



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO EMPÍRICA DE MODELOS DE
PREDIÇÃO DE FREQUÊNCIAS PARA COMUNICAÇÃO EM
HF EM REGIÕES DE BAIXA LATITUDE**

Antonio Anderson Silva Marques

Brasília-DF, outubro de 2020

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO EMPÍRICA DE MODELOS DE
PREDIÇÃO DE FREQUÊNCIAS PARA COMUNICAÇÃO EM
HF EM REGIÕES DE BAIXA LATITUDE**

ANTONIO ANDERSON SILVA MARQUES

ORIENTADOR: PAULO HENRIQUE PORTELA DE CARVALHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Publicação: PPEE.MP.006
Brasília-DF, outubro de 2020**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL
**ANÁLISE E VERIFICAÇÃO EMPÍRICA DE MODELOS DE
PREDIÇÃO DE FREQUÊNCIAS PARA COMUNICAÇÃO EM HF EM
REGIÕES DE BAIXA LATITUDE**

Antonio Anderson Silva Marques

*Dissertação de Mestrado Profissional submetida ao Departamento de
Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Elétrica*

Banca Examinadora

Paulo Henrique Portela de Carvalho, Dr., ENE/UnB
Orientador

Plínio Ricardo Ganime Alves, Dr., ENE/UnB
Examinador Interno

Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro, Dr., IME
Examinador Externo

Leonardo Rodrigues Araujo Xavier de Menezes,
Dr., ENE/UnB
Suplente

Brasília-DF, _____ de _____ de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

MARQUES, ANTONIO ANDERSON SILVA
ANÁLISE E VERIFICAÇÃO EMPÍRICA DE MODELOS DE PREDIÇÃO DE
FREQUÊNCIAS PARA COMUNICAÇÃO EM HF EM REGIÕES DE BAIXA LATITUDE
[Distrito Federal] 2020.

xv, 104 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UNB, Mestre, Programa de Pós-Graduação Profissional
em Engenharia Elétrica, 2020).

Dissertação de Mestrado Profissional, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia,
Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Automatic Link Establishment | 3. High Frequency |
| 2. Equatorial Spread F | 4. Frequency of Optimum Transmission |
| I. ENE/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARQUES, A. A. S. (2020). Análise e Verificação Empírica de Modelos de Predição de Frequências para Comunicação em HF em Regiões de Baixa Latitude. Dissertação de Mestrado Profissional, Publicação PPEE.MP.006/2020, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: ANTONIO ANDERSON SILVA MARQUES

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise e Verificação Empírica de Modelos de Predição de Frequências para Comunicação em HF em Regiões de Baixa Latitude

GRAU: Mestre

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

ANTONIO ANDERSON SILVA MARQUES

Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) – FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Brasília, DF

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todos aqueles que, embora envoltos em grandes dificuldades, nunca deixaram de buscar os sonhos que carregam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa que me apoiou durante todo o período de construção deste trabalho.

Agradeço aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado em todos os desafios.

Um agradecimento especial para os professores Paulo Henrique Portela de Carvalho e Plínio Ricardo Ganime Alves que me apoiaram durante essa jornada, doando o seu tempo e experiência para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Agradeço ao Exército Brasileiro pelas contribuições, por intermédio da Escola de Comunicações, para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço também à Universidade de Brasília e a todos os professores que compõem o corpo docente do meu curso pela qualidade do ensino oferecido e pelo empenho durante todo o curso.

RESUMO

A escolha correta das frequências de propagação para Alta Frequência (*High Frequency* – HF) é baseada em diversos fatores, em grande parte devido às condições dinâmicas da ionosfera. Essa característica levou à criação de vários modelos de predição, que são bem adaptados a certas regiões geográficas e condições da ionosfera, mas vêm apresentando determinadas imprecisões quando aplicados em regiões de baixa latitude, tal como a Amazônia brasileira. Junto a isso, nos anos recentes, foram desenvolvidas diversas ferramentas para mitigar os problemas típicos do HF, especialmente a técnica de Estabelecimento Automático de Enlaces (*Automatic Link Establishment* – ALE), porém ainda não há um método padronizado para definir as frequências de transmissão a serem empregadas por essa técnica. Além disso, observa-se a necessidade de averiguar o impacto nos enlaces HF de fenômenos que ocorrem na ionosfera no território brasileiro, como o Espalhamento Equatorial da camada F (*Equatorial Spread-F* – ESF). Neste trabalho, foi realizada uma análise comparativa baseada em dados empíricos dos modelos de predição da Frequência Ótima de Trabalho (FOT) de enlaces em HF via ionosfera, a fim de identificar o modelo que melhor se ajusta ao território brasileiro de baixa latitude e indicar ajustes necessários. Também foram avaliados os horários de ocorrência do ESF e o seu impacto na degradação da Razão Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR) dos enlaces em HF. Com base nos dados empíricos, buscou-se estabelecer procedimento que permite ao operador de sistemas em HF via ionosfera a determinação de valores de frequências que aumentam as chances de sucesso de comunicação, quando se emprega a técnica ALE. Em situação em que esse procedimento foi aplicado, obteve-se aumento significativo em termos de disponibilidade do enlace e de SNR.

ABSTRACT

The selection of propagation frequencies for High Frequency (HF) links is based on several factors, largely due to the dynamic conditions of the ionosphere. This characteristic led to the creation of several prediction models, which are well adapted to certain geographic regions and conditions of the ionosphere, but have been showing certain inaccuracies when applied in low latitude regions, such as the Brazilian Amazon. In addition, in recent years, several tools have been developed to mitigate typical HF problems, especially the Automatic Link Establishment (ALE) technique, but there is still no standardized method for defining transmission frequencies to be employed by this technique. In addition, there is a need to ascertain the impact on the HF links of disturbances that occur in the ionosphere in Brazilian territory, such as the Equatorial Spread-F (ESF). In this work, a comparative analysis was carried out based on empirical data of the prediction models of the Frequency of Optimum Transmission (FOT) of links in HF via ionosphere, in order to identify the model that best fits in the low latitude Brazilian territory and to indicate necessary adjustments. The time of occurrence of the ESF and its impact on the degradation of the Signal-to-Noise Ratio (SNR) of the links in HF were also evaluated. Based on the empirical data, an attempt was made to establish a procedure that allows the operator of systems in HF via the ionosphere to determine frequency values that increase the chances of successful communication, when using the ALE technique. When this procedure was applied, a significant increase was obtained in terms of link availability and SNR.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO	4
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2. PROPAGAÇÃO NA IONOSFERA.....	6
2.1. CARACTERÍSTICAS DA IONOSFERA	6
2.1.1. Propagação na Ionosfera.....	7
2.1.2. Ionossondas.....	19
2.1.3. Alterações e Anomalias na Ionosfera.....	22
2.2. ESCOLHA DE FREQUÊNCIAS EM HF	26
2.2.1. MUF, FOT e LUF	27
2.2.2. Tipos de Propagação em HF e influência do ângulo de partida.....	27
2.2.3. Modelos de Predição para Frequências em HF	36
2.2.4. ALE.....	40
3. METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS MODELOS E ESTRUTURAÇÃO DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO.....	47
3.1. A RECOMENDAÇÃO ITU-R F.1148-1	48
3.2. REQUISITOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO E VALORES ENCONTRADOS	50
3.3. DADOS PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DOS MODELOS	56
4. RESULTADOS OBTIDOS.....	59
4.1. DETERMINAÇÃO DA ALTURA DA ANTENA	61
4.2. OBTENÇÃO DAS FOT E DAS SNR PREDITAS EM CADA MODELO	64
4.3. ANÁLISE DA COLETA DAS <i>fc</i> E OBTENÇÃO DAS <i>fc10</i>	70
4.4. DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE FREQUÊNCIAS DO ALE PARA UTILIZAÇÃO NA CAMPANHA	70
4.5. RMSE DOS CONJUNTOS DE FREQUÊNCIAS	72
4.6. COMPARAÇÕES ENTRE FOT DO VOACAP E MÉDIA DAS <i>fm</i>	74
4.7. COMPORTAMENTO DA SNR NA PRESENÇA DO ESF.....	77

4.8. PROCEDIMENTO DE ESCOLHA DE FREQUÊNCIAS PARA O ALE E OUTRAS MEDIDAS	80
5. CONCLUSÃO	83
5.1. PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTE TRABALHO	84
5.2. TRABALHOS FUTUROS.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Desvios sucessivos da direção do raio devido a alterações do índice de refração [27].	11
Figura 2.2 - Componentes ordinária (cor vermelha) e extraordinária (cor verde) em ionograma [28].	12
Figura 2.3 - Polarização elíptica na ionosfera sob influência do campo magnético B_0 .	13
Figura 2.4 - Diagrama de bloco do modelo de Watterson [9].	16
Figura 2.5 - Espectro de frequência para componente magneto-iônica com deslocamento de frequência acentuado [9].	17
Figura 2.6 - Espectro de frequência para componentes magneto-iônicas com baixo deslocamento Doppler [9].	18
Figura 2.7 - Dados de um ionograma [28].	20
Figura 2.8 - Código de cores utilizadas em ionogramas [33].	21
Figura 2.9 - Valores do índice a_p para cada valor do índice K_p [36].	23
Figura 2.10 - Ionograma regular em Cachoeira Paulista-SP (a) comparado a um ionograma onde foi detectado o ESF na ionosonda de São Luís-MA (b) [28].	24
Figura 2.11 - Processo de detecção da altura de reflexão do pulso sem ESF(a) e com ESF (B) [16].	25
Figura 2.12 – Percentual de ocorrência do ESF em Palmas-TO e em Manaus-AM [42].	26
Figura 2.13 - Intensidade do campo elétrico para 1 kW, de acordo com distância e frequência [44].	30
Figura 2.14 - Aspecto esquemático de uma propagação em NVIS [23].	32
Figura 2.15 - Altura virtual da camada F, f_c e MUF(D) em 11/8/20, dados extraídos de [28].	34
Figura 2.16 - Mapa de MUF(3000) em 28/09/2020, às 02h15 UTC [59].	36
Figura 2.17 - Modelos de previsão do VOACAP [46].	39
Figura 2.18 - Modulação 8-FSK do ALE 2G [11].	42
Figura 2.19 - Espectro do ALE 2G, símbolos espaçados de 250 Hz entre 750 Hz e 2500 Hz [52].	42
Figura 2.20 - Probabilidade de sucesso no enlace para ALE 2G e 3G de acordo com as condições do canal [54].	44
Figura 2.21 - Taxas de transmissão com diferentes tamanhos de pacote e de BER [61].	45

