ser usado na próxima transmissão. Esse processo de seleção, de formato de modulação ótimo, permite que a CLOVER opere satisfatoriamente, independente de multipercorso e outras degradações de propagação em HF.

O modo ARQ usa um protocolo de duas camadas. A mais baixa, que é a camada de protocolo CCB (camada básica), envolve somente a troca de blocos de controle CLOVER entre as duas estações ARQ. Nesta camada é sempre usado o seguinte formato de onda: modulação BPSM, bloco com tamanho constante de 17 *bytes* e eficiência de 60%. Todas as operações de manutenção de enlace são desenvolvidas no nível CCB. Essa estrutura assegura que a integridade do enlace ARQ seja sempre preservada. A segunda camada do protocolo ARQ é a de bloco de dados, por onde se transmite grande volume de dados. A camada de bloco de dados ARQ usa blocos longos e formas de onda de modulação, com taxa de transmissão elevada, para acelerar a transferência de dados.

O modo AUTO-ARQ (modo ARQ adaptativo) oferece três estratégias para atacar os problemas de distorção do sinal de dados em HF.

1. Controle da forma de onda da modulação. O demodulador CLOVER 2000 mede a taxa S/N, frequência *offset*, dispersão de fase, e a carga do corretor de erros em todos os blocos de dados recebidos. A condição do sinal que está sendo propagado é conhecida e usada na comparação com os parâmetros enviados pela estação transmissora, efetuando-se adaptações, se necessário;
2. FEC Reed-Solomon em todos os dados transmitidos. Usando a eficiência NORMAL, um total de *bytes* de dados com defeito deve ser reparado por todos os 188 *bytes* transmitidos, sem requisição de repetição de transmissão;
3. Protocolo *Selective Repeat* ARQ . Quando os erros do *byte* no modo ARQ excedem a capacidade do decodificador Reed Solomon, somente os blocos danificados são repetidos.

As eficiências do protocolo ARQ são denominadas: ROBUSTA, NORMAL e RÁPIDA, e os parâmetros do modo ARQ são ilustrados na Tabela 8. A eficiência

estabelecida do AUTO-ARQ é usada para controlar a estratégia de comutação do modo de modulação.

A eficiência ROBUSTA é a que corrige mais erros, mas tem menor *throughput*. É usada em situações em que as condições são mantidas em um percurso instável, sem levar em conta o *throughput* de dados. Este modo é mais usado quando a frequência de operação está abaixo de 7 MHz (condição de multipercurso elevado). A eficiência ROBUSTA usa 60% da eficiência do codificador *Reed-Solomon*. Em um bloco de 255 bytes são enviados somente 150 bytes de dados e um total de 50 bytes de erros deste bloco (1/3 do número enviado) é corrigido, sem repetir a transmissão.

Tabela 8 – Modo ARQ CLOVER - 2000 – *Timing* da camada de bloco de dados

Taxa	Modulação	Bloco	Bytes/ Frame	Max Erros	Período do Bloco	Blocos/ Frame	Período do Frame ARQ	<i>Throughput</i> Bytes/seg
165	16P4A	255	900	300	688 seg	6	5440 seg	165,4
110	8P2A	255	600	200	1024 seg	4	5440 seg	110,3
83	8PSM	255	450	150	1360 seg	3	5440 seg	82,7
55	QPSM	255	300	100	2048 seg	2	5440 seg	55,1
28	BPSM	255	150	50	4080 seg	1	5440 seg	27,6

a) Eficiência ROBUSTA (60%)

Taxa	Modulação	Bloco	Bytes/ Frame	Max Erros	Período do Bloco	Blocos/ Frame	Período do Frame ARQ	<i>Throughput</i> Bytes/seg
207	16P4A	255	1128	186	688 seg	6	5440 seg	207,4
138	8P2A	255	752	124	1024 seg	4	5440 seg	138,2
104	8PSM	255	564	93	1360 seg	3	5440 seg	103,7
69	QPSM	255	376	62	2048 seg	2	5440 seg	69,1
35	BPSM	255	188	31	4080 seg	1	5440 seg	34,6

b) Eficiência NORMAL (75%)

Taxa	Modulação	Bloco	Bytes/ Frame	Max Erros	Período do Bloco	Blocos/ Frame	Período do Frame ARQ	<i>Throughput</i> Bytes/seg
249	16P4A	255	1356	72	688 seg	6	5440 seg	249,3
166	8P2A	255	904	48	1024 seg	4	5440 seg	166,2
125	8PSM	255	678	36	1360 seg	3	5440 seg	124,6
83	QPSM	255	452	24	2048 seg	2	5440 seg	83,1
42	BPSM	255	226	12	4080 seg	1	5440 seg	41,5

c) Eficiência RÁPIDA (90%)

Fonte: (CLOVER - II WAVEFORM & PROTOCOL, 2006)

A eficiência RÁPIDA usa um mínimo de correção de erros no bloco e rapidamente muda para os modos de taxa alta. Este modo maximiza o *throughput* de dados e é mais usado em percursos com frequências estáveis; usa 90% da eficiência do codificador, enviando 226 *bytes* de dados por bloco, corrigindo até 12 *bytes* de erros em cada bloco.

A eficiência NORMAL fornece um balanço operacional entre correção de erro, *throughput*, e a sensibilidade de troca de taxa. O modo NORMAL usa 75% de eficiência, enviando 188 *bytes* de dados por bloco e corrige 31 *bytes* de erro em cada bloco. A Figura 19 ilustra as medidas de desempenho do *throughput* de dados do modo CLOVER-2000 para as três condições de eficiências, e a Figura 20, os espectros dos sinais de modulação.

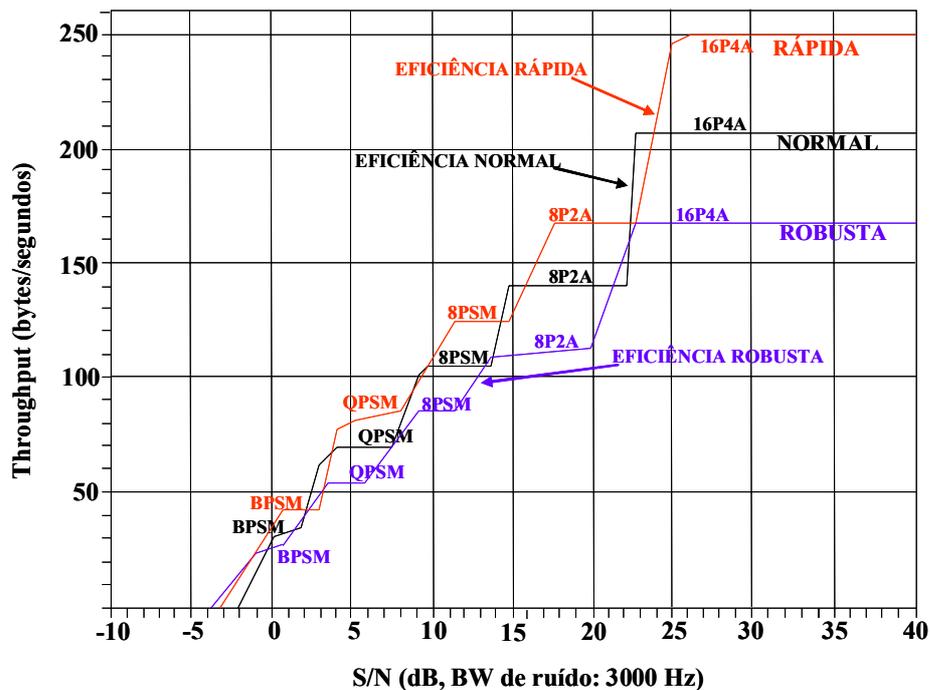
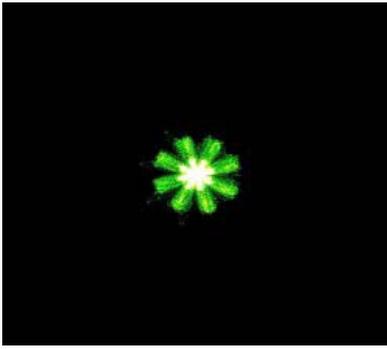
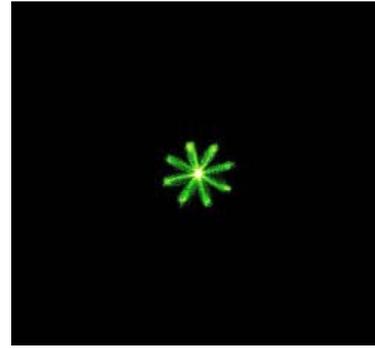


Figura 19 – SNR versus taxa de dados da CLOVER-2000

Fonte: (CLOVER - II WAVEFORM & PROTOCOL, 2006)



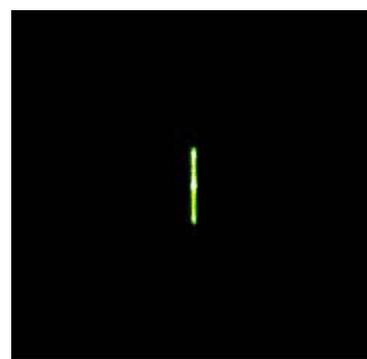
a) Espectro plano de fase de um sinal 8P2A



b) Espectro plano de fase de um sinal 8PSM



c) Espectro plano de fase de um sinal QPSM



d) Espectro plano de fase de um sinal BPSM

Figura 20 – Espectros dos sinais de modulação

Fonte: (CLOVER-2000/XCLOVER WAVEFORM, 2006)

O modo ARQ pode enviar os dados em uma única direção ou em ambas as direções, sendo a seleção automática e dinâmica. O modo em uma direção envia dados em um certo tempo e requer o uso de um comando para trocar a direção do fluxo de dados. No caso em que ambas as estações têm uma quantidade elevada de dados para transmitir, é usado o “modo bloco” e o fluxo de dados no canal de comunicações alterna a direção de cada *frame* ARQ (aproximadamente 5,5 segundos). Esta configuração é chamada “modo ARQ de duas direções”, em que os transmissores e receptores comutam *ON* e *OFF* alternadamente. O modo não é *Full-Duplex*, pois os dados não são transmitidos em ambas as direções simultaneamente. O modo a ser usado é determinado pela quantidade de dados a ser transmitida. O modo ARQ ajusta-se sempre de modo a usar eficientemente o tempo disponível no canal de comunicações. A CLOVER-2000 é, portanto, eficiente na largura de banda e também no tempo.

5.5 Sistema irradiante

Para as comunicações em HF, além do transceptor, analisador de espectro e MODEM, fez-se uso de um dipolo de banda larga, como ilustrado na Figura 21.

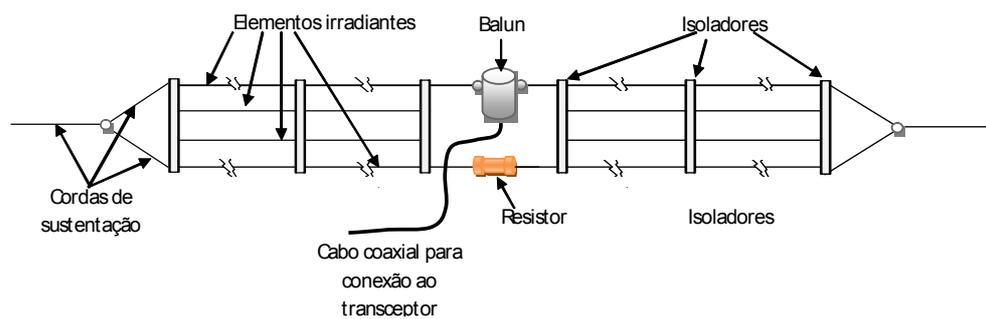


Figura 21 – Esquema da antena dipolo de banda larga

Utilizou-se o transceptor HF como padrão para teste da antena. Assim, antes de conectá-lo ao sistema irradiante, foi realizado um levantamento da resposta do equipamento na faixa de 3 a 30 MHz, em passos de 1 MHz, com o objetivo de verificar o seu desempenho.

O equipamento demonstrou possuir resposta plana nas faixas de frequências verificadas (100 watts em todas as frequências avaliadas). Após esses testes, a carga foi substituída pela antena dipolo de banda larga, e todas as frequências foram novamente verificadas. As potências direta e refletida foram medidas no wattímetro.

O gráfico da Figura 22 consolida o levantamento, mostrando as potências direta e refletida, medidas no dipolo, na faixa de frequências na qual foram estabelecidos os enlaces. Este gráfico mostra que a antena apresentou uma resposta satisfatória na faixa de frequências utilizada, o que permite aceitar os valores obtidos nas várias medições realizadas e desprezar pequenos desvios, eventualmente encontrados.

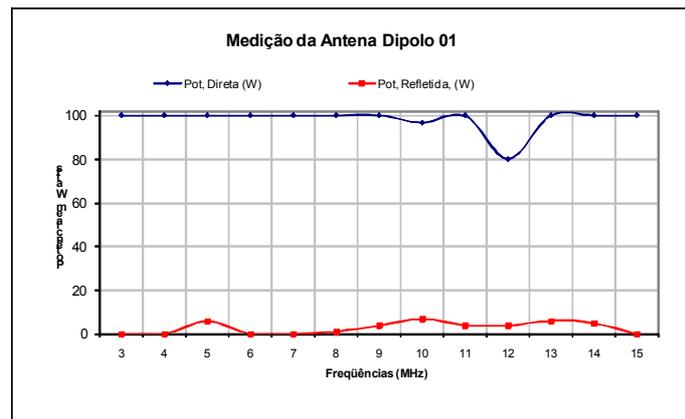


Figura 22 – Potência direta e refletida medidas no dipolo

5.6 Procedimentos das Medições

Os testes foram realizados nos períodos da manhã, tarde e, em alguns dias até a noite. Os dados coletados foram registrados na Tabela 15 (anexo E), estruturada com índice, data, hora, frequência utilizada, graduação de clareza e intensidade dos sinais recebidos, avaliação da qualidade da frequência testada, nível médio em dBu, valor teórico calculado, diferença entre os valores (medido e teórico), nível médio de ruído (em pontos de interesse), tempo de transmissão dos arquivos recebidos em Campinas, velocidade de transmissão dos arquivos, modulações utilizadas e observações sobre as percepções e fatos julgados relevantes.

5.6.1 Medição do nível de ruído no ambiente

Foram efetuadas medições do nível de ruído do ambiente, antes de iniciar a comunicação entre as estações HF, com o objetivo de aprimorar o conhecimento sobre a ocupação do espectro. Para essas medições, utilizou-se a antena HF, e foram registradas em fotografias as medidas coletadas do analisador de espectro, em duas varreduras (*span*) na faixa de 3 MHz a 30 MHz, sendo uma com *span* de 27 MHz e outra de 2 MHz. A Figura 23 ilustra uma das fotografias do espectro de frequência do ruído no ambiente, com *span* de 27

MHz, antes de estabelecer o enlace. No anexo C encontram-se fotografias com *span* de 2 MHz.

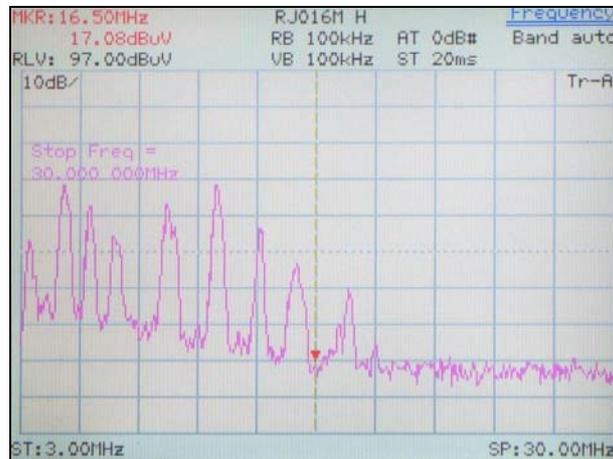


Figura 23 – Antena dipolo - medição do espectro de 3 a 30 MHz

5.6.2 Estabelecimento de enlaces HF

Em conseqüência dos avanços tecnológicos, a transmissão em HF vem se aprimorando e tornando-se mais eficaz. O sistema TRANSCALL / SELCALL, do transceptor TW 7000, assim como o protocolo de estabelecimento de enlace do MODEM, XCLOVER, são exemplos desse desenvolvimento, permitindo o gerenciamento automático de frequências e o melhor modo de modulação para as condições ionosféricas, em cada instante. O uso desses recursos nos ensaios facilitou a obtenção dos enlaces e a transmissão em HF, principalmente ao entardecer, quando houve enfraquecimento da propagação.

A partir dos cálculos de predição dos softwares PropWiz e ITS-HF, que se encontram descritos no item 5.7, escolhia-se a frequência de operação, estabelecia-se o enlace entre Campinas e Brasília. A transmissão de voz era, então, avaliada com relação à clareza e à intensidade, segundo a Norma do Ministério das Comunicações nº 31/94, Apêndice 9, conforme as indicações da Tabela 9.

Tabela 9 – Avaliação da clareza e intensidade do sinal

Código Q		
Notas	Clareza do Sinal	Intensidade do Sinal
1	<i>Ruim</i>	<i>Fraca</i>
2	<i>Pobre</i>	<i>Apenas Perceptível</i>
3	<i>Razoável</i>	<i>Boa</i>
4	<i>Boa</i>	<i>Satisfatória</i>
5	<i>Excelente</i>	<i>Ótima</i>

Além da avaliação qualitativa, foram também realizadas medidas quantitativas. De Brasília era transmitido um tom de 1 kHz e, simultaneamente, em Campinas, coletavam-se várias amostras do nível do sinal, registrando-se em cada teste a média do sinal recebido. Em seguida, comparava-se a clareza e intensidade (avaliadas) com o nível de sinal recebido, com o intuito de verificar a coerência dos dados registrados.

5.6.3 Transmissão de dados

Após a análise do sinal de voz descrita no item anterior, eram realizados os testes de transmissão de dados e, para isso, utilizou-se o MODEM TW5300 conectado ao Transceptor HF TW7000. Como está descrito no item 5.4, o MODEM utiliza cinco tipos de modulação para a transmissão de dados, que são: BPSM (*Binary Phase Shift Modulation*), QPSM (*Quad Phase Shift Modulation*), 8PSM (*8-level Phase Shift Modulation*), 8P2A (*8 Pulse 8 Phase 2 Amplitude*) e 16P4A (*8 Pulse 16 Phase 2 Amplitude*). Conforme as condições de propagação da ionosfera, o sistema escolhia o mais adequado.

Os dados recebidos em Campinas eram arquivos de 1 kB (*quilo byte*), 2 kB e 10 kB enviados, nesta seqüência, de Brasília. Para cada pacote recebido, eram registrados o tempo e a velocidade reais de transmissão, bem como o modo de modulação utilizado e nível médio do sinal. Com esses dados, estimava-se a qualidade da propagação. A partir da FOT, a frequência de operação era variada, com o objetivo de estudar diferentes condições de propagação. Em cada enlace estabelecido eram realizadas as coletas dos dados registradas em tabelas. A Tabela 10 é um exemplo da coleta de dados, *in loco*, de um enlace. A Tabela 15, que se encontra em anexo E, contém todos os dados coletados. As frequências de teste eram aumentadas gradativamente (utilizando-se os canais disponíveis), até que atingissem valores

maiores à MUF e, conseqüentemente, ultrapassassem a camada ionosférica, impedindo o enlace. Em seguida, a frequência era reduzida até que o nível de ruído se tornasse muito elevado, degradando o enlace e chegando a ponto de interrompê-lo.

A Tabela 10 mostra o formato dos dados coletados em campo, nos quais o valor teórico corresponde à predição de propagação do software ITS-HF (Recomendação UIT-R P.533) o qual era comparado ao valor do sinal recebido (em um tom de 1 kHz), que era transmitido de Brasília para Campinas durante trinta segundos. Também era realizada uma avaliação subjetiva da voz, graduando-se a clareza e intensidade do sinal..