Figura 3.1 - Mapa de Frequências Críticas (f_c) do SWS em 2 de outubro de 2020 [55].	52
Figura 3.2 - FOT para o enlace de Cachoeira Paulista e para o de Brasília-Cristalina com alto coeficiente de correlação: 0,97, obtidas no VOACAP.	53
Figura 3.3 - Valores de Kp , no máximo 4, e de ap , no máximo 13, entre 17 e 21 de fevereiro de 2020 [63].	54
Figura 4.1 - Antena RF-1940 a $0,02 \lambda$ do solo.	61
Figura 4.2 - Antena RF-1940 a $0,02 \lambda$ (vermelho), $0,06 \lambda$ (rosa), $0,2 \lambda$ (azul) e $0,4 \lambda$ (verde) do solo.	62
Figura 4.3 - Antena RF-1940 a 1λ do solo.	63
Figura 4.4 - Antena modelo RF-1940 em Cristalina-GO.	63
Figura 4.5 - Instalação da antena modelo RF-1940.	64
Figura 4.6 - FOT (linha azul) obtida com dados da Tabela 3.1 no VOACAP [46].	65
Figura 4.7 - Mediana da SNR (db-Hz) para o enlace entre Brasília-DF e Cristalina-GO utilizando o software VOACAP [46].	66
Figura 4.8 - Mediana da SNR (db-Hz) para o enlace entre Brasília-DF e Cristalina-GO utilizando o software REC533 [46].	67
Figura 4.9 - Frequências, em MHz, para o enlace entre Brasília-DF e Cristalina-GO utilizando o software GRAFEX [56].	69
Figura 4.10 - Média das frequências críticas, intervalo de confiança para 90% da distribuição e o seu 1º decil (f_{c10}).	70
Figura 4.11 - FOT dos modelos de predição versus f_{c10} .	71
Figura 4.12 - FOT do VOACAP e a média da melhor frequência da campanha por horário.	75
Figura 4.13 - SNR com a FOT do VOACAP e a SNR com a média das fm.	76
Figura 4.14 - Correlação entre SNR e escores da técnica ALE dos enlaces da campanha.	76
Figura 4.15 - ESF às 05h00 AM (local), nos dias 18 (a) e 21 (b) de fevereiro de 2020 [28].	77
Figura 4.16 - Queda de 34,04% na média da SNR na presença de ESF.	78
Figura 4.17 - Queda de 30,04% na média de escores de C para D.	78
Figura 4.18 - Somatório de escores e de SNR para todos os dias de campanha.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Descrição de variáveis da equação de Appleton [12]	10
Tabela 2.2 - Estimativas de espalhamento para canais em HF [9].....	14
Tabela 2.3 - Estimativas de perda e de espalhamento para canais em HF [29]	15
Tabela 2.4 - Principais itens apresentados em um ionograma [30, 32].....	21
Tabela 2.5 - Valores dos índices geomagnéticos e nível de perturbação geomagnética [37]..	23
Tabela 2.6 - Influência do ângulo de incidência em NVIS para a f_c de 5,65 MHz	33
Tabela 2.7 - Ângulo de partida necessário para alcançar o receptor em diferentes distâncias (D) no mesmo horário	35
Tabela 2.8 - Diferentes taxas de transmissão de acordo com a SNR no ALE 3G [53].....	43
Tabela 2.9 - SNR necessária para diferentes taxas de transmissão no ALE 3G [54].....	44
Tabela 3.1 - Dados para VOACAP, REC533 e GRAFEX.....	56
Tabela 4.1 - FOT do VOACAP, REC533, GRAFEX; f_{c10} e f_m	72
Tabela 4.2 - RMSE entre as frequências preditas e a melhor frequência obtida empiricamente (Equação 3.2)	73

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ALE	<i>Automatic Link Establishment</i>
ALF	<i>Absorption Limiting Frequency</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
\vec{B}_0	Campo magnético terrestre
BLOS	<i>Beyond Line-Of-Sight</i>
DIS	Distúrbios Ionosféricos Súbitos
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
ESF	<i>Equatorial Spread-F</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
f	Frequência de propagação da onda eletromagnética
f_c	Frequência crítica da camada F
f_{c10}	Primeiro decil das frequências críticas da camada F de 30 dias
FED-STD-1045A	<i>Federal Standard 1045A</i>
f_m	Melhor frequência de transmissão obtida empiricamente embasando-se nos escores da técnica ALE
FOT	<i>Frequency of Optimum Transmission</i>
f_x	Máxima frequência extraordinária
GIRO	<i>Global Ionospheric Radio Observatory</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HPF	<i>Highest Probable Frequency</i>
HSSWS	<i>High Speed Solar Wind Stream</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IONCAP	<i>Ionospheric Communications Analysis and Prediction Program</i>
ITS	<i>Institute for Telecommunication Sciences</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
Kp	<i>Planetarische Kennziffer</i>
LQA	<i>Link Quality Analysis</i>
MELP 600	<i>Mixed Excitation Linear Prediction 600</i>

MIL-STD-188-141A	<i>Military Standard Interoperability and Performance Standards for Data Modems 188-141A</i>
MOF	<i>Maximum Observed Frequency</i>
MUF	<i>Maximum Usable Frequency</i>
MUF(3000)	MUF para a distância de 3.000 km
n(h)	Índice de refração para uma determinada altura h da ionosfera
N(h)	Densidade de elétrons por metro cúbico para uma determinada altura h da ionosfera
NGDT	<i>National Geophysical Data Center</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NRL	<i>Naval Research Laboratory</i>
NTIA	<i>National Telecommunications and Information Administration</i>
NVIS	<i>Near Vertical Incident Skywave</i>
OWF	<i>Optimum Working Frequency</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
REC533	Software desenvolvido a partir da ITU Recommendation P.533-14
RENER	<i>Rede Nacional de Emergência de Radioamadores</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> , desvio-padrão entre duas variáveis
RRF	Rede Rádio Fixa do Exército Brasileiro
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SSN	<i>Smoothed Sunspot Number</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TI	Terra Indígena
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
VOACAP	<i>Voice of America Coverage Analysis Program</i>
WSSUS	<i>Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering</i>
ϵ_0	Permissividade do vácuo
ϵ_i	Permissividade relativa do meio i
λ	Comprimento de onda eletromagnética
ω	Frequência angular de onda eletromagnética

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao longo das últimas décadas, houve uma redução expressiva do número de estações de radiodifusão em Alta Frequência (*High Frequency* - HF), dando espaço para outros sistemas de transmissão com maior capacidade de tráfego, como satélites ou fibra ótica [1]. Porém, em regiões remotas do planeta e, em especial, em regiões remotas brasileiras e da América do Sul, há um uso intenso e, principalmente, sob demanda crescente dessa tecnologia [2].

Nas mais diversas áreas de Terra Indígena (TI) em solo brasileiro, é possível encontrar etnias que dependem massivamente de transmissores em HF [2]. Em algumas aldeias dos grupos indígenas Kayapó ou Yanomami, esse é o único meio de comunicação possível de ser explorado. Esses dois grupos étnicos possuem uma presença extensa em áreas de floresta contínua de difícil acesso. A população Yanomami possui mais de 30 mil pessoas, em áreas da Venezuela e do Brasil, e mais de 200 aldeias somente no território brasileiro. A população Kayapó ultrapassa 8 mil pessoas, em mais de 20 aldeias, todas no Brasil [3]. Dados coletados em 2018 apontam que em diversas TI, em uma área de 106 mil km², 80% das comunicações acontecem via rádios HF [2].

Tal necessidade deu origem inclusive a projetos de construção de redes HF indígenas, como o projeto Expansão da Radiofonia Yanomami, que tem como objetivo estabelecer 87 estações rádio em uma área de aproximadamente 97 mil km² [4]. Tal projeto apresenta semelhanças com outras iniciativas, já institucionalizadas, de Defesa Civil, como a Rede Nacional de Emergência de Radioamadores (RENER), fundada em 2001 através de portaria do Ministério da Integração Nacional [5].

Além do uso civil, o HF também é empregado nas comunicações estratégicas brasileiras, em especial, nas comunicações militares, sendo o meio de transmissão da Rede Rádio Fixa (RRF) do Exército Brasileiro, que opera diuturnamente ao longo de todo o território nacional, com diversas estações espalhadas em distritos isolados ou de fronteira. A RRF permite a transmissão de voz, dados e telegrafia [6]. Há também o uso do HF para comunicações táticas em rádios portáteis, amplamente empregados em regiões de conflitos na Amazônia, onde a magnitude da área territorial é impeditiva para a instalação de estruturas fixas de comunicações, tais como as que existem em outras regiões do Brasil com maiores facilidades de acesso [7].

O canal HF, especialmente quando são realizadas transmissões via ionosfera, pode ser caracterizado como de baixa Razão Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR), desvanecimento lento e seletivo em frequência [8]. O espalhamento temporal (*delay spread*) devido a múltiplos percursos pode chegar a até 7 ms em baixas latitudes, sendo maior que o tempo de símbolo da maioria absoluta das transmissões de dados atuais, o que implica em severa Interferência Intersimbólica (*Intersymbol Interference* - ISI) [9].

Essas características inviabilizavam taxas de transmissões de dados acima de 4,8 kbps sem o emprego das técnicas atuais de processamento digital de sinais (*Digital Signal Processing* - DSP) [8]. Uma das soluções para redução dos problemas típicos de HF é a técnica de Estabelecimento Automático de Enlace (*Automated Link Establishment* - ALE) [10], que realiza sondagens de frequências distintas entre as estações, avaliando em um sistema de escores (de 0 a 100; quanto maior, melhor) a SNR, o *delay spread* e o efeito Doppler, escolhendo para os usuários automaticamente a melhor frequência de operação, a qual pode oscilar em vários MHz ao longo do dia, estação do ano, ou ciclo solar [11]. Porém, cabe ressaltar que, embora a técnica selecione a melhor frequência, o operador do sistema ainda deve determinar quais frequências serão utilizadas para que o ALE faça suas sondagens e, conseqüentemente, determine as pontuações em escores. Se as frequências forem mal escolhidas, mesmo com o ALE, o sistema poderá ter desempenho com SNR insuficiente para a comunicação e, dessa forma, surge a necessidade de se desenvolver uma metodologia para obter as melhores frequências para que o ALE as coloque em ordem crescente de pontuação, permitindo que a comunicação seja efetivada com a melhor SNR possível.

Outras técnicas de DSP têm também apresentado resultados notáveis, como as descritas na norma militar MIL-STD-188-110C [11], que padroniza uma série de especificações para modems de rádios de comunicações táticas de longa distância. O documento, elaborado pelo U.S. DoD americano, determina o tipo de modulação, tamanho da constelação, métodos de *scrambling*, filtros de modulação e demais especificações, para se alcançarem até 120 kbps na largura de banda de 24 kHz, considerada banda larga para HF.

1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Embora as técnicas apontadas na norma MIL-STD-188-110C representem o estado da arte para transmissores disponíveis para comercialização em HF, o sucesso da comunicação ainda

depende fortemente da escolha das frequências que serão utilizadas no equipamento rádio, pois sinais com frequências de valores elevados, acima da capacidade eletrônica da ionosfera, podem transpassá-la e sinais com frequências de valores muito baixos podem ser absorvidos. Em ambos os casos, não há reflexão do sinal de volta para o solo e haverá perda da comunicação [12].

Uma das contribuições deste trabalho é definir um método para determinação das frequências de operação do ALE, além de realizar uma análise, a partir de dados empíricos, da acurácia na determinação da Frequência Ótima de Trabalho (FOT) dos modelos de predição de enlace em HF que são recomendados pela *International Telecommunication Union* (ITU) – VOACAP [13] e REC533 [14] – e pelo *Space Weather Services* (SWS) australiano, o GRAFEX [15].

Além das questões envolvendo a escolha das frequências de operação, outra contribuição deste trabalho é avaliar, em situação real, o impacto do Espalhamento Equatorial da camada F (*Equatorial Spread F* - ESF) na qualidade do sinal HF, averiguando a ordem de grandeza do nível de degradação da SNR que o fenômeno provoca, especialmente por haver poucos trabalhos desenvolvidos no sentido de compreender a amplitude do ESF [16, 17] e como este afeta as comunicações HF em território brasileiro.

Trabalhos semelhantes realizados em outros países, como na Indonésia [18], Paquistão [19] e Inglaterra [20], demonstraram que as ferramentas de predição de frequência, para a Máxima Frequência Utilizável (*Maximum Usable Frequency* - MUF), possuem, frente a medições empíricas, baixo erro médio quadrático (*Root Mean Square Error* - RMSE), menor que 1 MHz. Porém, estudos mais amplos, envolvendo várias estações do ano e momentos diferentes do ciclo solar, apresentam erro médio quadrático maior [21, 22], sendo possível encontrar diferenças de até 8 MHz para a MUF em regiões de média latitude [19] e de até 7 MHz em regiões polares [21]. Assim, este trabalho se propõe a averiguar em um estudo empírico pontual como essa variação ocorre no território brasileiro - em particular, em regiões em que a ionosfera passa por perturbações típicas, como o ESF, das áreas de baixa latitude da Terra -, já que há poucos trabalhos, em território nacional, disponíveis na literatura, que verificaram o impacto de uma ionosfera perturbada em equipamentos táticos na faixa do HF.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

Assim como foram desenvolvidos trabalhos específicos para alguns países, sujeitos a fenômenos particulares [18, 20], este trabalho visa a confrontar os dados dos modelos de predição com medições reais em território brasileiro, onde há grande presença do ESF [16], de forma que esses resultados sejam utilizados em futuros planejamentos de comunicações estratégicas, para Forças Armadas [6] e Defesa Civil, e por redes de iniciativa privada, como as redes HF indígenas [4]. Ressalta-se que, devido a complexidades de infraestrutura, à grande quantidade de ensaios necessários para se obter confiabilidade nas medidas, e a localidades indisponíveis para a realização de campanhas empíricas, este trabalho propõe realizar uma campanha de medidas satisfatória, mas adaptada às condições presentes. Contudo, objetiva-se desenvolver uma metodologia que, se replicada em outros locais do território nacional, permitirá aprofundar a compreensão sobre os fenômenos associados à ionosfera que impactam as comunicações em HF.

A principal motivação para este trabalho é verificar quais ferramentas podem aumentar a taxa de sucesso de um enlace em HF nas condições que são experimentadas por estações móveis com potência limitada, já que, conforme pode ser observado em *softwares* de predição, dois transceptores com alta potência, acima de 1 kW cada um deles, terão amplas chances de contato se utilizarem as frequências adequadas. Por outro lado, estações móveis, como as utilizadas em ambientes militares táticos, muitas vezes, estão limitadas a cinquenta vezes menos potência, o que aumenta a necessidade de se determinar criteriosamente como o enlace será montado e continuado ao longo das horas do dia. Embora a escolha de frequências adequadas não seja o único critério que aumente a taxa de sucesso de um enlace HF tático, realizar transmissões com valores de frequência incorretos pode levar à completa interrupção do sistema.

Em síntese, os objetivos deste trabalho são:

1. Obter, a partir de modelos já existentes, resultados para predição de valores de frequências a serem utilizados em enlaces entre transceptores móveis, como ocorre em ambientes militares táticos, no território nacional na faixa do HF;
2. Definir uma metodologia para comparação dessas frequências, que ocorrerá ao serem averiguadas, em condições específicas, em uma campanha de medição empírica. Dessa forma será possível observar o nível de erro médio entre as Frequências Ótimas de

Trabalho (FOT) preditas pelas ferramentas supracitadas e as melhores frequências empíricas - que são sujeitas a diversas perturbações na ionosfera - avaliadas através da SNR e dos escores da técnica ALE, em um enlace HF real utilizando transceptores móveis;

3. Avaliar o impacto do fenômeno ESF na degradação da SNR, em território brasileiro, em um enlace HF real;
4. Apresentar um método para definição das frequências de transmissão a serem empregadas pela técnica ALE, de forma a obter maior disponibilidade do enlace em HF.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 serão apontadas as características essenciais da ionosfera para as transmissões de sinais em radiofrequência, onde será descrito o ESF, os tipos de propagação mais relevantes em HF, os modelos de predição que foram utilizados neste trabalho e outras ferramentas relevantes, como os ionogramas e o ALE. No capítulo 3, será abordada a metodologia que foi utilizada para empregar as ferramentas disponíveis e como foi realizada a campanha de medição. No capítulo 4, os resultados obtidos serão discutidos, com a proposição de um procedimento para escolha das frequências no ALE, para, finalmente, serem apresentadas as conclusões do trabalho.

2. PROPAGAÇÃO NA IONOSFERA

Neste capítulo, serão apresentadas diversas características da ionosfera, desde sua estrutura até fenômenos que possam vir a interferir na propagação de radiofrequência. Também será explorado como é a modelagem do canal HF, apresentando as peculiaridades do desvanecimento em pequena escala em enlaces via ionosfera nessa faixa de frequências.

Também serão apresentadas as ferramentas utilizadas para compreender a ionosfera, em especial as ionossondas, que realizam sondagens periódicas por meio de pulsos de alta potência.

As alterações e anomalias na ionosfera serão abordadas em duas seções, uma relacionada a eventos solares e a tempestades magnéticas e outra relacionada ao ESF, apontando os momentos de ocorrência do fenômeno e o seu impacto na ionosfera.

Outro aspecto abordado são os tipos de propagação em HF, que poderiam vir a ocorrer no enlace da campanha de medição, de forma que sejam utilizados e averiguados apenas enlaces ionosféricos. Por fim, serão abordados os modelos de predição para frequências em HF, que fornecerão as Frequências Ótimas de Trabalho (FOT) a serem utilizadas para identificar o modelo que melhor se adequa às condições de testes propostas.