5.7 Predição da Propagação Ionosférica

Os cálculos realizados para a predição da propagação ionosférica foram baseados na Recomendação da União Internacional de Telecomunicações – UIT-R P.533-8 (Método para a predição do desempenho dos circuitos HF). Para viabilizar os procedimentos operacionais de testes já descritos, os cálculos de disponibilidade e níveis de sinal apresentados foram obtidos por meio de dois *softwares*, PropWiz (*Propagation Wizard*) e o ITS HF *Propagation* que estão baseados na Recomendação supracitada. O PropWiz é um *software* livre criado pela Rohde & Schwarz, na Alemanha, que utiliza a citada Recomendação para cálculo de alguns parâmetros de enlaces HF. O software de propagação *Wizard* é um programa de predição de propagação que apresenta seus resultados de forma imediata, indicando basicamente a MUF e a disponibilidade de enlaces em HF. Os resultados são ilustrados em um gráfico em que se encontram informações relevantes, como a MUF horária, para determinado mês. Os seguintes dados são fornecidos ao programa: nomes das estações transmissora e receptora, tipo de antena de cada estação, ganho das antenas, potência do transmissor, características do ruído do ambiente, figura de ruído do receptor, ângulo de partida (*takeoff*) mínimo da antena transmissora, mês, ano e número de manchas solares, característica do mecanismo de propagação, tipo de modulação, relação sinal/ruído. As características importantes da *Propagation Wizard* são:

- Baseado em um algoritmo para cálculo de MUF e intensidade de campo;
- Consideração de todos os parâmetros importantes de enlace;
- Cálculo da disponibilidade de um enlace para duas taxas sinal/ruído pré-definidas em hora diária;
- Gráfico das faixas de frequências utilizáveis versus hora diária.
- Consideração do hardware específico do ROHDE & SCHWARZ (classes da potência do transmissor, antena, MODEM de dados HF). A Figura 24 é a janela do *software* PropWiz, onde são anotados os dados, com o resultado dos cálculos de predição de propagação em HF ilustrados em gráfico.

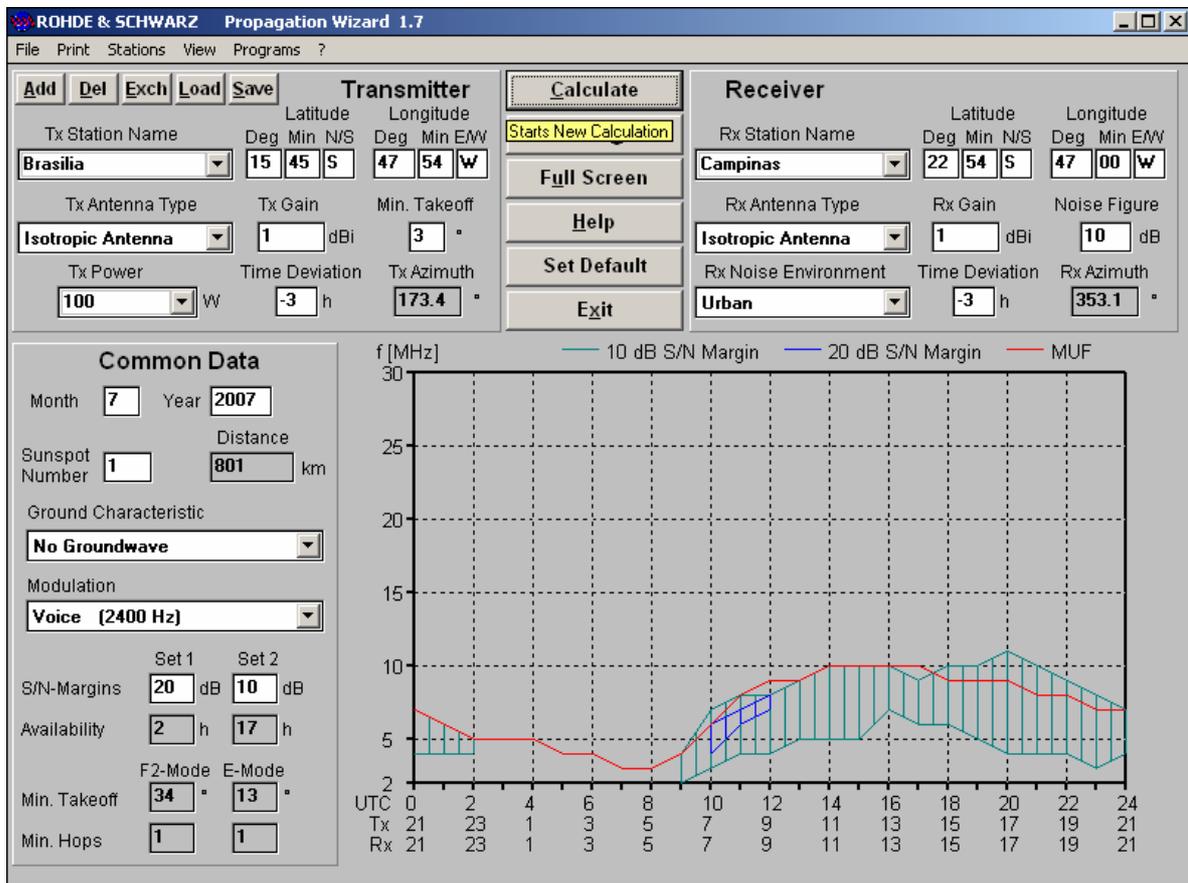


Figura 24 – Janela do software PropWiz com resultado em gráfico

O ITS HF *Propagation* é um *software* cujo desenvolvimento foi patrocinado pelo governo americano e utiliza os seguintes modelos de propagação: ICECAP – *Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit Prediction Program*, VOACAP – *Voice of America Coverage Analysis Program*, e REC 533 - ITU-R *Recommendation 533*. O software ITS HF disponibiliza a predição do desempenho de propagação em HF, de forma prática. Os resultados podem ser visualizados por meio de tabelas ou gráficos. As Figuras 25 a 27 ilustram a tela de entrada de dados e os resultados dos cálculos de predição em propagação do software ITS-HF em forma de gráfico e tabela, respectivamente.

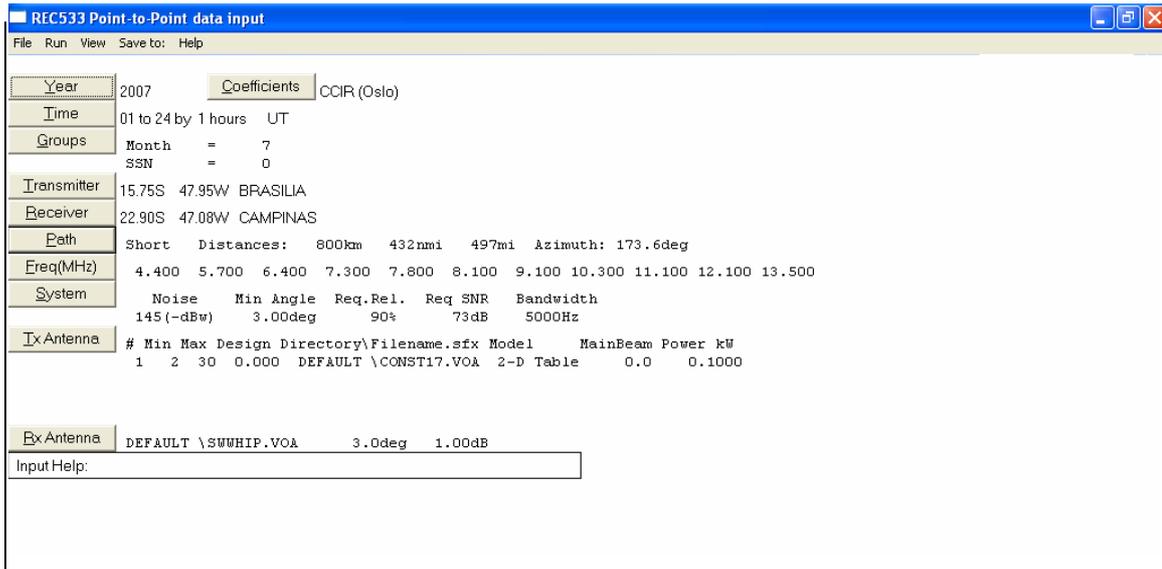


Figura 25 – Janela de entrada de dados do software ITS-HF

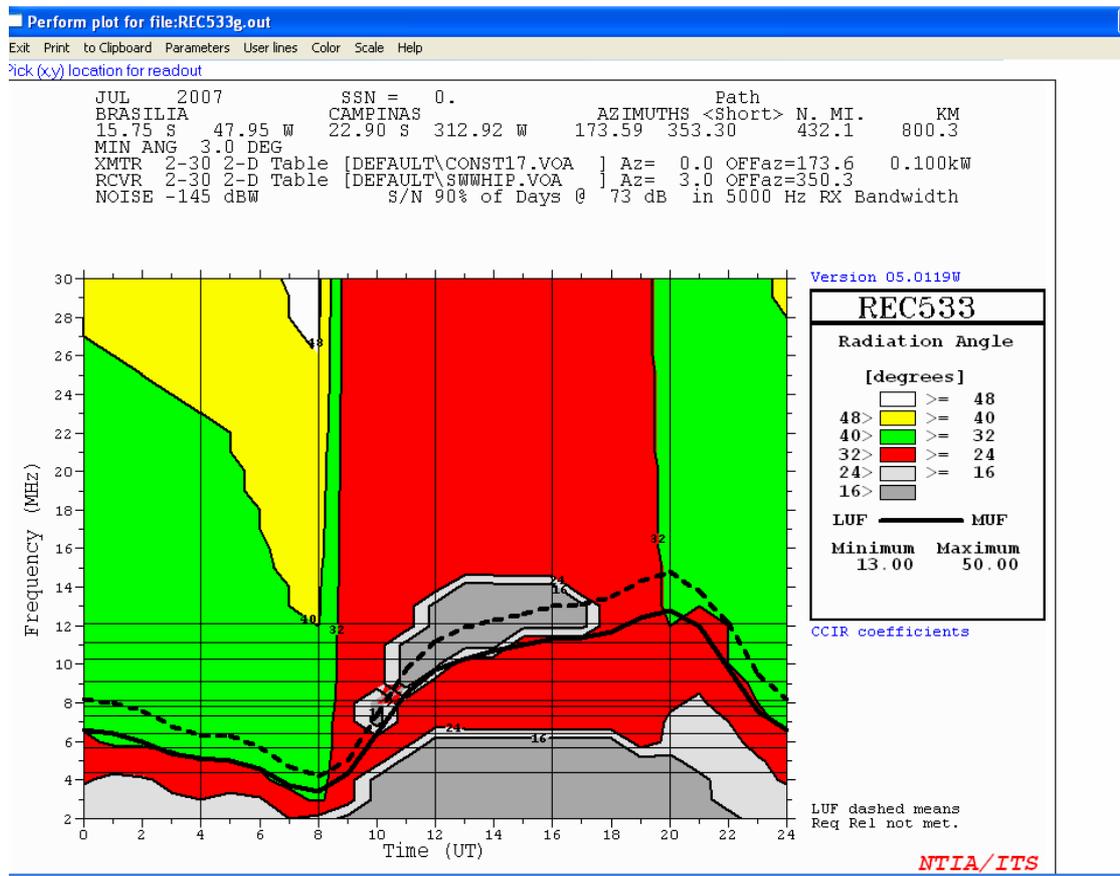


Figura 26 – Resultado em gráfico da predição de propagação ITS-HF

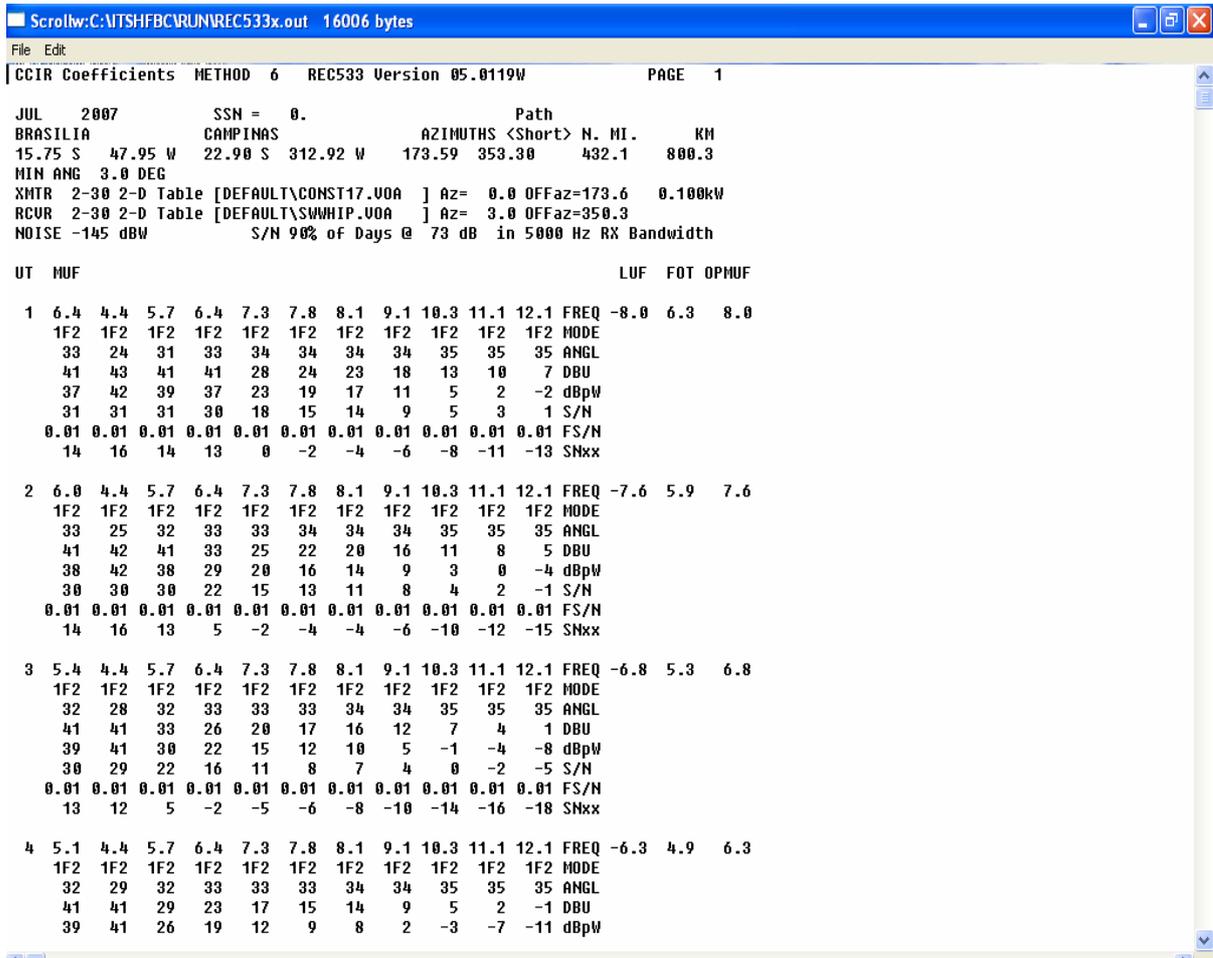


Figura 27 – Resultado em tabela da predição de propagação ITS-HF

Os parâmetros considerados para base de cálculo de enlaces ponto a ponto no *software* ITS HF são descritos a seguir:

- a) ano-base: 2007 (ano com baixo número de manchas solares);
- b) coeficiente: CCIR (Oslo). Este é um dos coeficientes ionosféricos utilizados pela UIT-R P.533 e compreende o número de manchas solares (SSN – *Sunspot Number*) entre 0 e 100;
- c) horários: H24 com hora UTC (início – 00h00, término – 24h00);
- d) definição do período de cálculo: Mês de referência: julho de 2007;
- e) SSN: no período das medições, 23 a 27 de julho de 2007, o SSN encontrava-se em torno de zero (SpaceWeather, 2007);
- f) dados da localização do transmissor: Nome - “Brasília”. Latitude = 15,75° Sul. Longitude = 47,95° Oeste;
- g) dados da localização do receptor: Nome - “Campinas”. Latitude = 22,90° Sul. Longitude = 47,08° Oeste;
- h) distância do enlace: em torno de 800 km;
- i) azimute: a partir do transmissor: 173,6°;
- j) frequências consideradas: 4,4 / 5,7 / 6,4 / 7,3 / 7,8/ 8,1 / 9,1 / 10,3 / 11,1 / 12,1 / 13,5 MHz;
- k) nível de ruído gerado artificialmente em 3 MHz (-dBw/Hz) em uma faixa de 1 Hz: -145 dBw (classificação de ambiente residencial);
- l) tipo de antena: dipolo de banda larga;
- m) disponibilidade mínima requerida, para efeito de cálculo: de 85 a 90%;
- n) relação sinal ruído requerida: 73 dB;
- o) largura de faixa do receptor: 3200 Hz;
- p) direção de apontamento da antena: Brasília: 173,6°, Campinas: 353,6°;
- q) ganho da antena de transmissão: considerado de 0 a 2 dBi para as frequências de operação;

r) Frequência Ótima de Trabalho (FOT) teórica considerada: 85% da MUF.

$$F O T = (M U F) \times 0,85$$

Esses dados foram usados no *software* ITS HF *Propagation* para obtenção das intensidades teóricas do sinal recebido, com as quais eram comparadas as avaliações subjetivas da voz. Usou-se, ainda, o programa para verificar as predições das condições de propagação.

No período em que foram realizados os ensaios, o SSN chegou a zero, segundo dados obtidos em sites confiáveis (SPACEWEATHER e NASA PHYSICS). Quando ocorre isso, a MUF torna-se mais baixa e reduz, significativamente, a faixa de frequências de operação, fazendo com que frequências altas ultrapassem a camada ionosférica com maior facilidade. O programa PropWiz, através de gráficos, indicava a MUF em qualquer horário; a partir da MUF calculava-se a FOT, que era utilizada para estabelecer o enlace em HF.

Os possíveis ângulos de radiação também são considerados, uma vez que, a partir desses ângulos, podem ser previstas as alturas da ionosfera e suas respectivas camadas para estabelecimento dos enlaces, onde ocorrem efeitos de refração da onda em propagação. Os gráficos a seguir (Figura 28 a Figura 30) demonstram os resultados de predição da propagação ionosférica, com os parâmetros acima citados, para o período de testes (23 a 27 de julho de 2007 – inverno). Os gráficos indicam ângulos de radiação, níveis médios de sinal, faixas de frequências utilizáveis e MUF. Através destas figuras, pode-se observar o efeito do valor do SSN sobre a MUF, a qual se apresenta baixa, e com o nível limitado em curto período de tempo e com ângulo de radiação baixo.

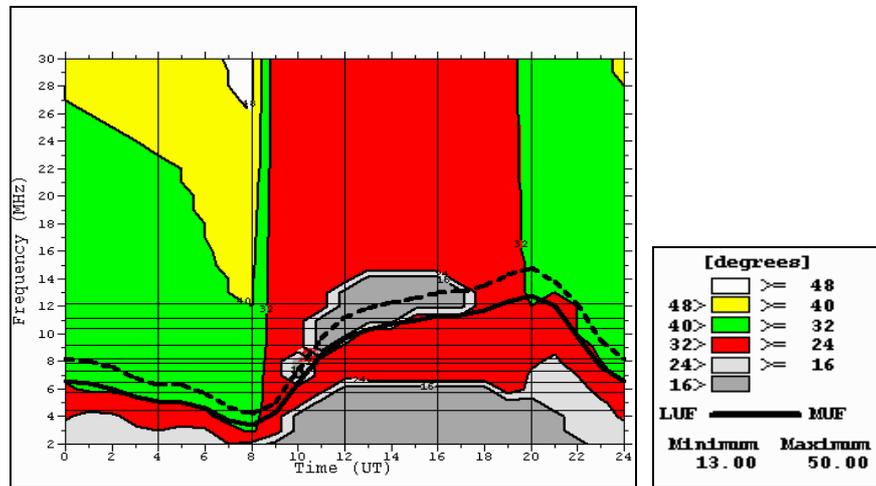


Figura 28 – Ângulo de radiação, em graus, em julho de 2007 e SSN = 0

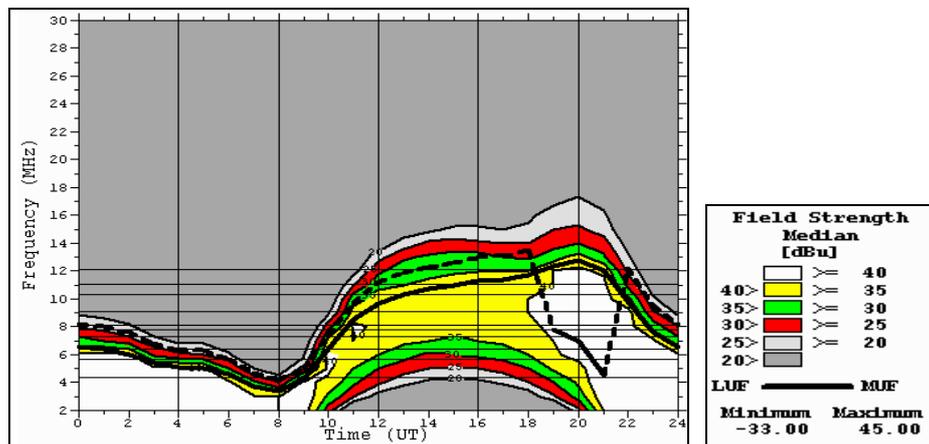


Figura 29 – Intensidade de Campo, dBu, em julho de 2007 e SSN = 0

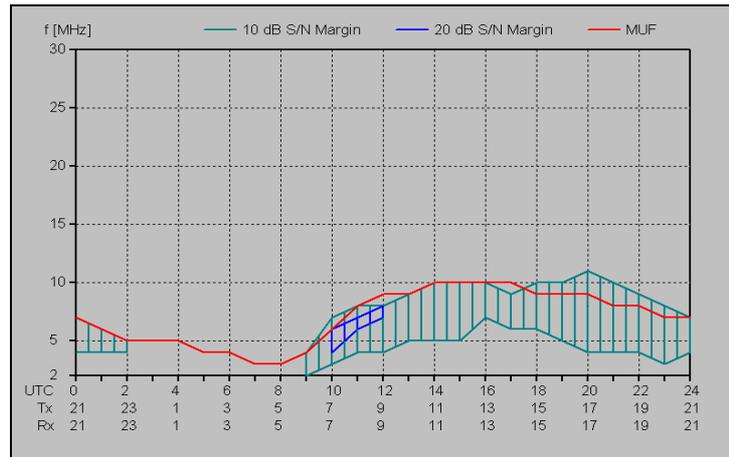


Figura 30 – Gráfico da Frequência x UTC, 23 a 27 de julho de 2007, e SSN = 1

5.8 Análise dos Dados Coletados

Os dados coletados na medição em campo se encontram registrados na Tabela 15, anexo E. A partir desses dados foram gerados os gráficos da Figura 31 à Figura 45, que são comentados em seqüência.