2.1. CARACTERÍSTICAS DA IONOSFERA

Capazes de estabelecer enlaces em distâncias de centenas ou, até mesmo, de milhares de quilômetros, sem o uso de repetidoras para fortalecer o sinal, as comunicações em HF, através da reflexão das ondas eletromagnéticas na ionosfera, permitem, dentro de suas limitações, que haja um enlace redundante para as comunicações satelitais [10]. Problemas como segurança (e.g. ataques de *jamming* e de *spoofing* em satélites), obstáculos no percurso (e.g. impossibilidade de visada direta para VHF/UHF) e custo elevado (e.g. fibra ótica) podem ser mitigados quando há a possibilidade de comunicação pela ionosfera.

Esse processo de reflexão, entretanto, é bastante influenciado pelas características locais do ambiente onde o sinal está sendo propagado. O principal componente a ser considerado é a densidade eletrônica da ionosfera. Realizando uma descrição sucinta, em épocas de intensa atividade solar, medida pelo Número Suavizado de Manchas Solares (*Smoothed Sunspot Number* - SSN), há maior presença de irradiação, em especial, a ultravioleta, e consequentemente, de elétrons. O aumento da densidade de elétrons provoca o incremento da

frequência crítica das camadas, o que permite, paralelamente, o aumento das frequências para o estabelecimento do enlace. Em épocas de menor radiação, e até mesmo em horários noturnos, exige-se que as frequências sejam reduzidas, caso contrário, os sinais ultrapassarão a ionosfera para fora da Terra [12].

Sendo a ionosfera composta por várias camadas de densidades elétricas distintas, as diferentes combinações de gases - especialmente nitrogênio e oxigênio - e elétrons podem ocasionar vários efeitos de desvanecimento no sinal transmitido [9]. Sua estrutura é composta por íons livres em quantidade suficiente para afetar as propriedades de ondas eletromagnéticas, entretanto a densidade de elétrons pode sofrer grandes variações de acordo com a região geográfica, estação do ano, intensidade de radiação solar e, até mesmo, a hora do dia [8].

Em termos gerais, durante o dia, a atividade solar amplia a densidade elétrica das camadas, subdividindo-as em D, E e F, alcançando extensões entre 50 km a 2.000 km acima da superfície da Terra. O aumento da camada D desfavorece comunicações de maior alcance, já que essa camada possui muitos átomos neutros, que atenuam o sinal na faixa do HF devido às colisões, sendo esse efeito potencialmente mais nocivo às frequências de até 3 MHz, conforme será observado na seção 2.2.3, que aborda os modelos de previsão de frequência. Ao anoitecer, prepondera a camada F, de maior quantidade de elétrons e de ionização mais lenta que a camada D, favorecendo a realização de enlaces e incrementando a SNR, desde que não haja perturbações severas em sua estrutura e que tenha havido, ao longo do dia, um nível de irradiação solar suficiente para a formação dos íons [12].

2.1.1. Propagação na Ionosfera

Os enlaces HF devem ser modelados segundo diversos critérios, tais como a distância entre as estações, multipercursos, alterações da estrutura da ionosfera ao longo da transmissão e nível de ruído local [23, 24].

(a) Perdas no Espaço Livre

Maior atenuação ocorre à medida que os transceptores aumentam a distância entre si e essa perda de energia está presente em qualquer ambiente de propagação sem fio, em especial, naqueles ambientes onde há grande presença de ruído, como em fábricas, ou de sombreamentos, como é observável na presença de obstáculos de grande porte, por exemplo, elevações no terreno ou prédios [25].

A potência recebida, \wp_r em um enlace no espaço livre, desconsiderando fatores de ganho das antenas, em uma modelagem simplificada, está descrita na Equação 2.1 [24],

$$\wp_r(d) = \wp_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{1}{d} \right)^\alpha \text{ [W]} \quad (2.1)$$

em que \wp_t é a potência transmitida, λ é o comprimento de onda da portadora, d é a distância de separação entre transmissor e receptor e α é uma constante de natureza empírica. No espaço livre, α é 2, porém pode variar entre 1,6 e 4 em outras condições de propagação [24]. Pondera-se que esse modelo de espaço livre é válido apenas para valores de d que estão no campo distante da antena do transmissor, dado pela Equação 2.2 [25],

$$d = \frac{2L^2}{\lambda} \text{ [m]} \quad (2.2)$$

sendo L a maior dimensão linear física da antena.

Além da perda no espaço livre, a qual pode ser bastante acentuada em enlaces de centenas de quilômetros para transmissões em HF, há também perdas na ionosfera por polarização [23].

(b) Perdas por Polarização

Considerando a ionosfera um gás ionizado, sua permissividade é complexa, característica de um plasma, que se comporta como um meio condutor imperfeito. Supondo o espaço livre, a permissividade relativa em uma determinada camada i da ionosfera é definida pela Equação 2.3 [26],

$$\epsilon_i = 1 - 3190 \frac{N(h)}{(\omega^2 + \nu^2)} \left[\frac{\text{F}}{\text{m}} \right] \quad (2.3)$$

em que ω é a frequência angular da onda, ν é a frequência de colisões e $N(h)$ é a densidade eletrônica, que sofrerá alterações ao longo do percurso do raio, ou seja, à medida que o raio alcança diferentes alturas h na ionosfera.

Da teoria do campo elétrico, sabe-se que, em um dielétrico perfeito, as ondas se propagam na velocidade:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_i}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (2.4)$$

em que c é a velocidade da luz, ε_i é a permissividade relativa da camada i e v_p é a velocidade de fase da onda. No caso do gás ionizado, da Equação 2.3, devido a alterações na frequência de colisões, ν , e na densidade eletrônica, $N(h)$, ao longo do percurso entre transmissor e receptor, a permissividade relativa ε_i resultará em valores menores que a unidade, pois as variáveis independentes sempre serão maiores ou iguais a zero.

Logo, da Equação 2.4, a velocidade da onda v_p variará de acordo com ε_i e, conseqüentemente, com a frequência da portadora. Meios em que a velocidade da onda varia com a frequência são chamados meios dispersivos, porque isso resulta em dispersão do sinal, ou seja, separação das suas componentes de frequência. Em um meio dispersivo, as componentes harmônicas se deslocam com diferentes velocidades, de forma que, ao chegar ao local de destino, a forma de onda do pulso recebido será diferente da do transmitido, ou seja, haverá distorção da transmissão.

O índice de refração, de cada componente de polarização, no total de duas (componentes 1 e 2), pode ser determinado através da equação de Appleton [12]:

$$n_{1,2}^2 = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \frac{\omega^2 \omega_t^2}{2(\omega^2 - \omega_0^2)} \mp \sqrt{\frac{\omega^2 \omega_t^2}{2(\omega^2 - \omega_0^2)} + \omega^2 \omega_t^2}} \quad (2.5)$$

em que ω_0 é a frequência de plasma, que é a frequência que caracteriza cada camada da ionosfera de acordo com a sua densidade eletrônica, especificada por [26]:

$$\omega_0 = \frac{N(h)e^2}{\varepsilon_0 m} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (2.6)$$

e as variáveis apresentadas nas Equações 2.6 e 2.7 estão descritas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Descrição de variáveis da equação de Appleton [12]

Variável	Descrição
$n_{1,2}^2$	Índice de refração, sendo que a equação de Appleton trará 2 soluções para n .
$N(h)$	Densidade de elétrons por metro cúbico, é influenciada pela altura h de cada camada da ionosfera em que o raio se encontra.
ϵ_0	Permissividade do vácuo.
e	Carga do elétron.
m	Massa do elétron.
ω_t e ω_l	Chamadas de giro-frequências, são proporcionais ao campo magnético da terra, no sentido transversal e longitudinal respectivamente.
ω	Frequência angular da onda eletromagnética propagada.

Outra forma usual de representar a Equação 2.5, desprezando-se a influência do campo magnético terrestre, e utilizando a Equação 2.6, é através da Equação 2.7 [12],

$$n(h) = \sqrt{1 - \left(\frac{81N(h)}{f^2}\right)} \quad (2.7)$$

em que se observa mais claramente a influência da densidade eletrônica ao longo do percurso da onda transmitida, tendo em vista que, na altura do solo, $N(h)$ possui valores próximos de zero, e, à medida que o raio penetra na ionosfera, alcança densidades eletrônicas maiores, especialmente na camada F, o que reduz os valores do índice de refração [27].

As alterações sucessivas de $n(h)$, de acordo com a teoria eletromagnética, provocarão desvios na direção do raio, conforme ilustrado de forma simplificada na Figura 2.1, ao ponto que, se houver densidade eletrônica suficiente na ionosfera para reduzir $n(h)$, e de acordo com os valores da frequência da portadora, o raio incidente irá se afastar cada vez mais da normal, alcançará o ângulo limite e haverá reflexão total, retornando à superfície terrestre.

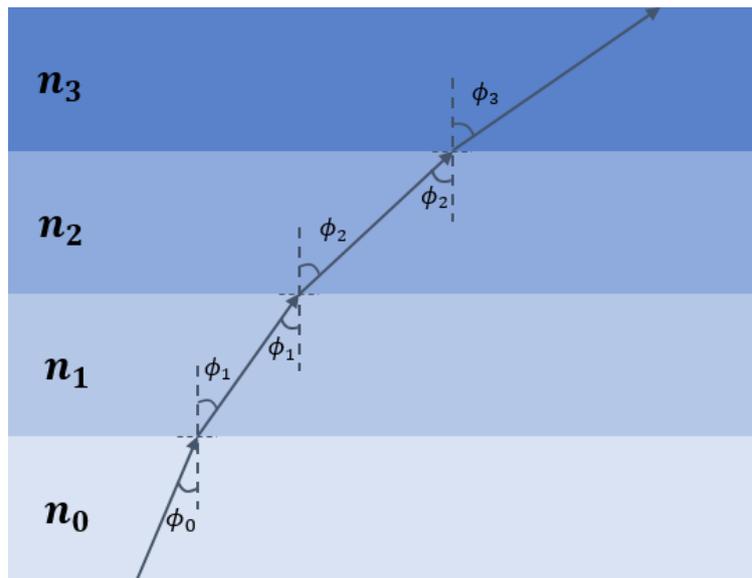


Figura 2.1 - Desvios sucessivos da direção do raio devido a alterações do índice de refração [27].

Após a resolução da equação de Appleton, Equação 2.5, obtêm-se dois índices de refração e, como consequência, será possível observar duas ondas eletromagnéticas que sofrerão refrações – e retornarão para o solo – em momentos distintos, essas são as duas componentes harmônicas na propagação via ionosfera, também conhecidas como componentes magneto-iônicas. Uma das componentes não terá influência do campo magnético da terra, sendo chamada de onda ordinária ou de modo O. A outra componente será influenciada pela magnitude do campo magnético terrestre, chamada de onda extraordinária ou de modo X, sendo possível identificar os dois modos através de ionossondas, conforme Figura 2.2, que apresenta um ionograma de Cachoeira Paulista-SP (maiores considerações sobre os ionogramas serão realizadas na seção 2.1.2). A componente ordinária é identificada pela cor vermelha e a componente extraordinária pela cor verde. Embora sejam originárias do mesmo sinal, sensibilizam o receptor em momentos distintos, ocasionando *delay spread*, e a componente extraordinária, por sofrer influência pelo campo magnético terrestre, alterando sua velocidade, sempre alcança o receptor após a onda ordinária [26].

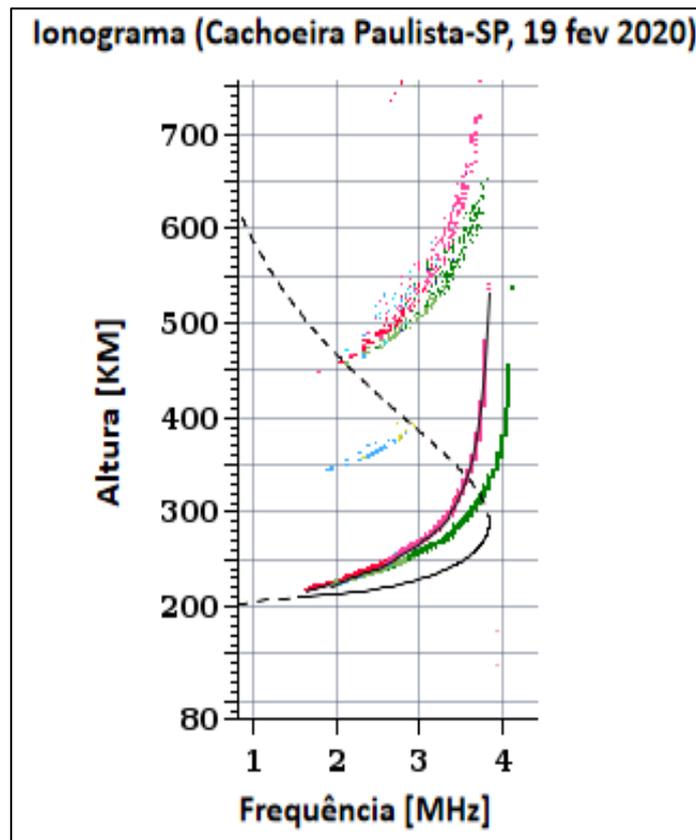


Figura 2.2 - Componentes ordinária (cor vermelha) e extraordinária (cor verde) em ionograma [28].

Em síntese, a onda propagada na ionosfera terá influência das propriedades dispersivas do plasma, dividindo-se em duas, com amplitudes distintas e diferença de fase. Essa diferença de amplitude e de fase dará origem a uma polarização do tipo elíptica, conforme esquematizado na Figura 2.3, onde B_0 é o campo magnético da Terra e a onda propaga-se no eixo Z . E e H representam os campos elétrico e magnético da onda portadora, que geralmente estarão sob algum grau de inclinação em relação a B_0 , representado pelo ângulo θ . A partir de θ , é possível descrever B_0 a partir de suas componentes: a longitudinal, Y_L , que influenciará em ω_l e a transversal, Y_T , que influenciará em ω_t , descritas na Tabela 2.1.

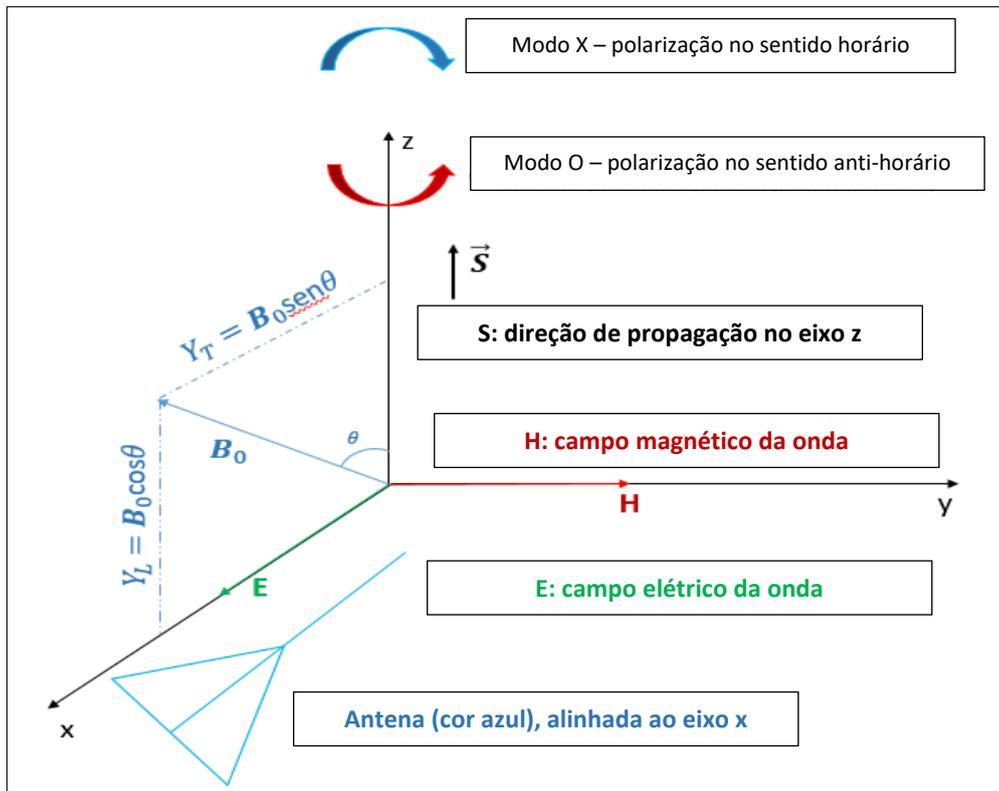


Figura 2.3 - Polarização elíptica na ionosfera sob influência do campo magnético B_0 .

Dessa forma, devido à existência de duas componentes de polarização - influenciadas pelos diversos valores de densidade eletrônica e de diferentes níveis de intensidade do campo magnético terrestre ao longo do percurso, conforme expressado na Equação 2.5 -, mesmo com os transceptores HF imóveis, haverá também espalhamento Doppler, que geralmente está associado ao movimento relativo entre transmissor e receptor, mas no caso de enlaces ionosféricos, pode ocorrer até mesmo para estações fixas. Entretanto, o desvio Doppler, devido a essas perturbações, não alcança valores elevados, conforme consta na Tabela 2.2 [9].

As múltiplas componentes do sinal transmitido, por possuírem diferenças de fase e de amplitude, acentuam o desvanecimento do sinal. A ITU-R F.1487 [9] classifica, de acordo com o espalhamento, dez canais típicos para HF, além de adotar dois percursos em todas as condições, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Estimativas de espalhamento para canais em HF [9]

Latitude	Condição do canal	Diferença de Atraso	Máximo Desvio Doppler
Baixa	Quieto	0,5 ms	0,5 Hz
	Moderado	2 ms	1,5 Hz
	Perturbado	6 ms	10 Hz
Média	Quieto	0,5 ms	0,1 Hz
	Moderado	1 ms	0,5 Hz
	Perturbado	2 ms	1 Hz
	Perturbado com incidência quase vertical (NVIS)	7 ms	1 Hz
Alta	Quieto	1 ms	0,5 Hz
	Moderado	3 ms	10 Hz
	Perturbado	7 ms	20 Hz

O *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) também apresenta estimativas de retardo e de desvio Doppler em diferentes tipos de canais [29], onde também é possível observar o ganho do percurso, conforme Tabela 2.3.

Ao comparar as duas tabelas, é possível observar que tanto a ITU quanto o ETSI concluem que a diferença de retardo é o fator de desvanecimento mais relevante para HF, sendo possível encontrar diferenças de até 7 ms, dependendo do tipo de enlace desejado. De fato, ao adotar-se que a banda de coerência é definida por [25]:

$$B_c \approx 1/\sigma_\tau \text{ [Hz]} \quad (2.8)$$

em que σ_τ é, por exemplo, uma diferença de retardo de 1 ms, entre diferentes cópias do mesmo símbolo, já implica uma banda de coerência de apenas 1 kHz, o que dificulta a expansão da largura de banda do sinal em enlaces ionosféricos e reduz a capacidade de incrementar a taxa de *bits*, conforme será aprofundado na próxima seção.