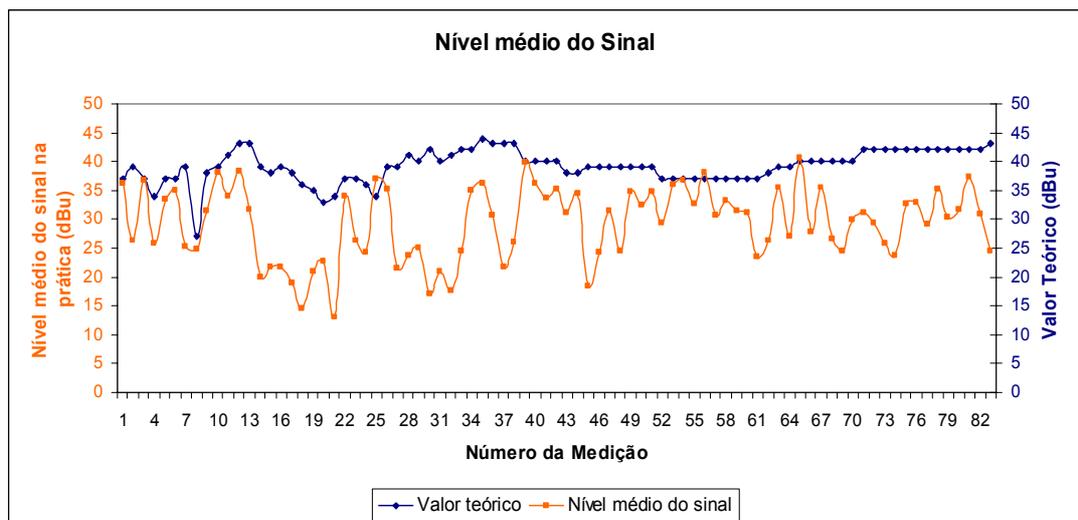


Figura 31 – Nível médio do sinal

A Figura 31 mostra que os níveis de sinais medidos em campo apresentaram-se abaixo dos valores fornecidos pela predição do *software* ITS HF; ressalta-se que os níveis obtidos através da predição são resultados de médias horárias e os indicados no experimento foram pontuais.

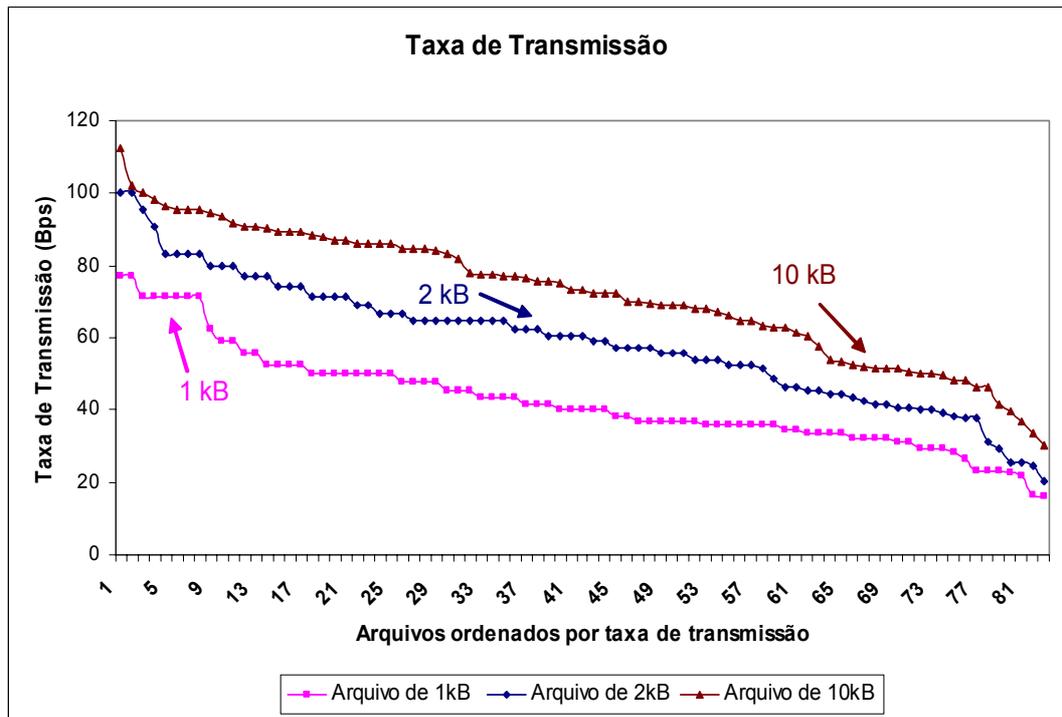


Figura 32 – Comparação entre tamanhos de arquivos da taxa de transmissão

Os arquivos de 10 kB obtiveram maior taxa de transmissão do que os arquivos de 2 kB e de 1 kB, conforme ilustrado na Figura 32.

Os modos de modulação, utilizados pelo protocolo do MODEM, são o BPSM, o QPSM, o 8PSM, o 8P2A e o 16P4A, como descritos no item 5.4.2. Durante a transmissão de um arquivo, um ou mais modos de modulação foram utilizados; o protocolo XCLOVER adaptava a modulação conforme as condições de propagação ionosférica. Os gráficos das Figuras 33, 34 e 35 mostram a quantidade de modos de modulação utilizados para a transmissão de cada arquivo.

Na Figura 33 verifica-se que, nas transmissões dos arquivos de 1 kB, predominou a transmissão com um único modo de modulação. Isso se justifica pelo tamanho do arquivo, que é pequeno, e pelo fato de o MODEM possuir pouco tempo para tentar utilizar vários

modos de modulação. Nessa figura também é percebido que, quando ocorre redução da taxa de transmissão, a quantidade de modos de modulação se eleva, o que se deve ao fato de as instabilidades ionosféricas dificultarem a propagação e, portanto, o protocolo de modulação tentar selecionar a melhor modulação para tal situação.

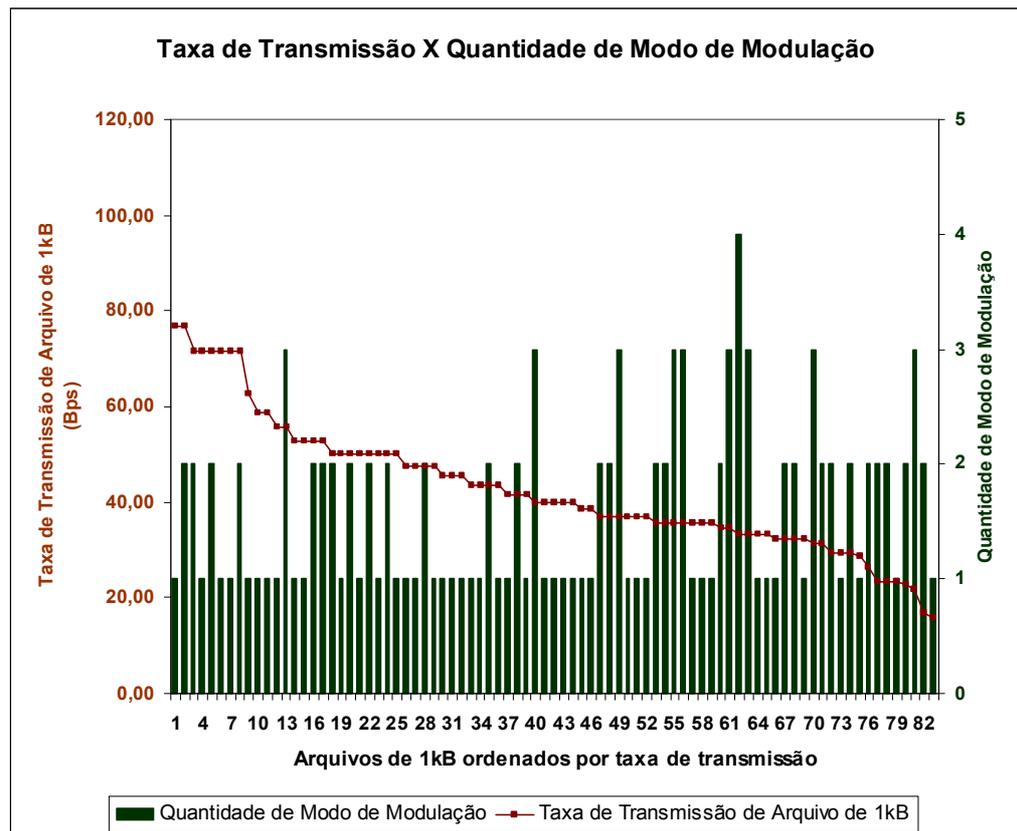


Figura 33 – Quantidade de modulação durante a transmissão do arquivo de 1 kB

Como ilustra a Figura 34, durante a transmissão dos arquivos de 2 kB ocorreu um discreto aumento na quantidade dos modos de modulação em relação à transmissão do arquivo de 1 kB. E como ocorreu na transmissão do arquivo de 1 kB, quando a taxa de transmissão diminui, a quantidade de modos de modulação é elevada.

Observa-se que, na transmissão dos arquivos de 10 kB, ilustrado na Figura 35, houve maior variação da quantidade de modos de modulação, em comparação com as transmissões dos arquivos de 1 kB e 2 kB. E, como também ocorreu nas transmissões dos arquivos de 1 kB e 2 kB, nota-se que quanto menor a taxa de transmissão, maior a variação das modulações.

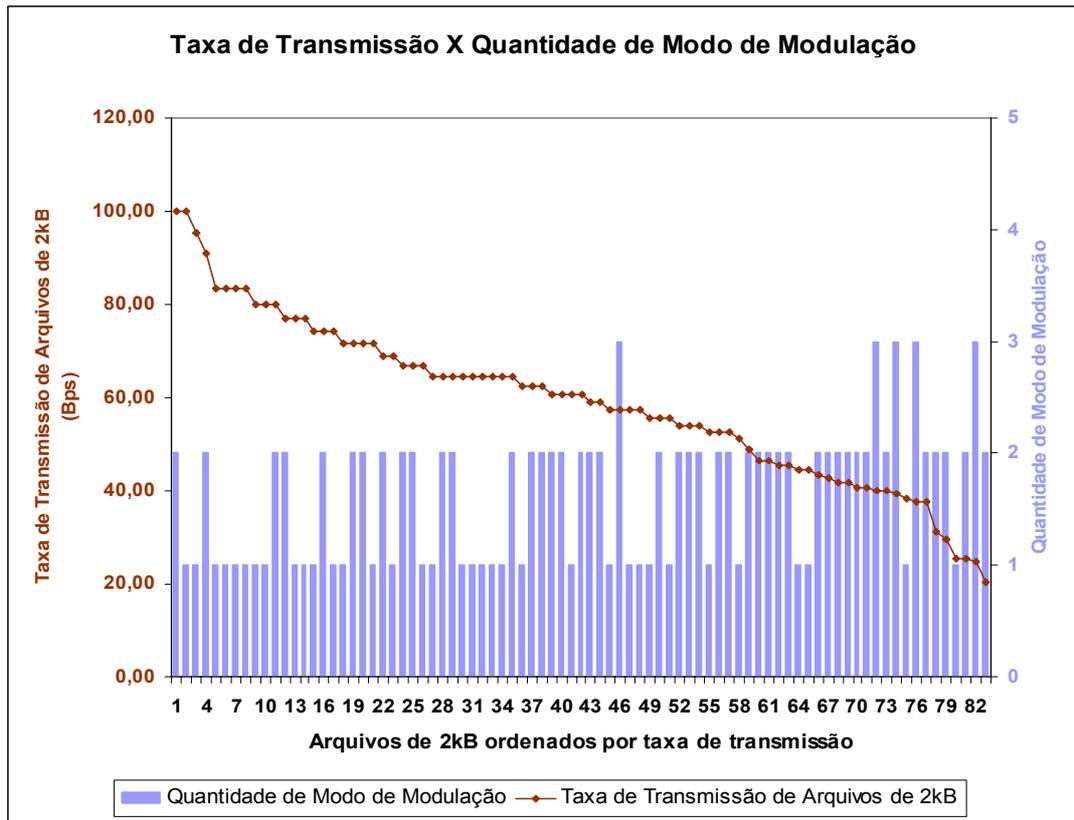


Figura 34 – Quantidade de modulação durante a transmissão do arquivo de 2 kB

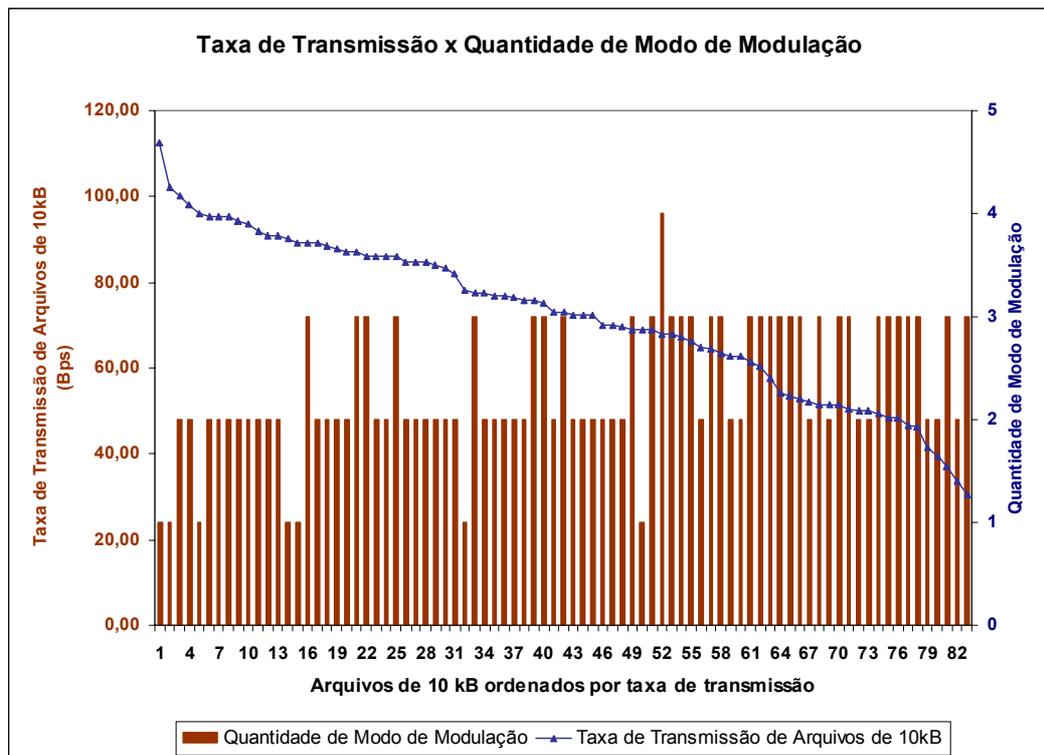


Figura 35 – Quantidade de modulação durante a transmissão do arquivo de 10 kB

A Tabela 11 mostra a quantidade de vezes em que cada modo de modulação foi utilizado durante a transmissão dos arquivos de 1 kB, 2 kB e 10 kB, sendo que cada arquivo foi transmitido 83 vezes. Houve tanto o uso de apenas um modo de modulação na transmissão dos arquivos, conforme mostra a Tabela 12, como também o uso de vários modos. Da Tabela 11 se conclui que o modo de modulação mais utilizado por todos os arquivos foi o de 8P2A, cuja velocidade de transmissão nominal é de 2.000 bps, e que o modo mais robusto, o BPSM, foi o menos utilizado. Portanto, os arquivos foram transferidos, em média, com taxas de transmissão elevadas. Observa-se também o aumento da quantidade dos modos de modulação conforme aumenta o tamanho do arquivo.

Na Tabela 12 verifica-se que os modos que predominaram durante a transferência dos arquivos foram o de 8P2A e o de 16P4A, modos com as maiores taxas de transmissão nominal, 2.000 bps e 3.000 bps, respectivamente. Os modos de baixa velocidade de transmissão foram pouco usados, ocorrendo nos arquivos menores, de 1kB e de 2kB. O modo mais robusto e de menor taxa de transmissão, 500 bps, não foi utilizado como único modo de transmissão em nenhum dos arquivos.

Tabela 11 – Quantidade de modulação na transmissão digital dos arquivos

Modos de Modulação	Quantidade de modos de modulação utilizados na transmissão digital dos arquivos		
	de 1 kB	de 2 kB	de 10 kB
BPSM	3	3	2
QPSM	7	10	21
8PSM	24	34	49
8P2A	63	59	74
16P4A	38	30	44

Tabela 12 – Quantidade do uso de **uma única modulação** na transmissão digital

Modos de Modulação	Quantidade de somente um modo de modulação utilizado na transmissão digital dos arquivos		
	de 1 kB	de 2 kB	de 10 kB
BPSM	-	-	-
QPSM	2	1	-
8PSM	2	4	-
8P2A	27	21	4
16P4A	14	9	3

Os gráficos das Figuras 36, 37 e 38 ilustram a qualidade de propagação combinada com a frequência utilizada no momento da transmissão dos sinais. Para cada enlace obtido avaliou-se a qualidade de transmissão do sinal. No gráfico, o valor 10 corresponde a uma excelente propagação; o valor 8, a boa propagação; 6 a regular e abaixo de 6 indica que a propagação foi ruim (avaliações qualitativas referentes à clareza e intensidade do sinal). A Figura 36 mostra que a propagação foi boa durante todo o dia, sendo excelente em curto período de tempo. A frequência média utilizada foi em torno de 8 MHz, o que se justifica pela estação do ano, inverno, e pelo número de manchas solares, que se encontrava em torno de zero. A predição da média diária das MUF ITS HF para o verão de dezembro de 2007 e com SSN igual a trinta e nove é de 12 MHz, e a predição de 17 MHz para o período de pico do SSN, que está previsto para outubro de 2011 com SSN igual a 140.

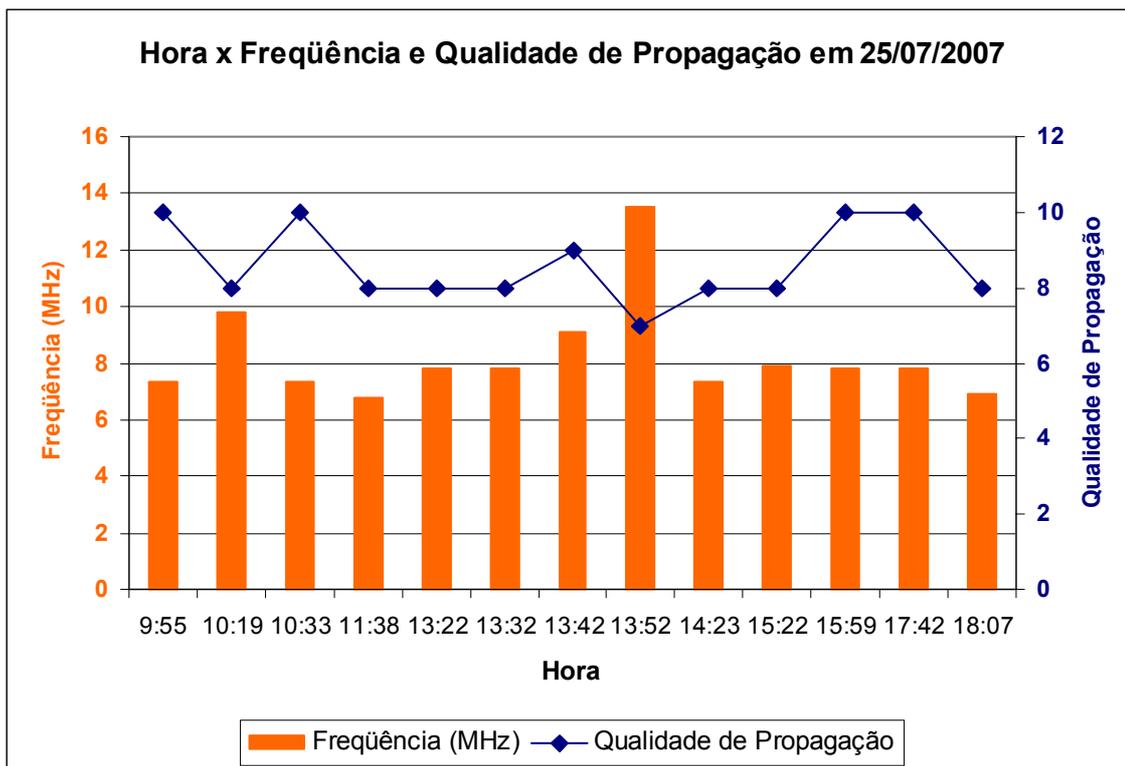


Figura 36 – Freqüência utilizada e qualidade de propagação em 25/07/2007

O gráfico da Figura 37 ilustra que houve alternâncias na qualidade de propagação, com períodos excelentes, regulares e ruins de propagação. Já o gráfico da Figura 38 ilustra um período grande de excelente propagação, e que necessitou de freqüências baixas – em torno de 8 MHz – para que isso ocorresse.

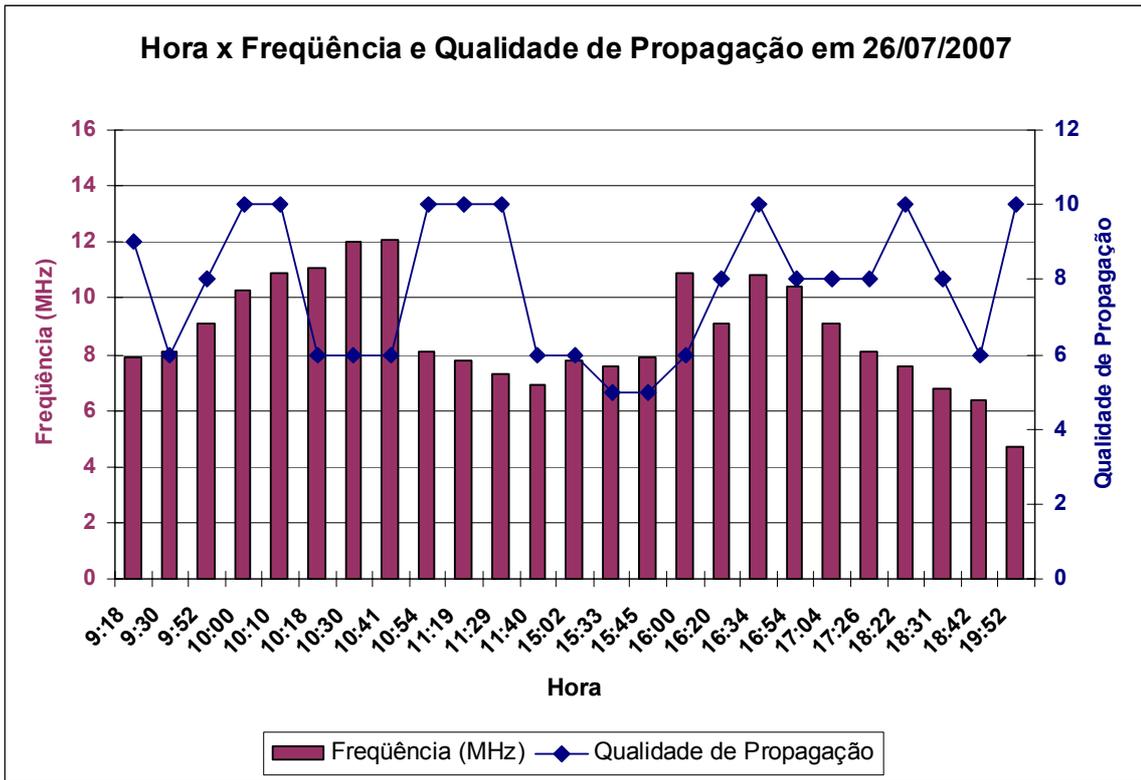


Figura 37 – Frequência utilizada e qualidade de propagação em 26/07/2007

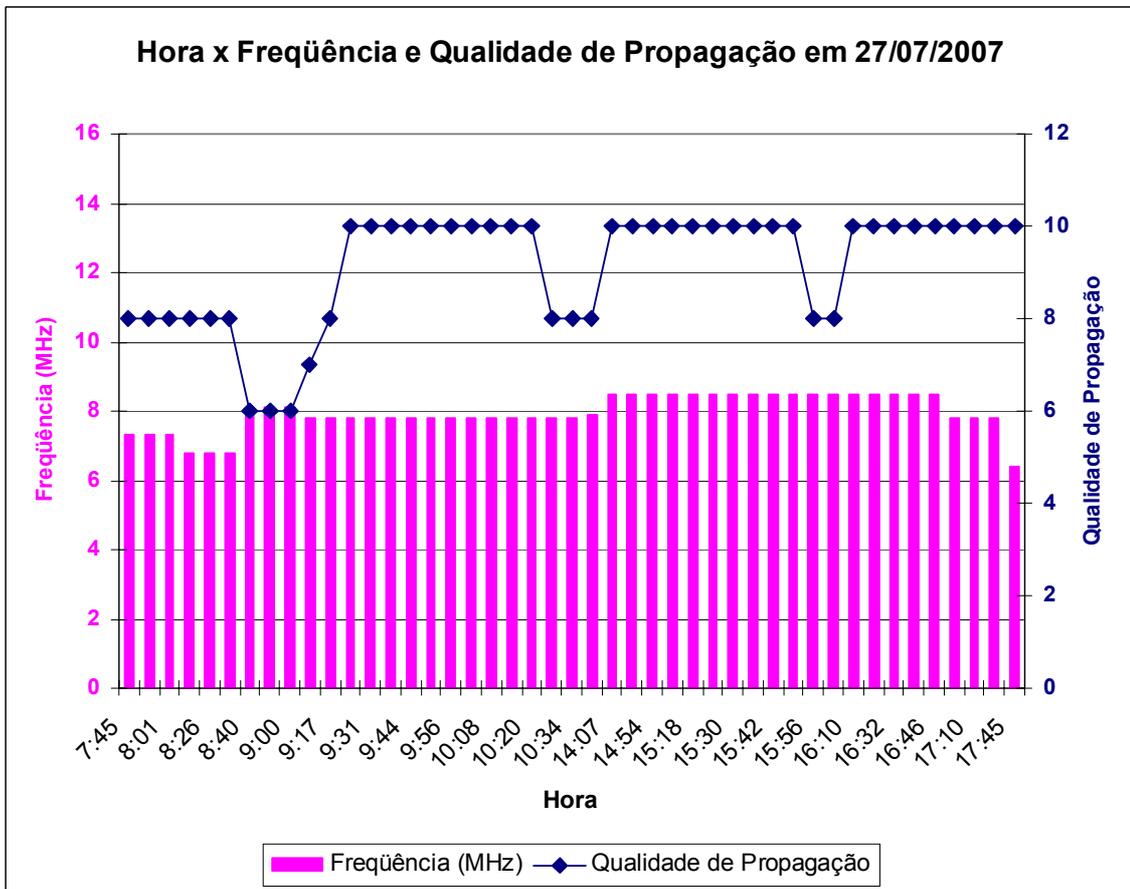


Figura 38 – Frequência utilizada e qualidade de propagação em 27/07/2007

Os gráficos das Figuras 39 a 41 ilustram a qualidade de propagação com a taxa de transmissão dos arquivos de 1 kB, 2 kB e 10 kB. Esses gráficos mostram que, à medida que a qualidade de propagação é degradada, a taxa de transmissão é reduzida gradativamente.

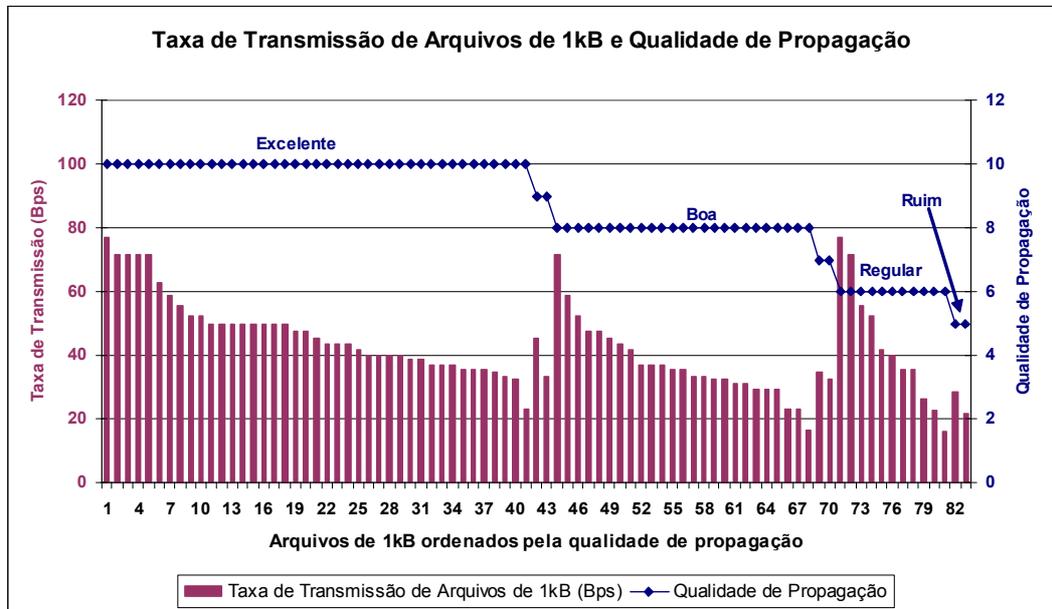


Figura 39 – Taxa de transmissão de arquivo de 1 kB x qualidade de propagação

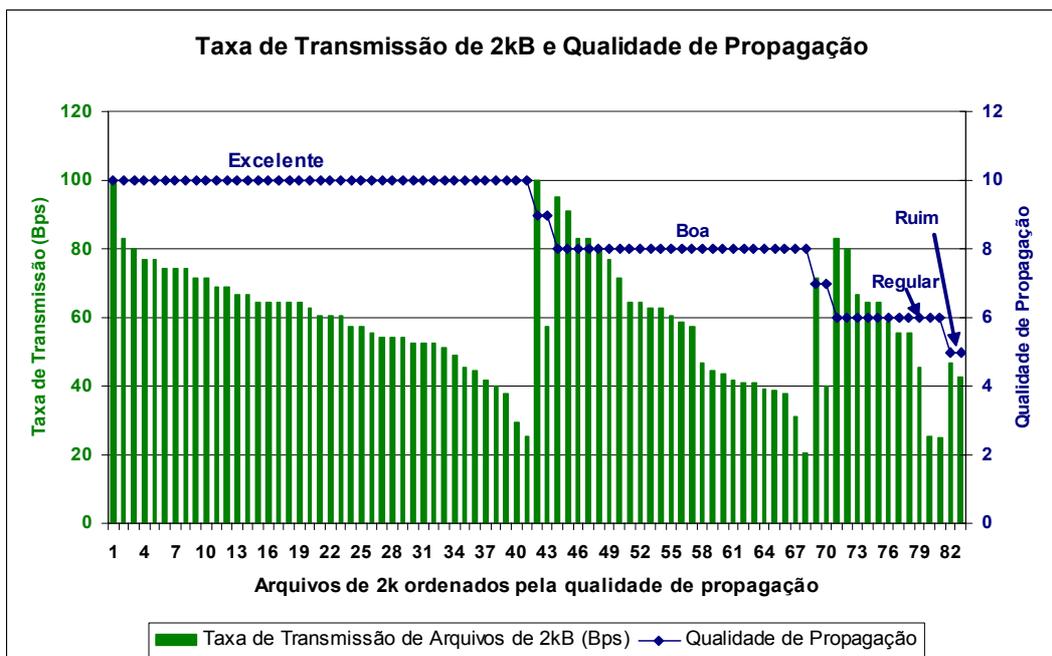


Figura 40 – Taxa de transmissão de arquivo de 2 kB x qualidade de propagação

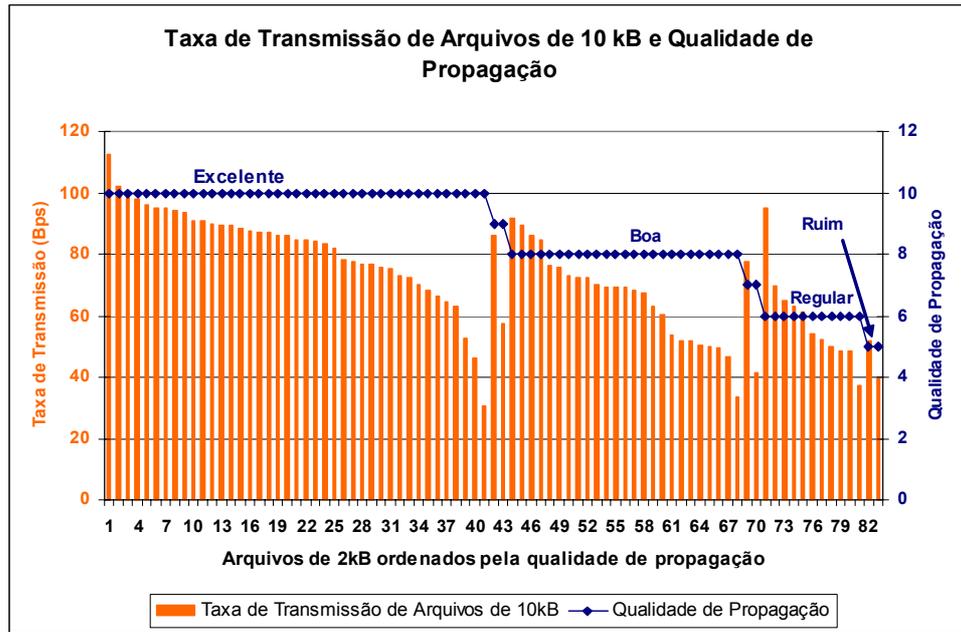


Figura 41 – Taxa de transmissão de arquivo de 10 kB x qualidade de propagação

A Figura 42 mostra todas as medições realizadas em campo, com as frequências utilizadas durante as medições e as MUF fornecidas pelos *softwares* PropWiz e ITS HF. Verifica-se que as frequências utilizadas nas medições em campo estão mais próximas das MUF fornecidas pelo *software* PropWiz do que das MUF ITS HF.

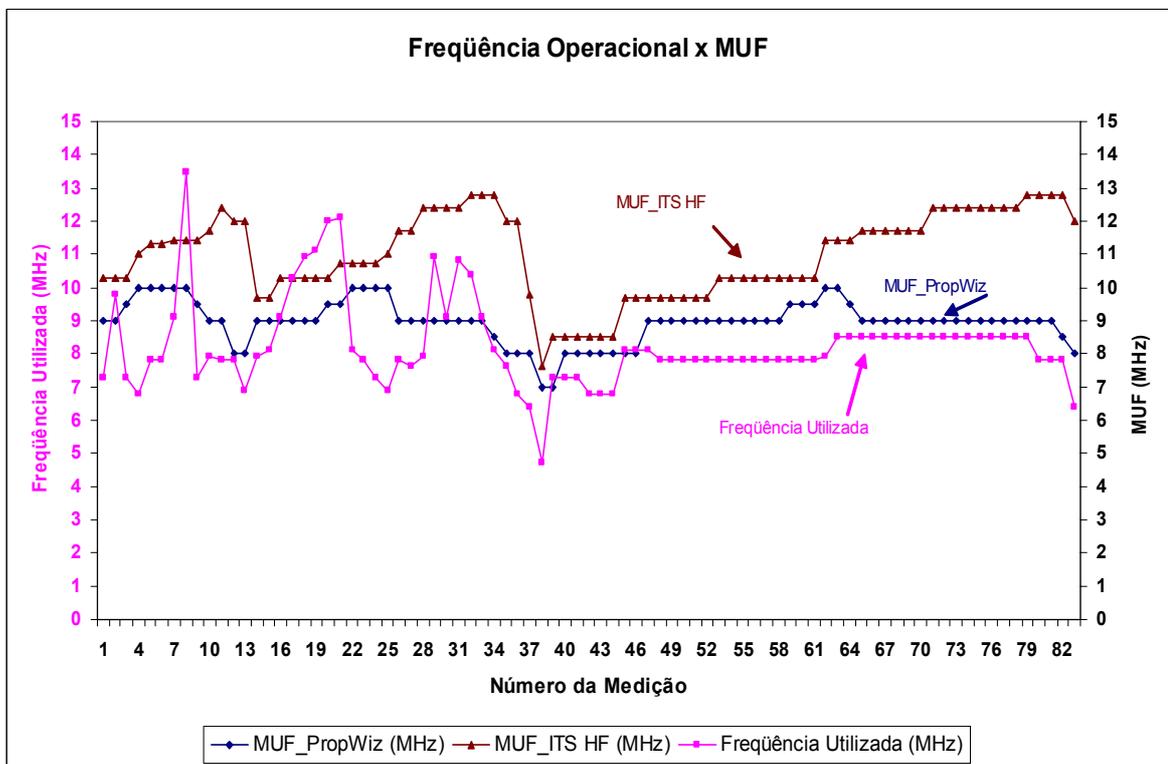


Figura 42 – Comparação entre as MUF e as frequências utilizadas em campo

Os gráficos das Figuras 43 a 45 ilustram as frequências utilizadas e as MUF fornecidas pelos *softwares* PropWiz e ITS HF, conforme a hora da medição. Verifica-se nas Figuras 43 e 44 que há frequências utilizadas acima das previsões das MUF, necessitando de uma avaliação das previsões para tal fato. Conforme descrito no item 5.6.3, a partir da FOT, a frequência de operação foi aumentada até ultrapassar a camada ionosférica, e reduzida até o nível de ruído aumentar bastante, degradando o enlace até interrompê-lo. Entretanto, as Figuras 43 e 44 mostram que as previsões de propagação dos dois softwares não foram precisas, pois as frequências operacionais ficaram acima das MUF previstas, principalmente na Figura 44 no período da manhã, conforme indicado na Figura 44. Já a Figura 45 mostra que no período das medições quase não houve variação nas frequências utilizadas, a linha dessas frequências apresenta-se como uma paralela às das MUF, e próximas às das previsões PropWiz, pois foi decidido utilizar a mesma frequência operacional por um período maior.