Tabela 2.3 - Estimativas de perda e de espalhamento para canais em HF [29].

Canal	Descrição	Parâmetros	Percurso 1	Percurso 2	Percurso 3	Percurso 4
1	AWGN	Diferença de retardo (τ_i)	0			
		Ganho (ρ_i)	1			
		Doppler Shift (μ_s)	0			
		Doppler Spread ($2\sigma_i$)	0			
2	Rice com delay	Diferença de retardo (τ_i)	0	1 ms		
		Ganho (ρ_i)	1	0,5		
		Doppler Shift (μ_s)	0	0		
		Doppler Spread ($2\sigma_i$)	0	0,1 Hz		
3	US Consortium	Diferença de retardo (τ_i)	0	0,7 ms	1,5 ms	2,2 ms
		Ganho (ρ_i)	1	0,7	0,5	0,25
		Doppler Shift (μ_s)	0,1 Hz	0,2 Hz	0,5 Hz	1,0 Hz
		Doppler Spread ($2\sigma_i$)	0,1 Hz	0,5 Hz	1,0 Hz	2,0 Hz
4	CCIR Poor	Diferença de retardo (τ_i)	0	2 ms		
		Ganho (ρ_i)	1	1		
		Doppler Shift (μ_s)	0	0		
		Doppler Spread ($2\sigma_i$)	1 Hz	1 Hz		
5	2 percursos	Diferença de retardo (τ_i)	0	4 ms		
		Ganho (ρ_i)	1	1		
		Doppler Shift (μ_s)	0	0		
		Doppler Spread ($2\sigma_i$)	2 Hz	2 Hz		
6	4 percursos	Diferença de retardo (τ_i)	0	2 ms	4 ms	6 ms
		Ganho (ρ_i)	0,5	1	0,25	0,0625
		Doppler Shift (μ_s)	0	1,2 Hz	2,4 Hz	3,6 Hz
		Doppler Spread ($2\sigma_i$)	0,1 Hz	2,4 Hz	4,8 Hz	7,2 Hz

(c) Modelagem do canal HF

Para se estimar o canal HF, pode ser utilizada uma adaptação do modelo de Watterson, conforme é apresentado na recomendação ITU-R F.1487 [9]. Nesse modelo, a resposta do canal é composta de ruído branco gaussiano (*White Gaussian Noise*), mais ruído atmosférico e/ou feito pelo homem somado com cópias do sinal original, as quais são atrasadas uma em relação

à outra por um determinado valor τ . As cópias atrasadas do sinal podem advir de multipercursos ou terem origem na dispersividade da ionosfera, que provoca a geração de ondas ordinárias e extraordinárias, conforme citado no subitem “(b) Perdas por Polarização” desta seção.

A Figura 2.4 traz uma representação do modelo, onde o sinal transmitido (*input*) é multiplicado em vários estágios. Cada versão do sinal possui um atraso e uma distribuição de ganhos e de fases como processos estocásticos, estacionários em sentido amplo e descorrelacionados entre si, WSS-US (*Wide Sense Stationary - Uncorrelated Scattering*). Ao final, são adicionados ruídos e interferências, obtendo-se o sinal resultante (*output*).

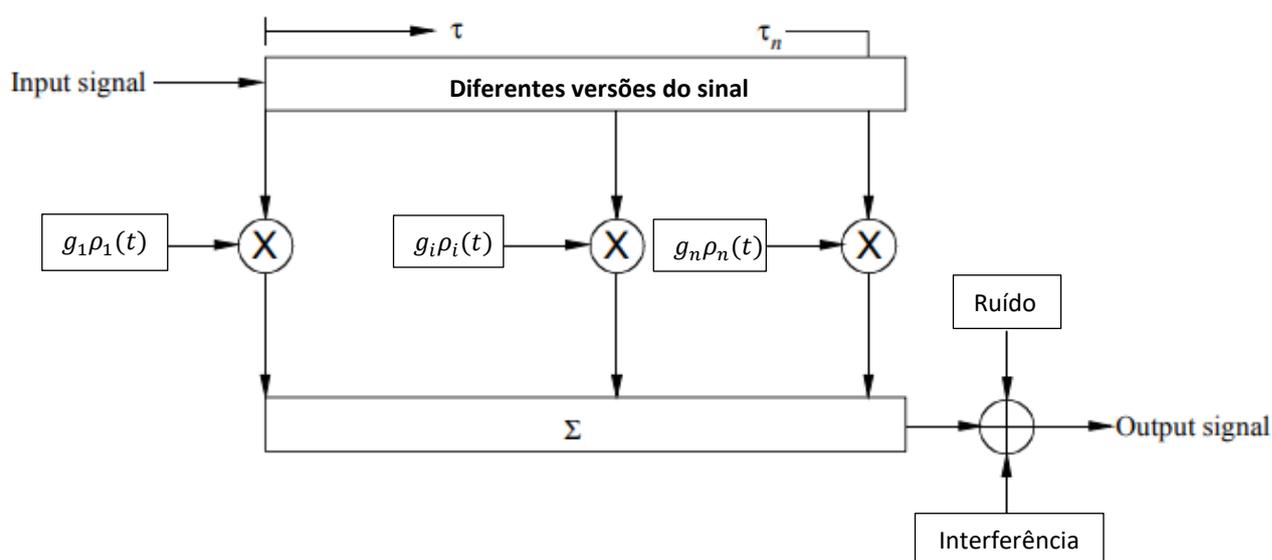


Figura 2.4 - Diagrama de bloco do modelo de Watterson [9].

A partir das considerações citadas, o sinal HF, ao ser recebido no transmissor, é definido conforme Equação 2.9 [9],

$$s(t) = \sum_{i=1}^N g_i(t) \rho_i e^{j\varphi_i(t-\tau_i)} \quad (2.9)$$

em que ρ_i é o ganho de cada componente, τ_i é o atraso do percurso i , N é a quantidade de percursos, a depender do tipo de canal a ser modelado, definidos na Tabela 2.2 ou 2.3. $g_i(t)$ são pesos variantes no tempo, modelados como processos estocásticos de formato gaussiano centrados na origem. As magnitudes $|g_i(t)|$ são distribuições de Rayleigh ou Rice, a depender se há ou não linha de visada para o transmissor. A fase $\varphi_i(t)$ é uniformemente distribuída entre 0 e 2π .

Para cada $g_i(t)$, haverá uma densidade espectral de potência (*Power Spectral Density* - PSD) $G_i(f)$ e uma variância σ_i^2 , que servirá como uma medida da intensidade da dispersão da potência do sinal em cada percurso. Por mensurar as variações do sinal no tempo, a largura de $G_i(f)$ também é chamada de espalhamento Doppler. Poderá haver também uma frequência central de valor diferente de zero em $G_i(f)$, a qual pode ser interpretada como um deslocamento médio de frequência e é chamada de desvio Doppler [25]. Ambos os valores de espalhamento e de desvio Doppler estão descritos na Tabela 2.3.

Para percursos ionosféricos, uma curva gaussiana é uma boa aproximação para cada componente $G_i(f)$, conforme mostrado na Equação 2.10 [9],

$$G_i(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(f-v_i)^2}{\sigma_i^2}} \left[\frac{\text{W}}{\text{hz}} \right] \quad (2.10)$$

em que v_i é o deslocamento Doppler, e o espalhamento Doppler é geralmente definido por duas vezes o desvio-padrão σ_i , o que conterà, de acordo com a distribuição normal, 68,26% da potência recebida.

Se houver bastante diferença de deslocamento Doppler entre as componentes magneto-iônicas, poder-se-á modelar o sinal resultante como um único espectro gaussiano, conforme Figura 2.5, em que v_i e $2\sigma_i$ constam na Equação 2.10 [9].

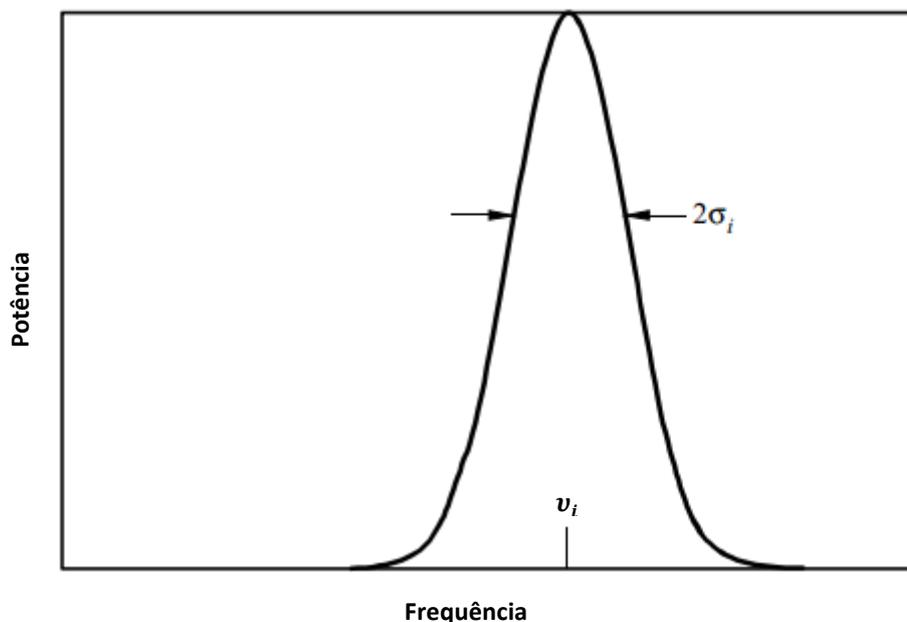


Figura 2.5 - Espectro de frequência para componente magneto-iônica com deslocamento de frequência acentuado [9].