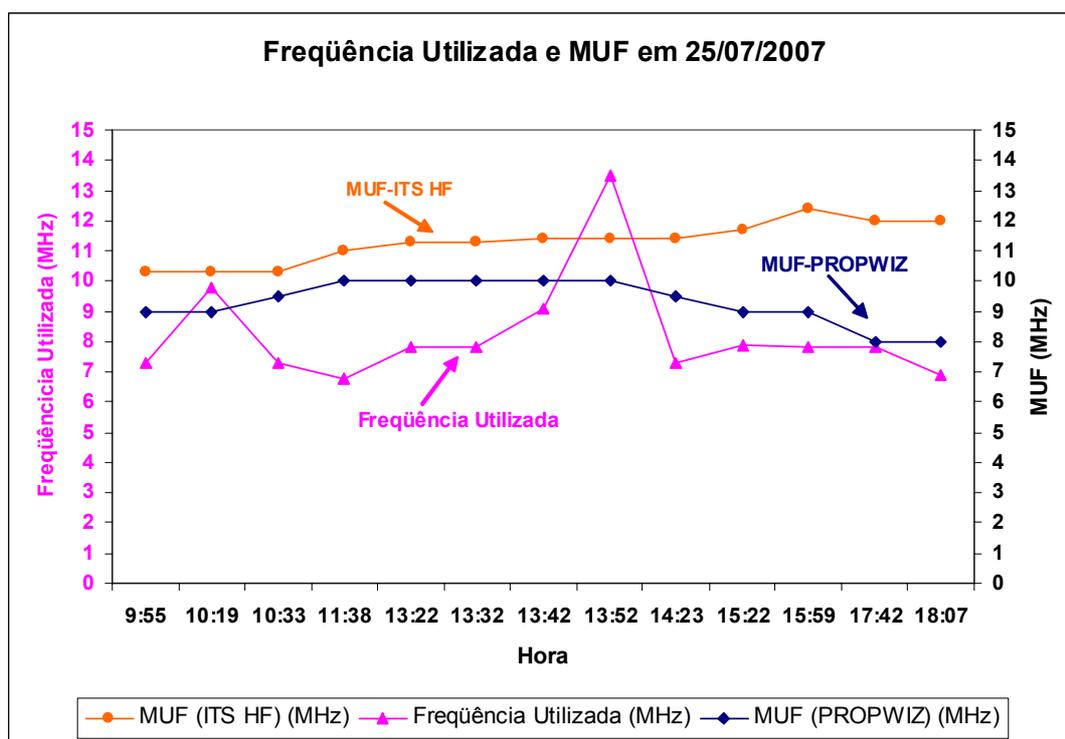


Figura 43 – Comparação entre as MUF e as frequências utilizadas em 25/07/07

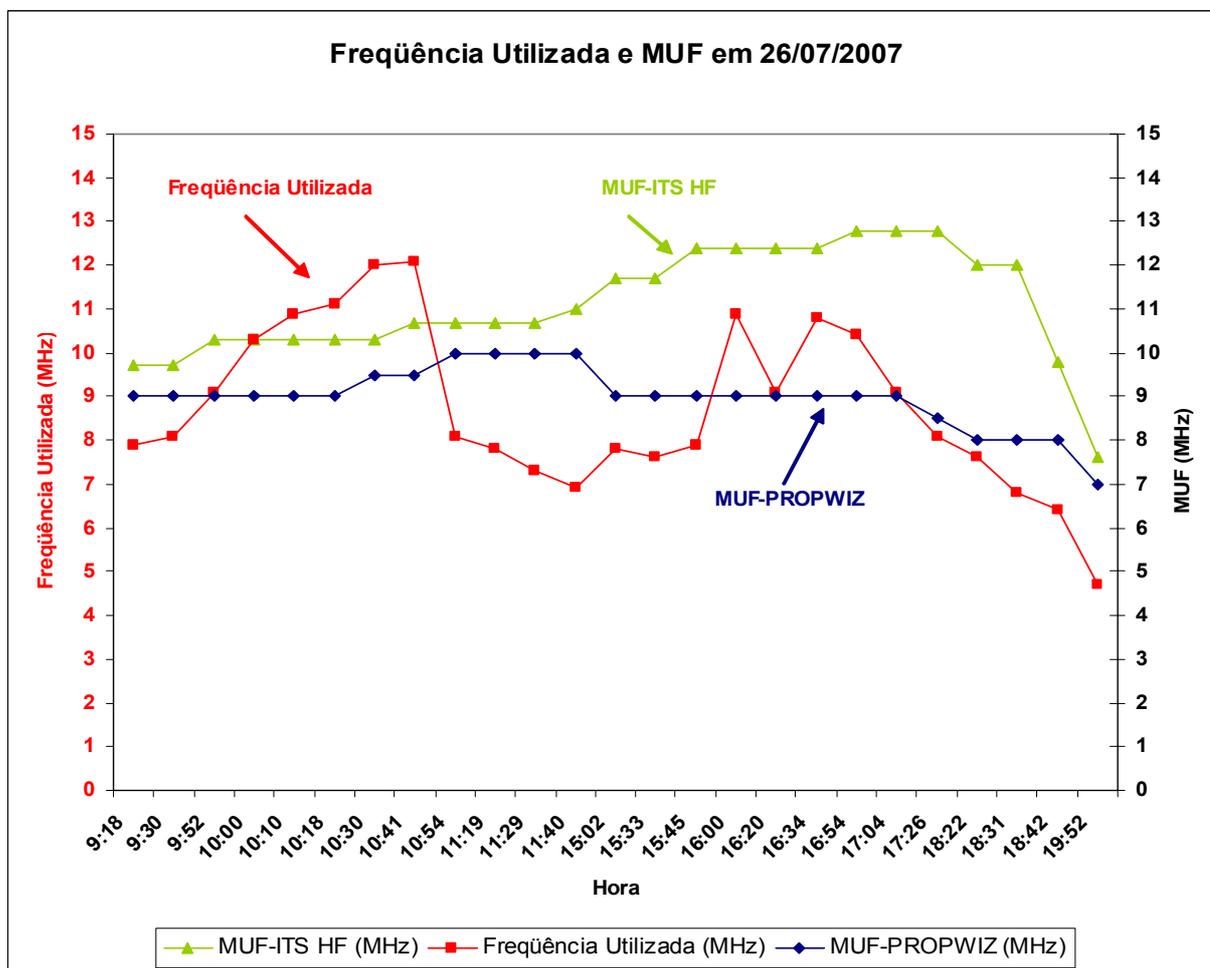


Figura 44 – Comparação entre as MUF e as frequências utilizadas em 26/07/2007

As medidas foram realizadas, do entardecer para a noite, até o momento em que não se conseguiu estabelecer enlaces. O período no qual as maiores dificuldades, para estabelecimento de enlaces, foram encontradas estava em torno das vinte horas, pois não houve condições de se continuar as medidas devido ao limite de potência do equipamento.

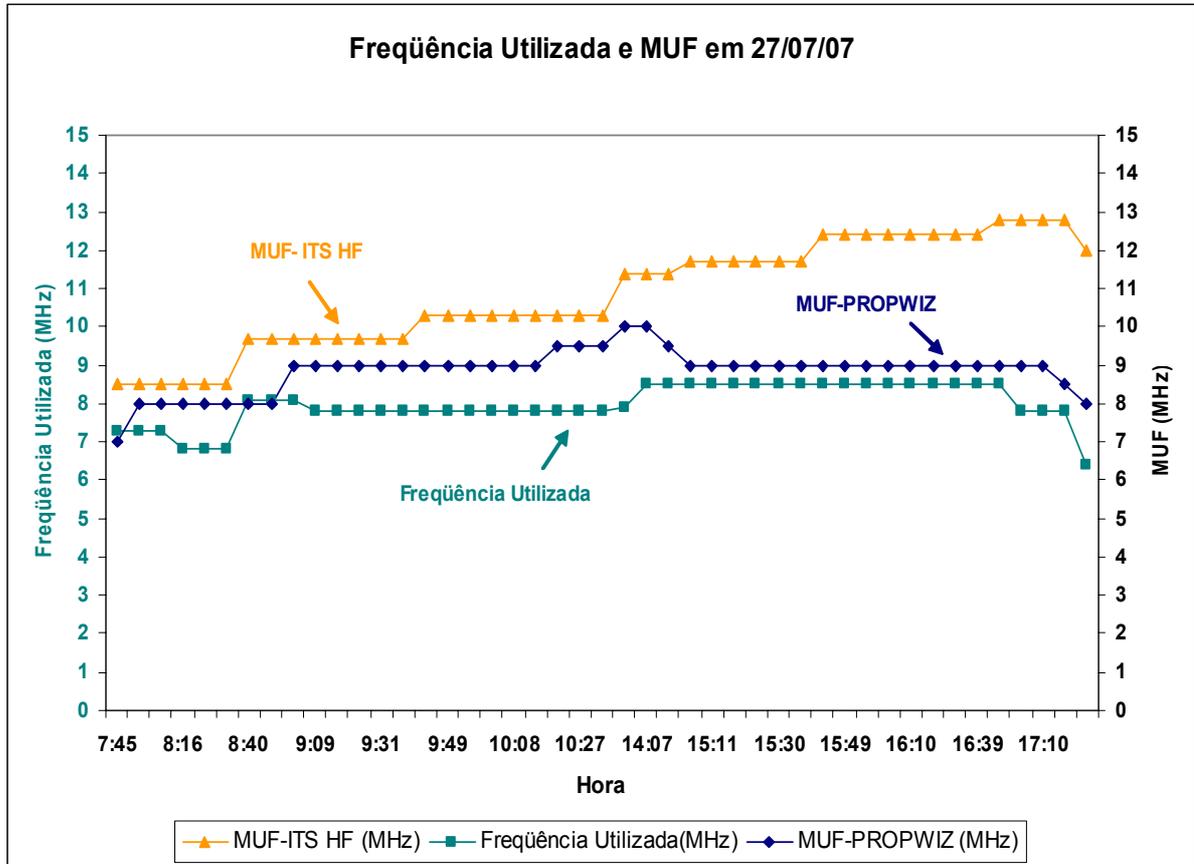


Figura 45 – Comparação entre as MUF e as freqüências utilizadas em 27/07/2007

6 CONCLUSÃO

A ionosfera é uma região vulnerável a diversos fenômenos, tais como a variação de intensidade dos raios solares, o número de manchas solares e o vento solar. Apesar da instabilidade, essa região proporciona radiopropagação a longa distância (1.000 km – 9.000 km) na faixa de HF (2MHz a 30 MHz), através de refrações em suas próprias camadas. Para a transmissão de sinal no meio ionosférico, é desnecessário utilizar repetidores para atingir tais alcances e, por conseguinte, o sistema de comunicações em HF possui um baixo custo quando comparado com outros sistemas de comunicações, como, por exemplo, satélite ou circuitos que utilizam enlaces terrestres consecutivos.

Os equipamentos do sistema HF foram aprimorados com os avanços tecnológicos, destacando-se os sistemas ALE e TRANSCALL, que fazem gerenciamento automático de frequências. Esses sistemas dispensam o emprego de trabalhadores com experiência na seleção de frequências de operação que, nos anos 60 e 70, eram efetuados manualmente para viabilizar os enlaces. Além disso, *softwares* como o PropWiz e o ITS HF proporcionam uma confiável predição de enlaces em HF e, associados ao protocolo XCLOVER na transmissão de dados, tornam as comunicações bastante robustas. Essas ferramentas foram utilizadas nos experimentos realizados, o que facilitou o estabelecimento dos enlaces e proporcionou a transmissão de arquivos e voz com excelente qualidade. Nas medições em campo foram transmitidos duzentos e quarenta e nove arquivos no período de trabalho, confirmando, desta forma, a viabilidade e eficiência do sistema em HF.

No período dos testes realizados observou-se que as frequências de operação se aproximaram mais da FOT calculada a partir da predição das MUF preditas pelo *software* PropWiz do que as obtidas pelo *software* ITS HF. Entretanto, cumpre ressaltar que se faz necessária uma avaliação mais cuidadosa deste resultado, devido ao fato de ter sido observado, em um período matinal, que as frequências operacionais estiveram acima das

predições de MUF obtidas pelos dois *softwares*. Logo, apenas por meio de testes mais longos seria possível modelar comportamentos repetitivos e divergentes das predições e obter conclusões mais precisas.

As análises dos resultados dos experimentos em campo indicam que, quanto maior o tamanho do arquivo transmitido, maior é a quantidade de modos de modulação utilizados e maior a sua taxa de transmissão. Isto se justifica pelo fato de que, nas transmissões dos arquivos maiores, o modulador tem mais tempo para ajustar os tipos de modulação, de acordo com as condições ionosféricas. Isso sugere que o controle da transmissão de arquivos pode permitir uma melhoria operacional, isto é, a transmissão de dados torna-se mais eficiente se forem agrupados vários arquivos pequenos, enviando-os de uma só vez. Verificou-se também que, à medida que a qualidade de propagação era degradada, a taxa de transmissão dos arquivos era reduzida, gradativamente, esse resultado era esperado, uma vez que constitui uma reação natural do sistema para manter a qualidade em um nível aceitável. Durante a transmissão dos arquivos, ao ser utilizado apenas um único modo de modulação, prevaleceram os modos 8P2A e 16P4A, que possuem as maiores velocidades de transmissão de dados do sistema. A viabilidade e a eficiência do sistema de HF utilizado no experimento descrito nesta dissertação foram plenamente confirmadas pela transmissão digital de 249 arquivos em um nível de qualidade satisfatório.

No experimento realizado, as maiores dificuldades nas comunicações ocorreram no período do entardecer para a noite. Em alguns momentos durante as transmissões noturnas o sinal era perdido aparentemente devido à limitação de potência do transceptor. Nesse período, há o quase total desaparecimento das camadas D e E da ionosfera e, por conseguinte, o ruído se eleva, e a utilização de frequências muito baixas – em torno de 4 MHz – não conseguem ser propagadas. Para usar frequências mais elevadas são necessários equipamentos com maiores potências. A média das frequências operacionais utilizadas durante as medições ficou em torno de 8 MHz, e esse baixo valor se justifica pelo número de manchas solares, que se encontrava em torno de zero.

Para permitir a continuada evolução dos sistemas de comunicações em HF é necessário aprofundar os estudos de propagação em regiões do hemisfério Sul, devido à sua dinamicidade e variabilidade. As medições realizadas indicaram diferenças na predição dos enlaces HF da Recomendação UIT-R P.533-8 em relação às frequências utilizadas, o que indica haver divergências de comportamento ionosférico em baixas latitudes - local onde

foram realizadas as medições - em relação ao hemisfério Norte, onde foram desenvolvidos os testes de referência da Recomendação citada.

Estudos futuros poderão contemplar especificamente as latitudes do hemisfério Sul, pouco explorado, até hoje, pelas pesquisas já efetuadas sobre esse meio de propagação.

A estação em HF é simples e prática, e tem possibilidade de ser instalada em qualquer local, necessitando apenas de um ponto de energia elétrica para alimentar os equipamentos. É importante que sejam feitos investimentos na exploração deste meio de comunicação que se confirma ser viável e seguro, de grande retorno e bastante vantajoso.

7 REFERÊNCIAS

- BAKER, D M e Davies K. *On frequency variation of ionospherically propagated HF radio signals*, Radio Science 1, p. 545-556, 1966.
- BISPO, Marcio Nascimento, Análise do canal ionosférico de rádio-propagação da faixa de HF, Dissertação (mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, 2001, Rio de Janeiro.
- BOITHIAS, Lucien. *Radio Wave Propagation*, New York: McGraw-Hill Book Company, 1987, p.219, p.237, p.242.
- BUDDEN, K G. *The propagation of Radio Waves*, Cambridge University Press, 1985.
- DARNELL, M., *HF system design principles*, AGARD LS-127: *Modern HF Communications*, NATO, 1983.
- DAVIES, K. *Ionospheric Radio Propagation*, New York: Dover Publications, 1966.
- GEOCITIES, Site. Troposfera e Ionosfera. Disponível em: <www.br.geocities.com>. Acesso em 14 de fevereiro de 2008.
- EINSTEIN, Albert. Como vejo o mundo. 19. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, p.12, 1981.
- IMPAC, Instrumentos de Medição, Automação e Controle. Disponível em <www.impact.com.br>. Acesso em 09 de abril de 2008.
- INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, enviado por Pedro Machado da cidade de Lorena, SP. Disponível em <<http://paginas.terra.com.br/arte/sarmentocampos/Tecnica12.htm>>. Acesso em 12 de outubro de 2007.
- ITS HF, *Propagation*, software. Recomendação UIT-R P.533-8.
- LANE, George, Lane Consultant. *Ionospheric Effects Symposium*, Alexandria V A USA, Paper 3B-4, maio de 2005. *Improved Guidelines for Automatic Link Establishment Operations*. Disponível em <http://www.voacap.com/documents/GLane_ALE.pdf>. Acesso em 16 de outubro de 2007.
- MASLIN, N M. *High data rate transmissions over HF links*, Radio and Electronic Engineer p.52, p.62, p. 75-87, fevereiro 1982.
- MASLIN, N M. *HF Communications: A Systems Approach*, New York: Plenum Press, p.1, p.2, p.57, p.58, p.60, p.62, p.63, p.74, p.75, p.78, p.82, p.89, 1987.
- PHYSICS, NASA / *Marshall Solar*. Disponível em <www.solarscience.msfc.nasa.gov>. Acesso em 03 de outubro de 2007.
- PROPWIZ, software. Recomendação UIT-R P.533-8.

PROTOCOL, CLOVER - II WAVEFORM &. *Hal Communications Corp., Engineering Document E2006 Rev A*, 17 de dezembro de 1997. Disponível em < <http://com/docs/e2006>>. Acesso em 17 de outubro de 2007.

SPACEWEATHER, disponível em <www.spaceweather.com> Acesso em 23 de julho de 2007.

UIT-R, *Method for the prediction of the performance of HF circuits*, Recommendation ITU-R P.533-8, *International Telecommunication Union*, Geneva, 2006.

UIT-R, *Radio noise*, Recommendation ITU-R P.372-8, *International Telecommunication Union*, Geneva, 2005.

WATTERSON, C C. *Experimental confirmation of an HF channel model*, IEEE trans. Com. Tech. COM-18, p. 792-803,1970.

WAVEFORM, CLOVER-2000/XCLOVER. Artigo disponível em < www.signals.tauus.de/FFT/CLOVER-2000>. Acesso em 17/08/07.

8 ANEXO A – RUÍDO RADIOELÉTRICO

O estudo do ruído radioelétrico é essencial para o desenvolvimento de equipamentos em HF. Neste item são apresentados fatores relevantes para projetos de sistemas radioelétricos que constam na Recomendação UIT-R P.372-8, 2005.

8.1 Informações necessárias para análise e projeto de sistemas radioelétricos

8.1.1 Fontes de ruído radioelétrico

O ruído radioelétrico externo ao sistema de recepção deriva das seguintes causas:

- a) descargas atmosféricas (ruído atmosférico);
- b) radiação de máquinas elétricas, equipamentos elétricos e eletrônicos, linhas de transmissão de potência, ou de ignição de motor de combustão interna (ruído produzido pelo homem);
- c) obstruções da superfície terrestre ou de outros obstáculos no feixe da antena;
- d) radiação e fontes situadas no espaço sideral (ruído cósmico).

O ruído ou sinal de transmissão co-canal não desejado ou devido à transmissão de espúrios dos sistemas de transmissão ou de recepção individual não são considerados na Recomendação UTI-R P.372-8.

8.1.2 Termos para a especificação da intensidade de ruído e inter-relação entre eles

O fator de ruído f , para um sistema de recepção é composto de um número de fontes de ruído no terminal de recepção do sistema. Os ruídos internos e externos devem ser considerados. É tomado como ponto de referência para o fator de ruído total em um sistema de recepção de rádio à entrada de uma antena de recepção livre de perdas (antena ideal). Para receptores livres de respostas de espúrios, o fator de ruído do sistema é dado por:

$$f = f_a + (f_c - 1) + l_c (f_t - 1) + l_c l_t (f_r - 1) \quad \text{Equação 33}$$

em que

f_a é o fator de ruído externo dado por;

$$f_a = \frac{P_n}{k t_0 b} \quad \text{Equação 34}$$

p_n : potência de ruído na antena ideal (W);

k : constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;

t_0 : temperatura (Kelvin) de referência = 290 K;

b : largura de faixa da potência de ruído no sistema de recepção (Hz);

l_c : perda no circuito da antena (potência de entrada/potência de saída);

l_t : perda na linha de transmissão (potência de entrada/potência de saída);

f_r : fator de ruído no receptor.

F_r é o fator de ruído no receptor em dB definida por:

$$F_r = 10 \log f_r \quad (dB) \quad \text{Equação 35}$$

f_c é o fator de ruído associado às perdas de circuito da antena, dado por:

$$f_c = 1 + (l_c - 1) \left(\frac{t_c}{t_0} \right) \quad \text{Equação 36}$$

f_t é o fator de ruído associado à perda na linha de transmissão, dado por:

$$f_t = 1 + (l_t - 1) \left(\frac{t_t}{t_0} \right) \quad \text{Equação 37}$$

em que:

t_c é a temperatura real (K) da antena e próximo à superfície terrestre;

t_t é a temperatura real (K) da linha de transmissão.

Se $t_c = t_t = t_0$ o fator de ruído do sistema, da Equação 33 torna-se:

$$f = f_a - 1 + f_c f_t f_r \quad \text{Equação 38}$$

Da Equação 34, a potência de ruído na antena ideal é dada por:

$$P_n = F_a + B - 204 \quad (dBW) \quad \text{Equação 39}$$

em que:

$P_n = \log p_n$: potência de ruído disponível nos terminais de uma antena ideal;

F_a é a figura de ruído externo definida por:

$$F_a = 10 \log f_a \quad (dB) \quad \text{Equação 40}$$

$B = 10 \log b$, e $10 \log kt_0 = -204$ dBW.

Para um monopolo vertical curto ($h \ll \lambda$) acima da superfície terrestre, a componente vertical da intensidade de campo rms é dada por:

$$E_n = F_a + 20 \log f_{MHz} + B - 95,5 \quad dB(\mu V / m) \quad \text{Equação 41}$$

em que:

E_n : intensidade de campo na largura de banda b , e

f_{MHz} : frequência central (MHz).

Similarmente, para um dipolo de meia onda no espaço livre, tem se:

$$E_n = F_a + 20 \log f_{MHz} + B - 99 \quad dB(\mu V / m) \quad \text{Equação 42}$$

O fator de ruído externo é também expresso através da temperatura, t_a , em que, pela definição de f_a :

$$f_a = \frac{t_a}{t_0} \quad \text{Equação 43}$$

Em que, t_a é a temperatura da antena efetiva devido ao ruído externo e t_0 é a temperatura de referência (290K).

Da estimativa de F_a o valor correspondente de E_n pode ser determinado fazendo uso da Equação 41 ou da 42, conforme o tipo de antena empregado.

A Figura 46 especifica os valores de F_a , na faixa de frequência 0,1 Hz a 10^4 Hz ao longo das curvas de ruído atmosférico esperado. A linha contínua corresponde ao mínimo dos valores médios esperados de F_a , baseado em medidas realizadas em toda a superfície da Terra, em todas as estações do ano e horário, e a tracejada dá os valores máximos esperados. Observa-se que, nesta faixa de frequência, a variação sazonal, diária ou geográfica, é mínima. A maior variação ocorre na faixa de 100-10.000 Hz devido à variabilidade do limite do guia de onda Terra-ionosfera.

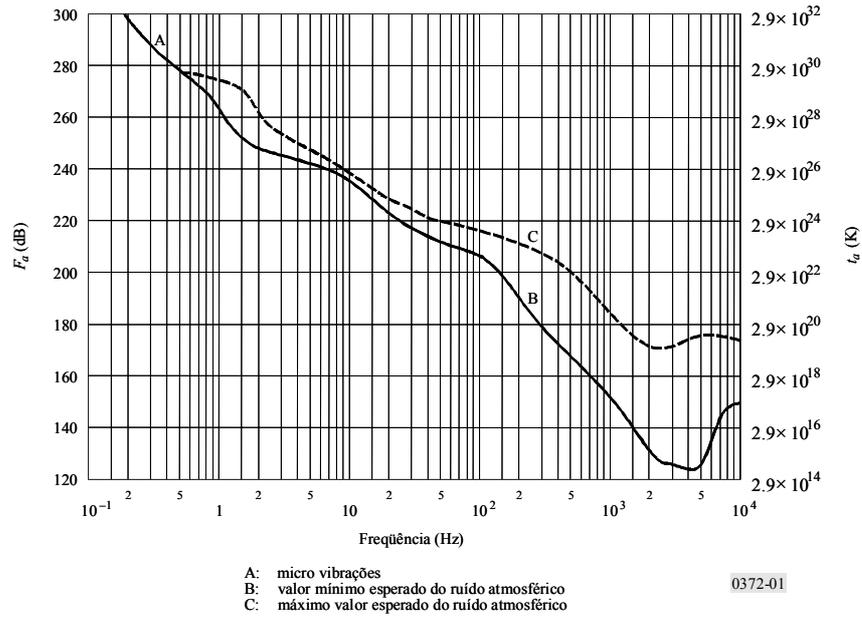


Figura 46 – Valores máximo e mínimo de F_a em função da frequência

Fonte: (UIT-R P.372-8, 2005)

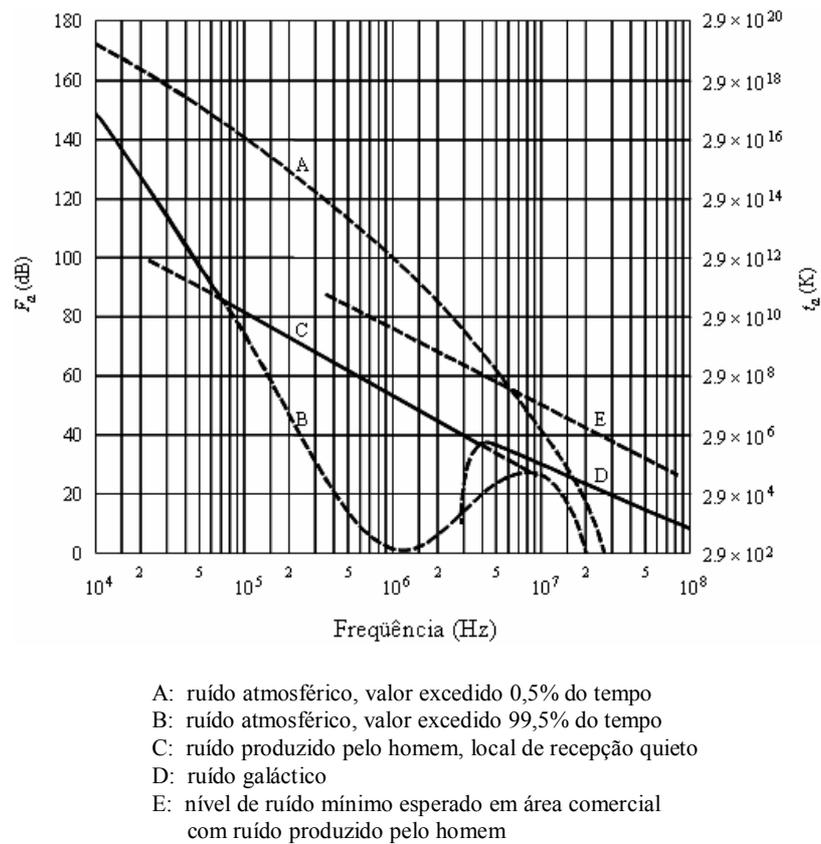


Figura 47 – F_a em função de frequência

Fonte: (UIT-R P.372-8, 2005)

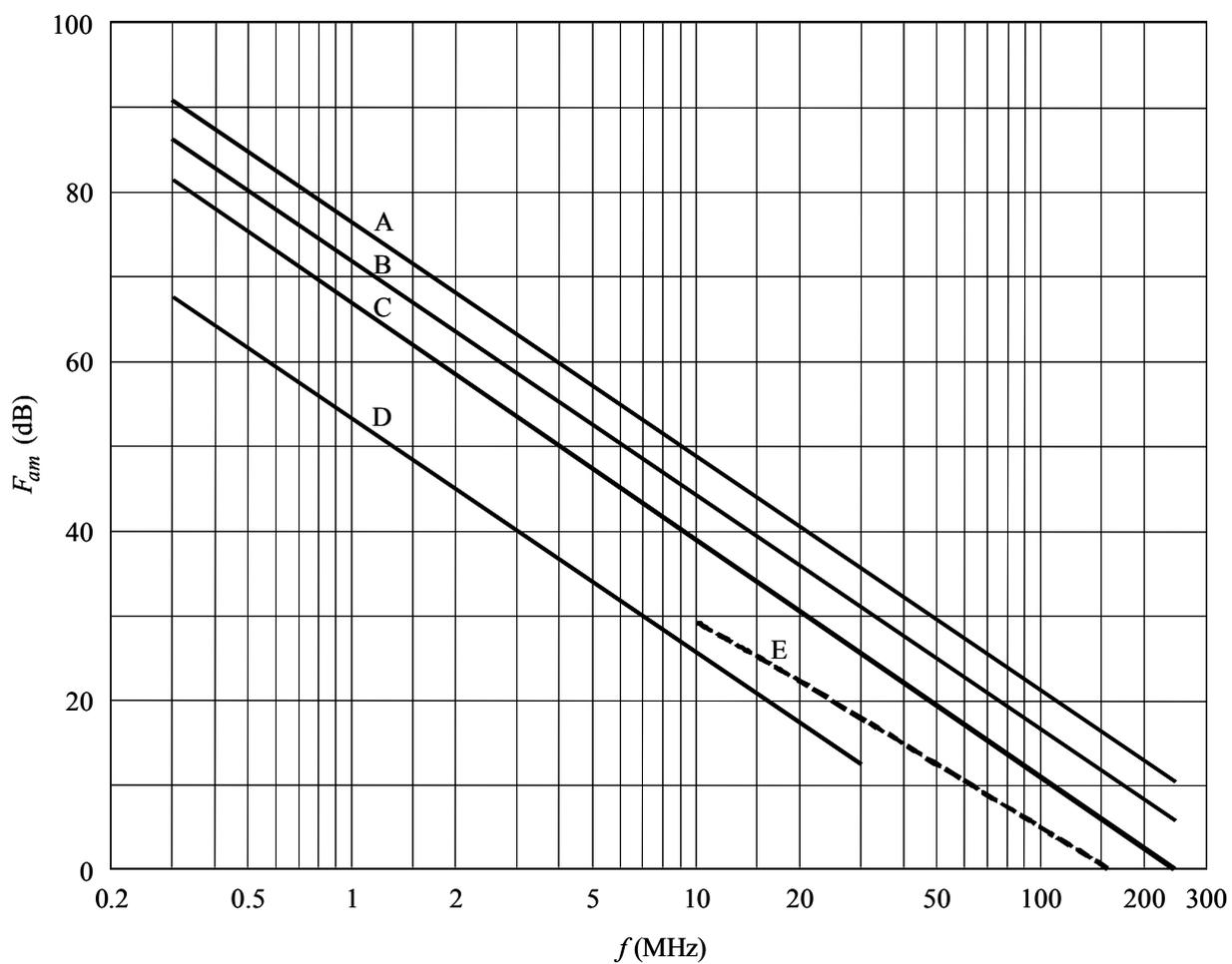
A Figura 47 cobre a faixa de frequência de 10^4 a 10^8 Hz, i.e., 10 kHz a 100 MHz, para várias categorias de ruído. O ruído mínimo esperado é mostrado pela curva contínua. Para o ruído atmosférico, o valor mínimo das medianas horárias esperadas são aqueles cujos valores excedem 99,5% das horas, e os valores máximos são aqueles excedidos 0,5% das horas. Para as curvas de ruído atmosférico foram consideradas todas as horas do dia, estações do ano, e toda a superfície terrestre. A maioria dos resultados mostrados nesta figura é de antenas omnidirecionais. Para as antenas direcionais, entretanto, verificou-se que, em HF, há uma variação de 10 dB no ruído atmosférico proveniente de descargas atmosféricas em antenas com feixe muito estreito, de acordo com a direção da antena, a frequência e a localização geográfica. Quanto ao ruído galáctico, o valor médio é dado pela curva contínua (Figura 47) e as medidas indicam uma variação de mais ou menos 2 dB sobre esta curva.

8.1.3 Ruído produzido pelo homem

A amplitude do ruído produzido pelo homem diminui com o aumento da frequência e varia conforme a localização. Os ruídos são originados de motores elétricos, sinais de *néon*, linhas de potência e sistemas de ignição localizados à distância de poucas centenas de metros da antena receptora. A propagação, normalmente, ocorre por transmissão em linha de potência e por onda terrestre. Para frequências abaixo de 20 MHz, entretanto, a propagação também pode ser realizada via onda ionosférica (MASLIN, 1987). A Figura 48 mostra os valores médios da potência de ruído produzido pelo homem em vários ambientes, bem como a curva de ruído galáctico, para uma antena do tipo monopolo vertical curto sem perda. O resultado da análise de todos os casos mostra que há uma variação linear do valor médio (F_{am}) com a frequência f da seguinte forma:

$$F_{am} = c - d \log f \quad \text{Equação 44}$$

Com f em MHz, c e d conforme a Tabela 13. A Equação 44 é válida na faixa de 0,3 a 250 MHz para todas as categorias ambientais, exceto para as curvas D e E, cujas faixas de frequências são, respectivamente, de 0,3 a 30 MHz e 10 a 250 MHz, conforme a Figura 48.



Categoria ambiental::

- Curves A: comercial
- B: residencial
- C: rural
- D: rural silencioso
- E: galáctico

Figura 48 – Valores médios da potência de ruído produzido pelo homem

Fonte: (UIT-R P.372-8, 2005)

Tabela 13 – Valores das constantes c e d

Categoria ambiental	c	d
Comercial (curva A)	76,8	27,7
Residencial (curva B)	72,5	27,7
Rural (curva C)	67,2	27,7
Rural silencioso (curva D)	53,6	28,6
Ruído galáctico (curva E)	52,0	23,0

Fonte: (UIT-R P.372-8, 2005)

Para as categorias comercial, residencial e rural, a média dos desvios decis da potência de ruído em relação ao horário, na faixa de frequência da Figura 48, é dada na Tabela14. Essa tabela também apresenta os valores de desvio de acordo com o ambiente de ruído. Deve-se assumir que essas variações não são correlatadas e que a metade das distribuições log-normal, em cada lado da mediana, são apropriadas. Esses valores foram medidos nos anos 70 e devem mudar com o passar do tempo, pois são dependentes das atividades que geram o ruído produzido pelo homem.

Tabela 14 – Valores de desvios decis do ruído produzido pelo homem

Categoria	Decil	Variação com a hora (dB)	Variação com a localização (dB)
Comercial	Superior	11,0	8,4
	Inferior	6,7	8,4
Residencial	Superior	10,6	5,8
	Inferior	5,3	5,8
Rural	Superior	9,2	6,8
	Inferior	4,6	6,8

Fonte: (UIT-R P.372-8, 2005)

8.1.4 Ruído atmosférico provocado por descarga atmosférica

São apresentados na Recomendação UIT-R P.372-8, 2005, os gráficos mundiais em que os valores médios esperados de ruído de rádio atmosférico são calculados (F_{am} (dB)) em relação a $k T_0 b$, na frequência de 1 MHz, para cada estação do ano e em períodos de quatro horas, em hora local. Há também os gráficos com a variação de F_{am} com a frequência em períodos de quatro horas para cada estação do ano, e a variação da frequência com outros parâmetros de ruído. A antena de referência é o monopolo vertical curto em um plano condutor perfeito. Observa-se que os valores de ruído atmosférico apresentam níveis mais baixos do que os níveis esperados do ruído produzido pelo homem e de ruído galáctico. Esses valores devem ser usados com cautela, pois representam somente uma estimativa de níveis de ruído atmosférico, sem a presença de outros tipos de ruído. O ruído atmosférico provocado por descarga atmosférica é geralmente não Gaussiano, e a função densidade de probabilidade é importante para determinar o desempenho dos sistemas digitais.

9 ANEXO B – CÁLCULO DA MUF

Segundo a Recomendação UIT-R P.533-8, a predição da MUF de um modo de propagação, que reflete na camada E em um percurso de comprimento D, é calculada da seguinte forma:

$$E(D)MUF = foE \cdot \cos^{-1} i_{110} \quad \text{Equação 45}$$

em que i_{110} é o ângulo de incidência em uma altura virtual de 110 km. O ângulo de incidência é igual a $74,62^\circ$ para D igual a 800 km, distância aproximada entre Brasília, estação transmissora, e Campinas, estação receptora das medições realizadas em campo,.

A seguir é descrito o cálculo da frequência crítica foE (MHz) conforme a Recomendação UIT-R P.1239.

$$(foE)^4 = ABCD \quad \text{Equação 46}$$

onde:

❖ **A – É o fator de atividade solar, dado por:**

$$A = 1 + 0,0094(\Phi - 66) \quad \text{Equação 47}$$

em que Φ é o fluxo do raio solar encontrado na Recomendação UIT-R P.371. Para o número de manchas solares igual a zero o valor do fluxo é 62.

$$A = 1 + 0,0094(62 - 66) = 0,962 \quad \text{Equação 48}$$

❖ **B – É o fator sazonal, dado por:**

$$B = \cos^m |\lambda - \delta| \quad \text{Equação 49}$$

em que:

λ : é a latitude geográfica do receptor, é considerada positiva no Hemisfério Norte. A latitude de Campinas, localização da estação receptora nas medições em campo, é $-22,90^\circ$;

δ : é a declinação solar, considerada positiva a declinação norte. A declinação solar no período das medições é $-19,59^\circ$.

Então, $|\lambda - \delta| = 3,31^\circ$.

O expoente m é uma função da latitude geográfica, λ :

$$m = -1,93 + 1,92 \cos \lambda$$

Como λ é igual a $-22,90^\circ$, $m = -0,161$, e:

$$B = \cos^{-0,161} 3,31 = 1,000319 \quad \text{Equação 50}$$

❖ **C – é o fator latitude, dado por:**

$$C = X + Y \cos \lambda \quad \text{Equação 51}$$

em que:

$$X = 23, Y = 116 \quad \text{para } |\lambda| < 32^\circ.$$

logo,

$$C = 23 + 112 \cos(-22,90) = 126,173 \quad \text{Equação 52}$$

❖ **D – é o fator conforme a hora do dia, dado por:**

- Para $\chi = 50^\circ$, período matinal:

$$D = \cos^p \chi \quad \text{Equação 53}$$

em que p é igual a 1,20 para $|\lambda| > 12^\circ$ e χ é o ângulo zenital solar, logo:

$$D = \cos^{1,20} 50 = 0,5884 \quad \text{Equação 54}$$

- Para $\chi = 80^\circ$, período vespertino:

$$D = \cos^p (\chi - \delta_\chi) \quad \text{Equação 55}$$

em que:

$$\delta_\chi = 6,27 \times 10^{-13} (\chi - 50)^8, \text{ e p é igual a 1,20 para } |\lambda| > 12^\circ, \text{ então:}$$

$$\delta_\chi = 6,27 \times 10^{-13} (80 - 50)^8 = 0,411$$

logo,

$$D = \cos^{1,20} (80 - 0,41) = 0,1283 \quad \text{Equação 56}$$

- Para $\chi = 92^\circ$, período noturno:

$$D = (0,0072)^p e^{-1,4h} \quad \text{Equação 57}$$

em que

p é igual a 1,20 para $|\lambda| > 12^\circ$, e h é o número de horas após o pôr do sol.

$$D = (0,0072)^{1,20} e^{-1,4 \times 2} = 0,002587 \quad \text{Equação 58}$$

ou

$$D = (0,0072)^p e^{(25,2-0,28\chi)} \quad \text{Equação 59}$$

$$D = (0,0072)^p e^{(25,2-0,28 \times 92)} = 0,0243 \quad \text{Equação 60}$$

o que for maior.