Porém, caso as componentes do sinal tenham baixo deslocamento entre si, o espectro de cada componente poderá se tornar indistinguível, sendo necessário modelar o sinal resultante como a soma de dois sinais (identificados por “a” e “b”), formando um espectro de forma indefinida, conforme esquematizado na Figura 2.6.

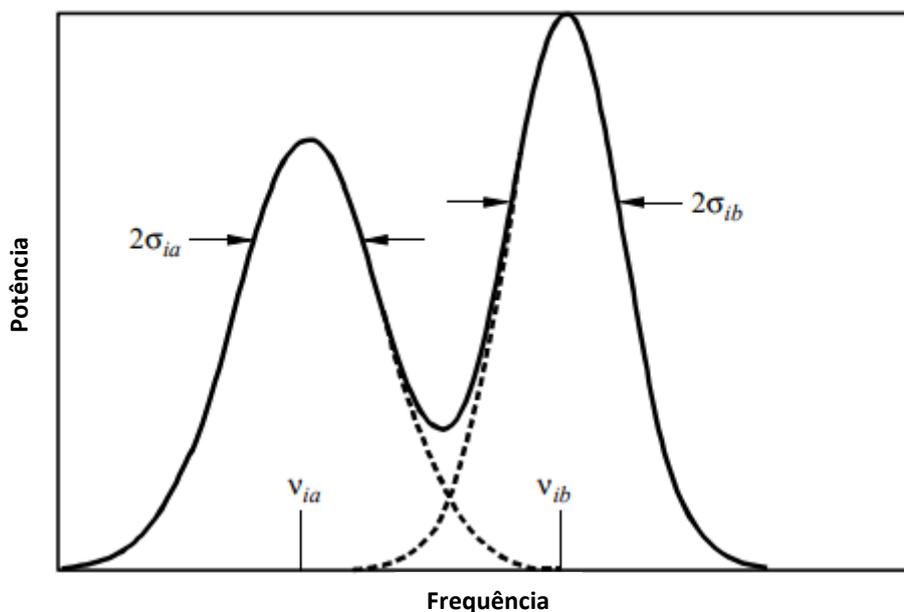


Figura 2.6 - Espectro de frequência para componentes magneto-iónicas com baixo deslocamento Doppler [9].

Em suma, conforme observado nas Tabela 2.2 e 2.3, múltiplas versões do sinal chegarão atrasadas e atenuadas no receptor, ocasionando ISI, de forma que o sinal recebido terá um intervalo de duração maior que o sinal transmitido originalmente.

Essa dispersão temporal provocará distorção do sinal, pois certos componentes de frequência terão respostas de amplitudes diferentes, com banda de coerência menor que a banda base do sinal.

Simultaneamente, o canal introduzirá deslocamentos de frequência por efeito Doppler em cada componente de multipercurso, devido à natureza variante da ionosfera, que está em constante mutação de sua densidade eletrônica, sendo observado até 10 Hz de desvio Doppler em regiões perturbadas de baixa latitude [23]. Ou seja, o sinal recebido terá largura de banda maior que o sinal transmitido. Porém, em comparação com o tempo de símbolo, o canal é tipicamente caracterizado como de atenuação lenta, pois a resposta ao impulso do canal muda mais lentamente que o sinal de banda base transmitido, o seu tempo de coerência é maior que o tempo de símbolo, ao se utilizar a largura de banda típica para HF, 3 kHz [9].

2.1.2. Ionossondas

A propagação ionosférica é afetada por diversos fatores naturais, sendo o seu estudo facilitado com o uso das ionossondas. Esses dispositivos estão localizados em diversas cidades ao redor do mundo - no Brasil, atualmente, há seis ionossondas em funcionamento, controladas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), nas cidades de Boa Vista, Belém, Fortaleza, São Luiz, Cachoeira Paulista e Santa Maria -, medindo a altura da ionosfera (h), em sua porção inferior, e sua densidade de elétrons por camada, $N(h)$. O dispositivo emite um pulso eletromagnético com alta potência - entre 2 kW e 30 kW, visando a obter uma ótima SNR (acima de 30 dB) e leitura precisa do sinal - para a ionosfera de forma vertical e deduz, pelo tempo de resposta, assumindo que a velocidade de propagação foi 3×10^8 m/s, em que altura houve a reflexão desse pulso e diversas outras características do sinal recebido. Como a variação da velocidade do pulso não é levada em conta (considera-se que foi a velocidade da luz o tempo inteiro), a altura de reflexão é chamada de altura virtual. Assim, relacionando o tempo de resposta, a altura de reflexão, a frequência utilizada para emissão do pulso e a direção de retorno do raio refletido (com múltiplas antenas), é possível deduzir, através da Equação 2.5 e outros modelos, a densidade eletrônica da ionosfera na região acima da ionossonda e o comportamento dos raios refratados [30].

Através das ionossondas é possível determinar a frequência crítica, ou a frequência de plasma [31], de uma camada, que seria a frequência mais alta de radiação que retorna para a ionossonda em uma propagação vertical na direção do zênite (ângulo de incidência zero sobre a normal da Terra). A Figura 2.7 apresenta as informações principais que podem ser lidas em um ionograma típico, fornecido por ionossondas digitais semelhantes às disponíveis no Brasil.

O eixo horizontal apresenta as frequências, na faixa do HF, do pulso que foi enviado e retornou para o dispositivo através da reflexão total; o eixo vertical apresenta a altura em quilômetros a partir do solo em que o raio poderá ser refletido. A curva de cor preta indica o perfil da densidade eletrônica da ionosfera para aquele momento de medição, onde geralmente se observa um valor próximo de zero no nível onde a ionossonda está instalada e, após superados os primeiros cinquenta a oitenta quilômetros, tem-se o início das primeiras reflexões, caracterizando a camada D. Com o aumento da altura, alcançam-se as camadas F1 e F2, se for

horário diurno, ou F, se for horário noturno. O pico da densidade eletrônica ocorre na camada F. Na Figura 2.7, o pico ocorreu na frequência de 8,925 MHz, à altura aproximada de 280,9 km.

As curvas coloridas, por sua vez, indicam o comportamento do pulso em cada altura, onde o tamanho do ponto indica a amplitude do sinal e a cor é apresentada de acordo com a polarização, o Doppler *shift* e o ângulo de chegada, sendo a curva vermelha a mais relevante, que são as ondas ordinárias, identificadas na tabela de legendas de cores como Vo. As ondas extraordinárias estão na cor verde, identificadas como X. A intensidade do Doppler *shift* é observado de acordo com a tonalidade da cor, Vo+ ou Vo-; X+ ou X-. As outras cores representam o ângulo de chegada do pulso após a reflexão total, apresentadas esquematicamente na Figura 2.8, onde é possível observar que as cores mais frias indicam que o pulso advém do norte e que as cores mais quentes, que advém do sul. Se o pulso advir verticalmente, será identificado com as cores padrões vermelho ou verde [30, 32 e 33].

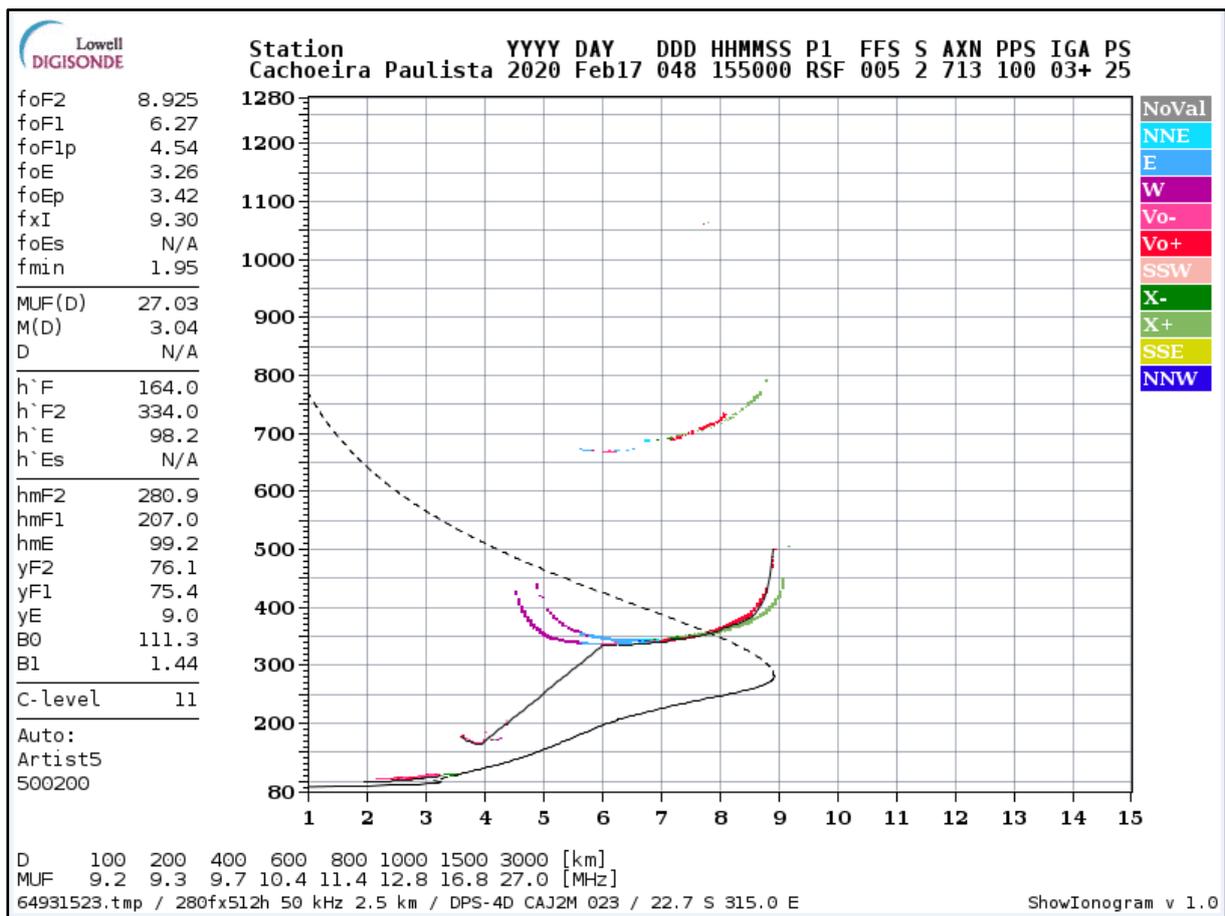


Figura 2.7 - Dados de um ionograma [28].