➤ Cálculo da MUF para o período matinal

Da equação 46, temos:

$$(foE)^4 = ABCD$$

$$foE = (0,962 \times 1 \times 126,173 \times 0,5884)^{0,25}$$

$$foE = 2,91 \text{ MHz}$$

logo, a MUF, Equação 45, é igual a:

$$E(800)MUF = f_oE \times \cos^{-1}i_{110}$$

$$E(800)MUF = 2,91 \times \cos^{-1}74,62^\circ$$

$$\mathbf{E(800)MUF = 10,96 \text{ MHz}}$$

➤ **Cálculo da MUF para o período vespertino**

$$f_oE = (0,962 \times 1 \times 126,173 \times 0,1283)^{0,25}$$

$$f_oE = 1,99 \text{ MHz}$$

logo, a MUF, Equação 45, é igual a:

$$E(800)MUF = f_oE \times \cos^{-1}i_{110}$$

$$E(800)MUF = 1,99 \times \cos^{-1}74,62^\circ$$

$$\mathbf{E(800)MUF = 7,50 \text{ MHz}}$$

➤ **Cálculo da MUF para o período noturno**

$$f_oE = (0,962 \times 1 \times 126,173 \times 0,0243)^{0,25}$$

$$f_oE = 1,31 \text{ MHz}$$

logo, a MUF, Equação 45, é igual a:

$$E(800)MUF = f_oE \times \cos^{-1}i_{110}$$

$$E(800)MUF = 1,31 \times \cos^{-1}74,62^\circ$$

$$\mathbf{E(800)MUF = 4,94 \text{ MHz}}$$

10 ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS

10.1 Transceptor HF modelo TW 7000 com acessórios e fonte

Fabricante: Datron World;

Faixa de frequências: 1,6 a 30 MHz;

Espaçamento entre canais de 10 Hz;

Estabilidade de frequência: 0.1 ppm (com módulo de alta estabilidade);

Modos de modulação: USB, LSB, CW, AME e FSK;

Operação: Simplex ou *half*-Duplex;

Impedância de saída para antena: 50 ohms – conector UHF para antenas de banda larga;

Potência máxima de saída em RF: 125 watts;

Potência média de saída (nominal): 100 watts;

Display alfanumérico com frequências selecionáveis no teclado;

256 canais de memória programáveis;

Varredura cíclica de canais selecionados pelo operador;

Proteção na entrada contra transientes;

Temperatura de operação: -30 a +60° C;

Harmônicos: -60 dB (2 a 30 MHz);

Sensibilidade do receptor: 10 dB SINAD para 0.5 μ V na entrada (2 a 30 MHz);

Atenuador: +20 dB, selecionado pelo operador;

Sistemas TRANSCALL e SELCALL (*Selective Calling*);

Sistema ALE: 7000ALE FED-STD-1045A ALE;

Filtro de banda larga para dados: Wideband data filter (MIL-STD-188-110B);

Controle para porta COM: Protocolo RS422/423/485.

10.2 MODEM 5300 para HF

Fabricante: Datron World;

Taxa de dados: Até 3000 bps sem compressão;

Transmissor de áudio: -30 a 0 dbm, 600 ohms;

Receptor de áudio: -30 a 0 dBm, 600 ohms;

Largura da banda: 500 - 2500 Hz;

Tipos de Modulação: BPSM, QPSM, 8PSM, 8P2A e 16P4A;

Modos: Transferência de arquivo em binário, modo chat;

Proprietário da forma de onda: X – CLOVER (CCIR: 2K0HJ2DEN);

Correção de erro: Codificação Reed-Solomon;

Correção de percurso: ARQ nível 2, adaptativo e seletivo.

10.3 Analisador de espectro ANRITSU

Fabricante: ANRITSU;

Número do modelo: MS2665C;

Faixa de frequência: 9 kHz a 21,2 GHz;

Largura de banda: até 20 MHz;

Largura de banda estreita, opcional: 1 Hz;

Velocidade de transmissão de dados: GPIB igual a 120 kbytes/s;

Porta de interface: RS-232C;

Interface Centronics;

Nível de ruído médio baixo: -146 dBm/Hz, 1 MHz a 3,2 GHz;

Varredura em alta velocidade: 20 vezes/s;

Span de frequência: 0 Hz, 1 kHz a 21,3 GHz;

Resolução da largura de banda: 30 Hz a 300 Hz;

Demodulador AM / FM;

Oscilador de cristal com alta estabilidade;

Frequência do oscilador: 10 MHz;

Nível de medida:

Faixa de medida: Média do nível de ruído = + 30 dBm;

Máximo nível de entrada: + 30 dBm (potência média CW, RF ATT: ≥ 10 dB), ± 0 Vdc;

Resposta residual: ≤ -90 dBm (RF ATT: 0 dB, entrada: 50 Ω , 1 MHz a 8,1 GHz);

Nível de referência:

Log da escala: - 100 a + 30 dBm. Unidades: dBm, dB μ V, dBmV, V, dB μ Vemf, W;

Escala linear: 224 μ V a 7,07V. Unidade: V;

Zona marker: NORMAL, DELTA;

Função multimarker: pode medir até 10 harmônicos da portadora, como também os 10 níveis de espúrios mais altos dentro do span de frequência;

Cartão de memória até 2 MBytes;

Operação em temperatura ambiente: de 0° a + 50° C.

11 ANEXO D – ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS DO RUÍDO NO AMBIENTE

A Figura 49 mostra o espectro de frequência do ruído no ambiente com *span* de 27 MHz. As Figuras 50 à Figura 62 ilustram o espectro com *span* de 2 MHz.

As medições do ambiente foram realizadas em vários dias, pela manhã e à tarde, apresentando resultados similares, resguardadas as variações do nível de ruído ao longo do dia e ao entardecer, típicas da faixa em HF. Por essa razão foram dispostos neste item apenas os resultados de um dos dias de medição, no período da manhã.

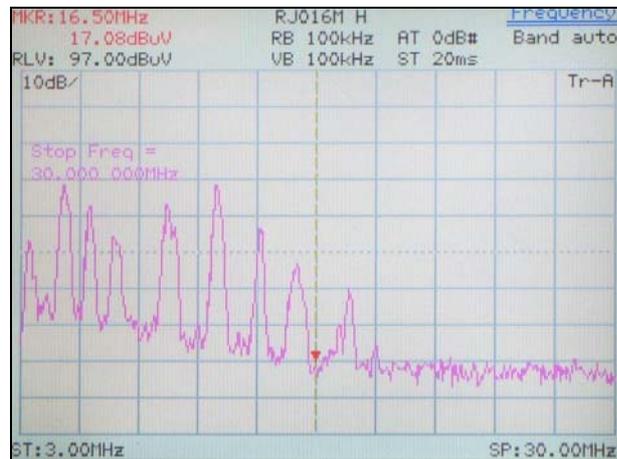


Figura 49 – Antena dipolo – medição do espectro de 3 a 30 MHz

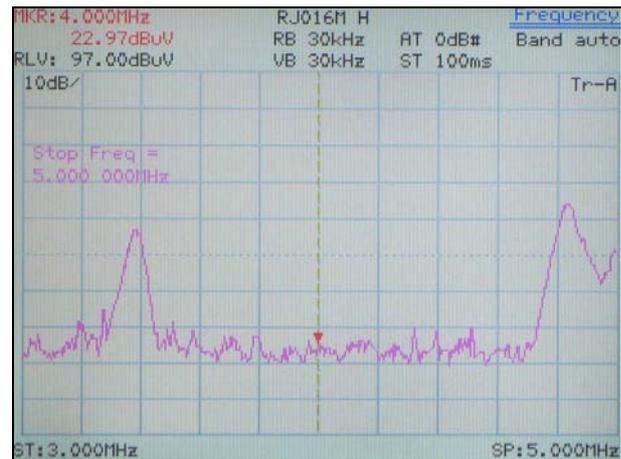


Figura 50 – Antena dipolo – medição do espectro de 3 a 5 MHz



Figura 51 – Antena dipolo – medição do espectro de 5 a 7 MHz

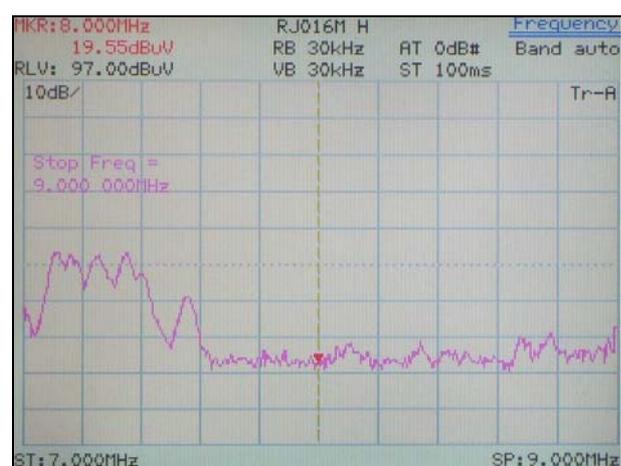


Figura 52 – Antena dipolo – medição do espectro de 7 a 9 MHz

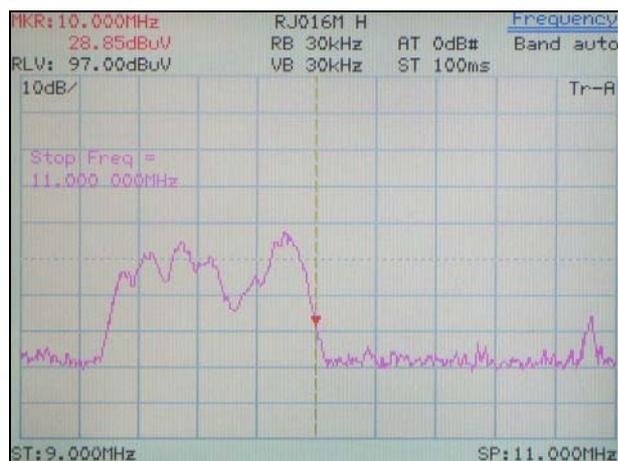


Figura 53 – Antena dipolo – medição do espectro de 9 a 11 MHz

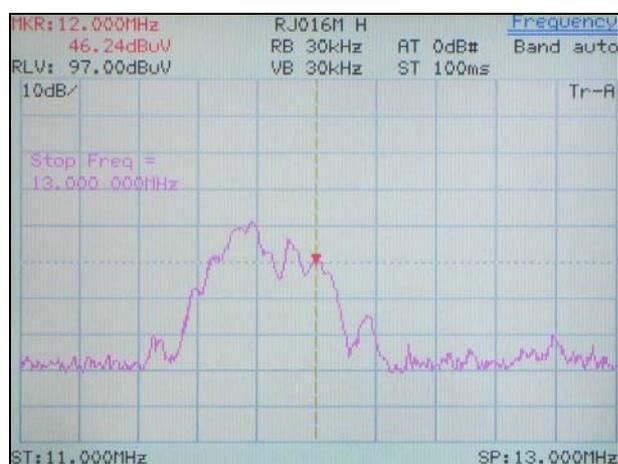


Figura 54 – Antena dipolo – medição do espectro de 11 a 13 MHz

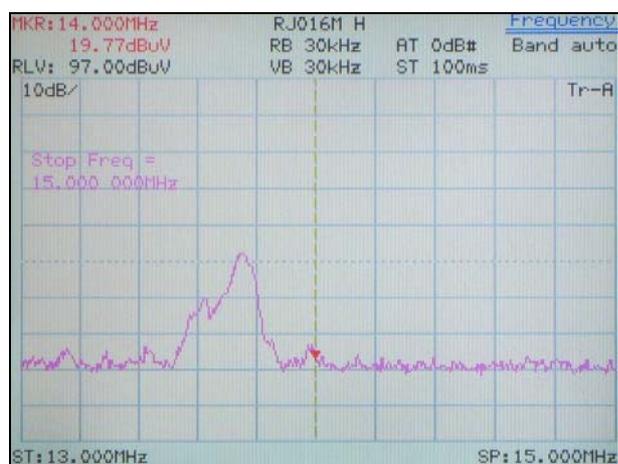


Figura 55 – Antena dipolo – medição do espectro de 13 a 15 MHz

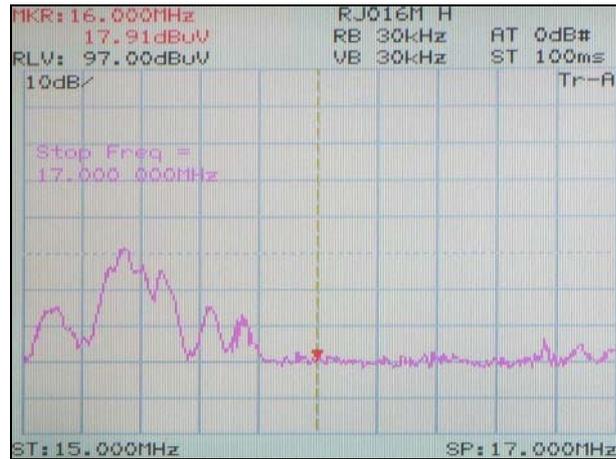


Figura 56 – Antena dipolo – medição do espectro de 15 a 17 MHz

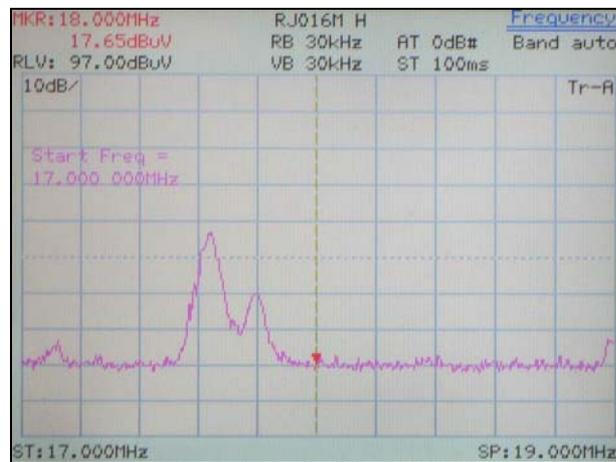


Figura 57 – Antena dipolo – medição do espectro de 17 a 19 MHz

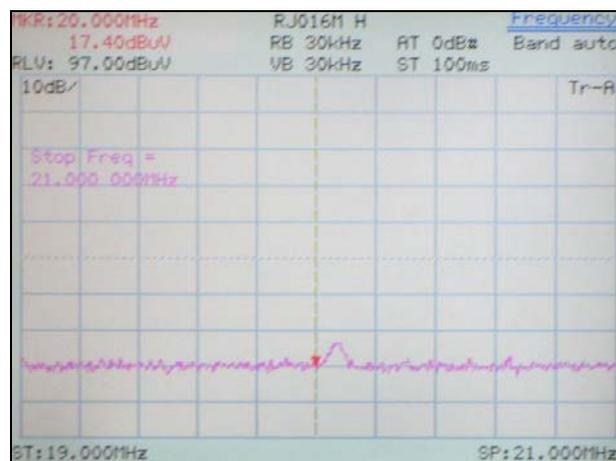


Figura 58 – Antena dipolo – medição do espectro de 19 a 21 MHz

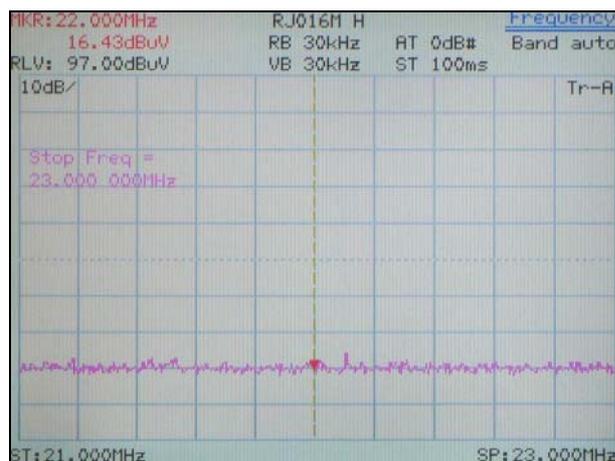


Figura 59 – Antena dipolo – medição do espectro de 21 a 23 MHz

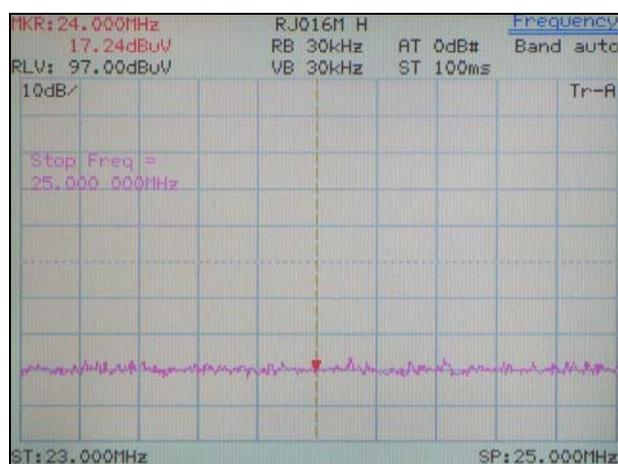


Figura 60 – Antena dipolo – medição do espectro de 23 a 25 MHz

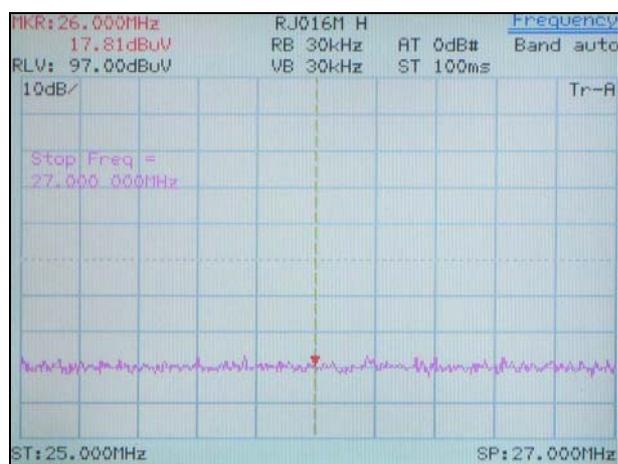


Figura 61 – Antena dipolo – medição do espectro de 25 a 27 MHz

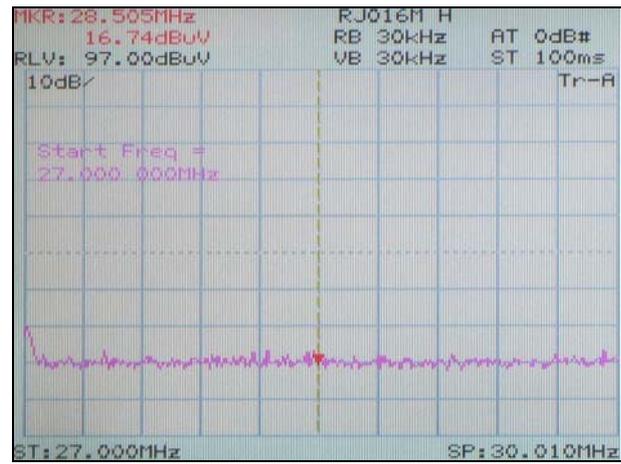


Figura 62 – Antena dipolo – medição do espectro de 27 a 30 MHz

12 ANEXO E – TABELA DE DADOS COLETADOS

A Tabela 15 registra os dados coletados durante as medições realizadas em Campinas-SP, descritas no Capítulo 5. Contém o número da medição na coluna Índice, a Data e o Horário em que o experimento foi realizado, a Frequência operacional disponibilizada pela Aeronáutica e as previsões das MUF calculadas pelos *softwares* ITS HF e PropWiz. Além disso, em cada enlace formado eram avaliadas a clareza e a intensidade do sinal, conforme a Tabela 9 (item 5.6.2), sob a orientação de um operador experiente em sistemas de HF. A coluna Nota mostra a soma dos valores atribuídos à Clareza e à Intensidade do sinal. A avaliação quantitativa foi realizada através do nível médio do sinal, como descrito no item 5.6.2. O Valor teórico é a intensidade do sinal, calculada pela previsão de enlace do *software* ITS HF. A Diferença é o resultado da subtração entre o Nível médio do sinal e o Valor teórico. Foi medido o tempo de transmissão para cada arquivo transmitido. É o que indicam as colunas de Tempo de transmissão dos arquivos 1 kB, 2 kB e 10 kB. Foram calculadas as Taxas de transmissão desses arquivos dividindo-se o tamanho de cada arquivo pelo respectivo tempo de transmissão. Durante a transmissão do arquivo, o protocolo XCLOVER, descrito no item 5.4, fornecia o modo de modulação em que o sinal se encontrava. É o que as colunas Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo, de 1 kB, 2 kB e 10 kB, apresentam. A análise desses dados se encontra no item 5.8.

Tabela 15 – Dados coletados em campo

Índice	Data	Hora	Frequência (MHz)	MUF ₃₀₀₀ F (MHz)	MUF ₃₀₀₀ HF (MHz)	Clareza	Intensidade	Nota	Nível médio do sinal (dBu)	Valor teórico (dBu)	Diferença	Tempo de transmissão do arquivo de 1 KB (s)	Taxa de transmissão do arquivo de 1 KB (Bps)	Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo de 1 KB	Tempo de transmissão do arquivo de 2 KB (s)	Taxa de transmissão do arquivo de 2 KB (Bps)	Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo de 2 KB	Tempo de transmissão do arquivo de 10 KB (s)	Taxa de transmissão do arquivo de 10 KB (Bps)	Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo de 10 KB
1	25-jul-07	9:55	7.3	10.3	9	5	5	10	36,21	37	0,79	23	43,48	8P2A	35,00	57,14	8P2A	130,00	76,92	16P4A, 8P2A, 16P4A
2	25-jul-07	10:19	9.8	10.3	9	4	4	8	26,32	39	12,68	24	41,67	8P2A	52,00	38,46	8PSM	194,00	51,55	8PSM, QPSM, BPSM
3	25-jul-07	10:33	7.3	10.3	9,5	5	5	10	36,81	37	0,19	22	45,45	16P4A	33,00	60,61	16P4A, 8P2A	128,00	78,13	8P2A
4	25-jul-07	11:38	6.8	11	10	4	4	8	25,73	34	8,27	34	29,41	8P2A, 8PSM	98,00	20,41	8PSM, QPSM	202,00	49,50	QPSM, 8PSM, 8P2A
5	25-jul-07	13:22	7.8	11.3	10	4	4	8	33,38	37	3,62	19	52,63	8P2A	25,00	80,00	8P2A	147,00	68,03	16P4A, 8P2A, 8PSM, QPSM
6	25-jul-07	13:32	7.8	11.3	10	4	4	8	35,03	37	1,97	27	37,04	16P4A, 8P2A, 16P4A	33,00	60,61	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A	143,00	69,93	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A
7	25-jul-07	13:42	9.1	11.4	10	4	5	9	25,26	39	13,74	22	45,45	8P2A	20,00	100,00	8PSM, 8P2A	116,00	86,21	QPSM, 8PSM, 8P2A
8	25-jul-07	13:52	13.5	11.4	10	3	4	7	24,86	27	2,14	31	32,26	8P2A	50,00	40,00	8PSM, BPSM, QPSM, 8PSM	241,00	41,49	8PSM, QPSM, 8PSM, QPSM, 8PSM, QPSM
9	25-jul-07	14:23	7.3	11.4	9,5	4	4	8	31,36	38	6,64	43	23,26	8P2A, 8PSM	46,00	43,48	8P2A, 8PSM, 8P2A	145,00	68,97	8PSM, 8P2A, QPSM, 8P2A
10	25-jul-07	15:22	7.9	11,7	9	4	4	8	38,10	39	0,90	32	31,25	BPSM, 8PSM, 8P2A	22,00	90,91	8PSM, 8P2A	137,00	72,99	8P2A, 8PSM, 8P2A
11	25-jul-07	15:59	7.8	12,4	9	5	5	10	34,03	41	6,97	24	41,67	16P4A, 8P2A	31,00	64,52	8P2A	130,00	76,92	8P2A, 8PSM, 8P2A
12	25-jul-07	17:42	7.8	12	8	5	5	10	38,19	43	4,81	29	34,48	16P4A, 8P2A	38,00	52,63	8P2A	122,00	81,97	8P2A, 16P4A, 8P2A
13	25-jul-07	18:07	6.9	12	8	4	4	8	31,68	43	11,32	23	43,48	8P2A	35,00	57,14	8P2A	145,00	68,97	8P2A
14	26-jul-07	9:18	7.9	9,7	9	5	4	9	19,92	39	19,08	30	33,33	BPSM, 8PSM, QPSM, 8P2A	35,00	57,14	8P2A, BPSM, 8PSM	174,00	57,47	8P2A, QPSM, 8PSM
15	26-jul-07	9:30	8.1	9,7	9	3	3	6	21,81	38	16,19	19	52,63	8PSM	36,00	55,56	8PSM	200,00	50,00	8PSM, QPSM, 8PSM, QPSM
16	26-jul-07	9:52	9.1	10,3	9	4	4	8	21,77	39	17,23	27	37,04	16P4A, 8P2A, 16P4A	24,00	83,33	8P2A	131,00	76,34	8P2A, 8PSM
17	26-jul-07	10:00	10.3	10,3	9	5	5	10	18,93	38	19,07	18	55,56	8P2A	44,00	45,45	8P2A, 8PSM, 8P2A	132,00	75,76	8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A
18	26-jul-07	10:10	10.9	10,3	9	5	5	10	14,45	36	21,55	27	37,04	8PSM, 16P4A, 8P2A	26,00	76,92	8P2A, 16P4A, 8P2A	143,00	69,93	8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM
19	26-jul-07	10:18	11.1	10,3	9	3	3	6	21,00	35	14,00	28	35,71	8P2A, 8PSM	31,00	64,52	8P2A, 8PSM	158,00	63,29	8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, QPSM, 8P2A, 8PSM
20	26-jul-07	10:30	12	10,3	9,5	3	3	6	22,79	33	10,21	44	22,73	BPSM, QPSM	81,00	24,69	BPSM, QPSM, 8PSM	154,00	64,94	8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A
21	26-jul-07	10:41	12.1	10,7	9,5	3	3	6	12,99	34	21,01	25	40,00	8PSM, 16P4A, 8P2A	30,00	66,67	8P2A, 8PSM	105,00	95,24	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A
22	26-jul-07	10:54	8.1	10,7	10	5	5	10	34,04	37	2,96	14	71,43	8PSM, 8P2A	26,00	76,92	8P2A	115,00	86,96	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A
23	26-jul-07	11:19	7.8	10,7	10	5	5	10	26,39	37	10,61	25	40,00	8P2A	30,00	66,67	8P2A, 16P4A	110,00	90,91	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A
24	26-jul-07	11:29	7.3	10,7	10	5	5	10	24,33	36	11,67	31	32,26	8P2A, 8PSM	48,00	41,67	8PSM, QPSM, 8PSM	216,00	46,30	8PSM, 8P2A, 8PSM, QPSM, 8PSM, QPSM
25	26-jul-07	11:40	6.9	11	10	3	3	6	36,99	34	2,99	38	26,32	QPSM, 8PSM	79,00	25,32	QPSM	270,00	37,04	8PSM, QPSM, 8PSM, QPSM, BPSM
26	26-jul-07	15:02	7.8	11,7	9	3	3	6	35,21	39	3,79	63	15,87	QPSM	36,00	55,56	8P2A, 8PSM	207,00	48,31	8P2A, 8PSM, 8P2A, QPSM, 8PSM
27	26-jul-07	15:33	7.6	11,7	9	3	2	5	21,52	39	17,48	46	21,74	8P2A, QPSM, 8PSM	47,00	42,55	8PSM, QPSM, 8PSM	253,00	39,53	8PSM, QPSM, 8PSM, QPSM, 8PSM
28	26-jul-07	15:45	7.9	12,4	9	3	2	5	23,74	41	17,26	35	28,57	QPSM	43,00	46,51	8PSM, QPSM, 8PSM	194,00	51,55	8PSM, QPSM, 8PSM, QPSM, 8PSM, 8P2A, 8PSM
29	26-jul-07	16:00	10.9	12,4	9	3	3	6	25,07	40	14,93	13	76,92	8P2A	31,00	64,52	8P2A, 8PSM, 8P2A	207,00	48,31	8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM

Índice	Data	Hora	Frequência (Mhz)	MUF _{min} (Mhz)	MUF _{prop} (Mhz)	Clareza	Intensidade	Nota	Nível médio do sinal (dbu)	Valor teórico (dbu)	Diferença	Tempo de transmissão do arquivo de 1 kb (s)	Taxa de transmissão do arquivo de 1 kb (Bps)	Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo de 1 kb	Tempo de transmissão do arquivo de 2 kb (s)	Taxa de transmissão do arquivo de 2 kb (Bps)	Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo de 2 kb	Tempo de transmissão do arquivo de 10 kb (s)	Taxa de transmissão do arquivo de 10 kb (Bps)	Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo de 10 kb
30	26-jul-07	16:20	9,1	12,4	9	4	4	8	17,10	42	24,90	32	31,25	8P2A, 8PSM	43,00	46,51	QPSM, 8PSM	194,00	51,55	8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, QPSM, 8PSM
31	26-jul-07	16:34	10,8	12,4	9	5	5	10	20,88	40	19,12	26	38,46	8P2A	50,00	40,00	8PSM, QPSM, 8PSM	190,00	52,63	8P2A, 8PSM, 8P2A, QPSM, 8PSM
32	26-jul-07	16:54	10,4	12,8	9	4	4	8	17,59	41	23,41	34	29,41	8PSM	64,00	31,25	8PSM, QPSM, 8PSM	187,00	53,48	8P2A, 8PSM, QPSM, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A
33	26-jul-07	17:04	9,1	12,8	9	4	4	8	24,39	42	17,61	17	58,82	8P2A	31,00	64,52	8PSM	138,00	72,46	8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A
34	26-jul-07	17:26	8,1	12,8	8,5	4	4	8	34,88	42	7,12	60	16,67	8P2A, QPSM, 8PSM	24,00	83,33	8PSM	215,00	46,51	8PSM, QPSM, 8PSM, 8P2A
35	26-jul-07	18:22	7,6	12	8	5	5	10	36,31	44	7,69	20	50,00	8PSM, 8P2A	27,00	74,07	8P2A	118,00	84,75	8P2A, 8PSM, 8P2A
36	26-jul-07	18:31	6,8	12	8	4	4	8	30,57	43	12,43	28	35,71	8P2A, 8PSM	51,00	39,22	16P4A, 8P2A, 8PSM	132,00	75,76	8P2A, 8PSM, 8P2A, 16P4A
37	26-jul-07	18:42	6,4	9,8	8	3	3	6	21,73	43	21,27	24	41,67	8PSM	44,00	45,45	8P2A, 8PSM	192,00	52,08	8P2A, 8PSM
38	26-jul-07	19:52	4,7	7,6	7	5	5	10	25,94	43	17,06	20	50,00	8P2A	68,00	29,41	8P2A, 8PSM	329,00	30,40	8PSM, QPSM, 8PSM, BPSM, QPSM
39	27-jul-07	7:45	7,3	8,5	7	4	4	8	39,78	40	0,22	21	47,62	8P2A	32,00	62,50	16P4A	200,00	50,00	8P2A, 16P4A, 8P2A
40	27-jul-07	7:54	7,3	8,5	8	4	4	8	36,30	40	3,70	30	33,33	16P4A, 8P2A, 8PSM	34,00	58,82	16P4A, 8P2A	149,00	67,11	8P2A, 16P4A, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM
41	27-jul-07	8:01	7,3	8,5	8	4	4	8	33,63	40	6,37	31	32,26	8P2A, 8PSM	45,00	44,44	8PSM	198,00	50,51	8PSM, 16P4A, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A
42	27-jul-07	8:16	6,8	8,5	8	4	4	8	35,17	40	4,83	43	23,26	16P4A, 8P2A	49,00	40,82	8P2A, 16P4A	159,00	62,89	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A, 8P2A, 8P2A
43	27-jul-07	8:26	6,8	8,5	8	4	4	8	31,22	38	6,78	28	35,71	16P4A, 8P2A, 8PSM	49,00	40,82	16P4A, 8PSM	138,00	72,46	8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A
44	27-jul-07	8:33	6,8	8,5	8	4	4	8	34,38	38	3,62	27	37,04	8P2A	28,00	71,43	8P2A	166,00	60,24	8P2A, 16P4A, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 16P4A, 8P2A
45	27-jul-07	8:40	8,1	9,7	8	3	3	6	18,43	39	20,57	18	55,56	8PSM, 16P4A, 8P2A	24,00	83,33	8P2A	144,00	69,44	8PSM, 8P2A
46	27-jul-07	8:47	8,1	9,7	8	3	3	6	24,17	39	14,83	14	71,43	8P2A	25,00	80,00	8P2A	185,00	54,05	8PSM, QPSM, 8P2A, 8PSM
47	27-jul-07	9:00	8,1	9,7	9	3	3	6	31,28	39	7,72	28	35,71	8PSM, 16P4A, 8P2A	34,00	58,82	8P2A, 16P4A	163,00	61,35	8P2A, 8PSM, QPSM
48	27-jul-07	9:09	7,8	9,7	9	3	4	7	24,38	39	14,62	29	34,48	16P4A, 8P2A, 8PSM	28,00	71,43	8PSM, 8P2A	129,00	77,52	8P2A, 8PSM, 8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A
49	27-jul-07	9:17	7,8	9,7	9	4	4	8	34,67	39	4,33	21	47,62	8P2A	32,00	62,50	8PSM, 8P2A	112,00	89,29	8P2A
50	27-jul-07	9:25	7,8	9,7	9	5	5	10	32,40	39	6,60	20	50,00	8P2A, 16P4A	28,00	71,43	16P4A, 8P2A	116,00	86,21	8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A
51	27-jul-07	9:31	7,8	9,7	9	5	5	10	34,68	39	4,32	21	47,62	16P4A, 8P2A	27,00	74,07	8P2A, 16P4A	116,00	86,21	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A
52	27-jul-07	9:37	7,8	9,7	9	5	5	10	29,46	37	7,54	23	43,48	8P2A, 16P4A	38,00	52,63	16P4A, 8P2A, 16P4A	105,00	95,24	8P2A, 16P4A, 8P2A
53	27-jul-07	9:44	7,8	10,3	9	5	5	10	36,01	37	0,99	14	71,43	8P2A, 16P4A	32,00	62,50	16P4A, 8P2A	138,00	72,46	8P2A, 16P4A, 8P2A
54	27-jul-07	9:49	7,8	10,3	9	5	5	10	36,79	37	0,21	27	37,04	16P4A	39,00	51,28	16P4A	115,00	86,96	8P2A, 16P4A, 8P2A, 8PSM, 8P2A
55	27-jul-07	9:56	7,8	10,3	9	5	5	10	32,66	37	4,34	20	50,00	16P4A	37,00	54,05	16P4A, 8P2A, 16P4A	120,00	83,33	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A, 8P2A
56	27-jul-07	10:02	7,8	10,3	9	5	5	10	38,09	37	1,09	27	37,04	16P4A	38,00	52,63	8P2A, 16P4A	114,00	87,72	8P2A, 16P4A
57	27-jul-07	10:08	7,8	10,3	9	5	5	10	30,49	37	6,51	28	35,71	16P4A	29,00	68,97	8P2A, 16P4A	112,00	89,29	8P2A, 16P4A, 8P2A, 8PSM, 8P2A
58	27-jul-07	10:14	7,8	10,3	9	5	5	10	33,20	37	3,80	28	35,71	16P4A	31,00	64,52	8P2A	105,00	95,24	8P2A, 16P4A

Índice	Data	Hora	Frequência (MHz)	MUF ₃₀₀₀ F _{min} (MHz)	MUF ₃₀₀₀ F _{max} (MHz)	Clareza	Intensidade	Nota	Nível médio do sinal (dBu)	Valor teórico (dBu)	Diferença	Tempo de transmissão do arquivo de 1 kb (s)	Taxa de transmissão do arquivo de 1 kb (Bps)	Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo de 1 kb	Tempo de transmissão do arquivo de 2 kb (s)	Taxa de transmissão do arquivo de 2 kb (Bps)	Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo de 2 kb	Tempo de transmissão do arquivo de 10 kb (s)	Taxa de transmissão do arquivo de 10 kb (Bps)	Modulação utilizada durante a transmissão do arquivo de 10 kb
59	27-jul-07	10:20	7,8	10,3	9,5	5	5	10	31,46	37	5,54	25	40,00	8P2A	33,00	60,61	8P2A	129,00	77,52	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A, 8P2A
60	27-jul-07	10:27	7,8	10,3	9,5	4	4	8	31,15	37	5,85	30	33,33	8P2A, 8PSM	48,00	41,67	8P2A, 8PSM	145,00	68,97	16P4A, 8P2A, 8PSM
61	27-jul-07	10:34	7,8	10,3	9,5	4	4	8	23,54	37	13,46	34	29,41	8P2A, 8PSM, 8P2A	21,00	95,24	16P4A	118,00	84,75	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A
62	27-jul-07	13:55	7,9	11,4	10	4	4	8	26,26	38	11,74	31	32,26	8P2A	53,00	37,74	8P2A, 8PSM, 8P2A, 16P4A	299,00	33,44	8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 8PSM
63	27-jul-07	14:07	8,5	11,4	10	5	5	10	35,45	39	3,55	25	40,00	8P2A	37,00	54,05	8P2A, 8PSM, 8P2A	137,00	72,99	16P4A, 8P2A, 8PSM, 16P4A, 8P2A
64	27-jul-07	14:24	8,5	11,4	9,5	5	5	10	27,16	39	11,84	23	43,48	8P2A	53,00	37,74	8PSM, 8P2A	159,00	62,89	16P4A, 8P2A, 16P4A
65	27-jul-07	14:54	8,5	11,7	9	5	5	10	40,58	40	0,58	20	50,00	8P2A, 16P4A	28,00	71,43	16P4A	100,00	100,00	16P4A, 8P2A, 16P4A
66	27-jul-07	15:11	8,5	11,7	9	5	5	10	27,76	40	12,24	14	71,43	8P2A	45,00	44,44	16P4A	102,00	98,04	16P4A, 8P2A, 16P4A, 8P2A
67	27-jul-07	15:18	8,5	11,7	9	5	5	10	35,47	40	4,53	14	71,43	8P2A	30,00	66,67	8P2A	106,00	94,34	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A
68	27-jul-07	15:25	8,5	11,7	9	5	5	10	26,49	40	13,51	26	38,46	16P4A	20,00	100,00	16P4A	107,00	93,46	16P4A, 8P2A
69	27-jul-07	15:30	8,5	11,7	9	5	5	10	24,57	40	15,43	13	76,92	8P2A, 16P4A	31,00	64,52	8P2A	133,00	75,19	16P4A, 8P2A, 8PSM, 8P2A
70	27-jul-07	15:36	8,5	11,7	9	5	5	10	29,97	40	10,03	25	40,00	16P4A	31,00	64,52	16P4A	112,00	89,29	8PSM, 8P2A
71	27-jul-07	15:42	8,5	12,4	9	5	5	10	31,16	42	10,84	20	50,00	8P2A	35,00	57,14	16P4A	155,00	64,52	8P2A, 16P4A, 8P2A, 8PSM
72	27-jul-07	15:49	8,5	12,4	9	5	5	10	29,34	42	12,66	21	47,62	16P4A	24,00	83,33	8P2A	110,00	90,91	16P4A, 8P2A
73	27-jul-07	15:56	8,5	12,4	9	4	4	8	25,82	42	16,18	14	71,43	8P2A, 16P4A	26,00	76,92	8P2A	116,00	86,21	8P2A, 16P4A, 8P2A, 8PSM, 8P2A, 16P4A
74	27-jul-07	16:02	8,5	12,4	9	4	4	8	23,66	42	18,34	22	45,45	16P4A	31,00	64,52	8P2A	109,00	91,74	16P4A, 8P2A, 16P4A
75	27-jul-07	16:10	8,5	12,4	9	5	5	10	32,60	42	9,40	19	52,63	16P4A, 8P2A	25,00	80,00	8P2A, 16P4A	119,00	84,03	16P4A, 8P2A, 16P4A
76	27-jul-07	16:26	8,5	12,4	9	5	5	10	33,01	42	8,99	20	50,00	8P2A, 16P4A	37,00	54,05	16P4A, 8P2A	111,00	90,09	16P4A
77	27-jul-07	16:32	8,5	12,4	9	5	5	10	29,13	42	12,87	19	52,63	8P2A, 16P4A	27,00	74,07	8P2A	113,00	88,50	16P4A, 8P2A, 16P4A
78	27-jul-07	16:39	8,5	12,4	9	5	5	10	35,25	42	6,75	28	35,71	16P4A	29,00	68,97	16P4A	89,00	112,36	16P4A
79	27-jul-07	16:46	8,5	12,8	9	5	5	10	30,40	42	11,60	30	33,33	16P4A	31,00	64,52	8P2A, 16P4A	118,00	84,75	16P4A, 8P2A, 16P4A, 8P2A
80	27-jul-07	17:05	7,8	12,8	9	5	5	10	31,53	42	10,47	17	58,82	16P4A	41,00	48,78	8P2A, 16P4A, 8P2A, 16P4A	104,00	96,15	8P2A
81	27-jul-07	17:10	7,8	12,8	9	5	5	10	37,15	42	4,85	20	50,00	16P4A	36,00	55,56	8P2A	98,00	102,04	16P4A
82	27-jul-07	17:25	7,8	12,8	8,5	5	5	10	30,91	42	11,09	16	62,50	8P2A	33,00	60,61	8P2A, 8PSM	147,00	68,03	16P4A, 8P2A, 8PSM, 8P2A
83	27-jul-07	17:45	6,4	12	8	5	5	10	24,51	43	18,49	43	23,26	8P2A	79,00	25,32	8P2A, 8PSM, 8P2A	151,00	66,23	16P4A, 8PSM, 8P2A, 8PSM