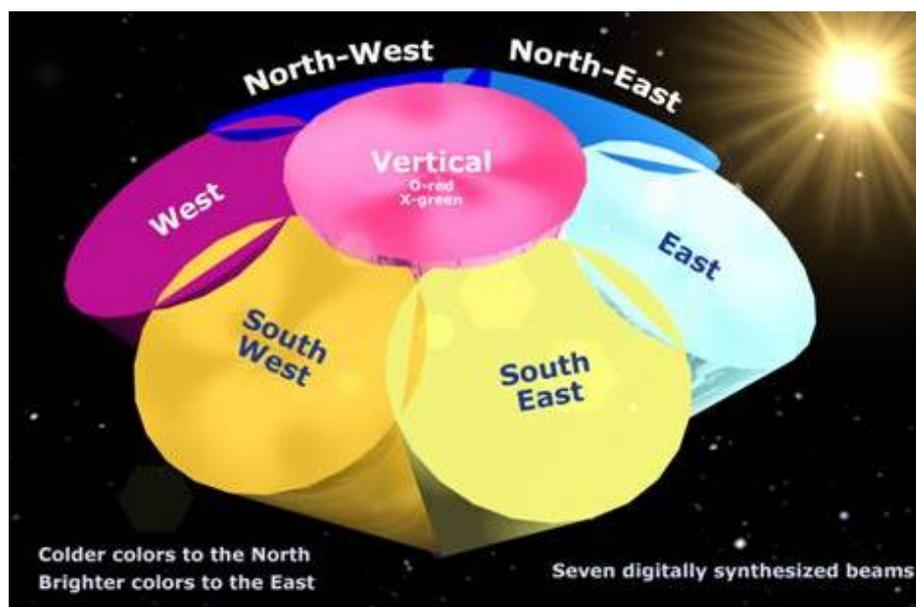


Figura 2.8 - Código de cores utilizadas em ionogramas [33].

A Tabela 2.4 apresenta os principais itens que constam em um ionograma, onde se destacam: f_o , que representa a frequência crítica de operação para determinada camada da ionosfera, sendo f_oF2 o parâmetro mais relevante, pois aponta o valor de frequência crítica (ou de plasma) para a camada mais densa, a camada F2; MUF(D) representa a Máxima Frequência Utilizável, condicionada ao ângulo de radiação da antena, visando a alcançar uma distância D em quilômetros.

Tabela 2.4 - Principais itens apresentados em um ionograma [30, 32]*

Item	Descrição
f_o (CAMADA) [MHz]	Frequência crítica (no modo ordinário) da camada, em MHz. Representa a frequência máxima de reflexão nessa camada que ainda preserva as características originais do sinal; frequências com valores acima de f_o irão transpassar a ionosfera ou o sinal sofrerá alterações, por influência do campo magnético terrestre, dando origem à componente magneto-iônica chamada de onda extraordinária.
f_oEs [MHz]	Frequência crítica (no modo ordinário) para a camada E esporádica, que é uma camada da ionosfera eventual, em que a camada E apresenta uma densidade eletrônica acima do esperado para o dia e para o horário verificado. Não costuma ser utilizada em planejamentos de enlaces por ser pouco previsível.
f_xI [MHz]	Máxima frequência da camada F em que houve algum eco, independentemente de qualquer alteração sofrida.

Item	Descrição
M(D) [adimensional]	MUF(D)/ f_oF2 : representa a razão entre a MUF e a frequência crítica, chamado de fator MUF; via de regra, no Brasil, seus valores estarão entre 3 e 3,8. Será influenciada pela altura da camada F. Esse dado, em conjunto com a MUF(D), é utilizado para transmissões oblíquas.
MUF(D) [MHz]	MUF para a distância de três mil km ou outra distância D específica, visando a transmissões oblíquas.
f_{min} (CAMADA) [MHz]	Mínima frequência em que houve alguma reflexão.
h'(CAMADA) [km]	A altura mínima virtual de uma determinada camada.
hm(CAMADA) [km]	A altura em que ocorreu a f_o da camada.
y(CAMADA) [km]	Adotando-se um modelo parabólico para as camadas da ionosfera, representa a metade da espessura da parábola para cada camada. Ou seja, é uma estimativa da largura da ionosfera para aquele dia e horário.
C-level [adimensional]	Nível de confiabilidade do ionograma, quanto maior, melhor.
P1, FFS, S, AXN, PPS, IGA e PS [dimensões diversas]	Dados do sistema para armazenamento e de sondagem.

*Há outros parâmetros presentes no ionograma que não serão detalhados por não serem importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1.3. Alterações e Anomalias na Ionosfera

(a) Alterações devido a Eventos Solares

Eventos solares com grandes emissões de energia podem vir a distorcer a estrutura do campo magnético da Terra, que influencia diretamente no movimento de partículas ionizadas livres. Tais alterações podem ocasionar aumento repentino do nível de ruído ou desvanecimentos aleatórios [34].

Um fator não sazonal que ocasiona alterações geomagnéticas na Terra, e no conteúdo total de elétrons livres (*Total Electron Content – TEC*) da ionosfera são explosões solares e correntes de vento solar de alta velocidade (*High Speed Solar Wind Stream – HSSWS*). Uma explosão solar pode durar desde alguns minutos até várias horas e é capaz de emitir alta carga de energia

eletromagnética, na forma de raios X e UV, a qual será, em grande parte, absorvida pela camada D da ionosfera, aumentando sua densidade, pelo processo de fotoionização, e provocando, devido à alta incidência de partículas neutras nessa camada, desvanecimento de transmissões em HF e os chamados Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS) [35].

Uma medida para se determinar a duração e intensidade das perturbações geomagnéticas é dada pelo índice planetário Kp (*Planetarische Kennziffer*), que é calculado a partir de vários observatórios em diferentes continentes, em uma escala de 0 a 9; quanto maior, mais intensa é a atividade geomagnética. Outro índice utilizado para representar a atividade geomagnética é o índice planetário ap , que é uma derivação linear do índice Kp , conforme Figura 2.9, e é calculado em uma escala de 0 a 400; quanto maior, maior a atividade geomagnética. Ambos podem ter seus valores obtidos através do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e estão diretamente associados ao nível de ruído cósmico típico dos enlaces em HF, conforme pode ser observado na Tabela 2.5 [34, 36 e 37].

$Kp = 0_0$	0_+	1_-	1_0	1_+	2_-	2_0	2_+	3_-	3_0	3_+	4_-	4_0	4_+
$ap = 0$	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
$Kp = 5_-$	5_0	5_+	6_-	6_0	6_+	7_-	7_0	7_+	8_-	8_0	8_+	9_-	9_0
$ap = 39$	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Figura 2.9 - Valores do índice ap para cada valor do índice Kp [36].

Tabela 2.5 - Valores dos índices geomagnéticos e nível de perturbação geomagnética [37].

Situação	Índice Kp	Índice ap	Condições geomagnéticas
Normal	0	0-2	Muito quieto
	1	3-5	Quieto
	2	6-9	Quieto
	3	12-19	Médio
	4	22-32	Ativo
Tempestade	5	39-56	Tempestade pequena
	6	67-94	Tempestade grande
	7	111-154	Tempestade severa
	8	179-236	Tempestade severa

	9	300-400	Tempestade extrema
--	---	---------	--------------------

(b) Anomalias na Ionosfera

Além dos DIS, outro fenômeno de bastante interesse em enlaces pela ionosfera é o ESF, que provoca deformações, por vezes muito acentuadas, na principal camada de propagação da ionosfera para sinais em HF, a camada F. O fenômeno é um dos mais relevantes na ionosfera tropical, sendo necessário compreender suas características básicas para propagação diuturna nesse ambiente [16].

Em um ionograma sem a presença do fenômeno ESF, Figura 2.10 (a), a ionossonda irá enviar um pulso eletromagnético para a ionosfera de forma vertical e deduzirá, pelo tempo de resposta, em que altura houve a reflexão desse pulso, conforme citado na seção 2.1.2. Por outro lado, quando há a ocorrência do ESF, a camada F se torna difusa e provoca espalhamento do sinal, conforme ilustra a Figura 2.10 (b).

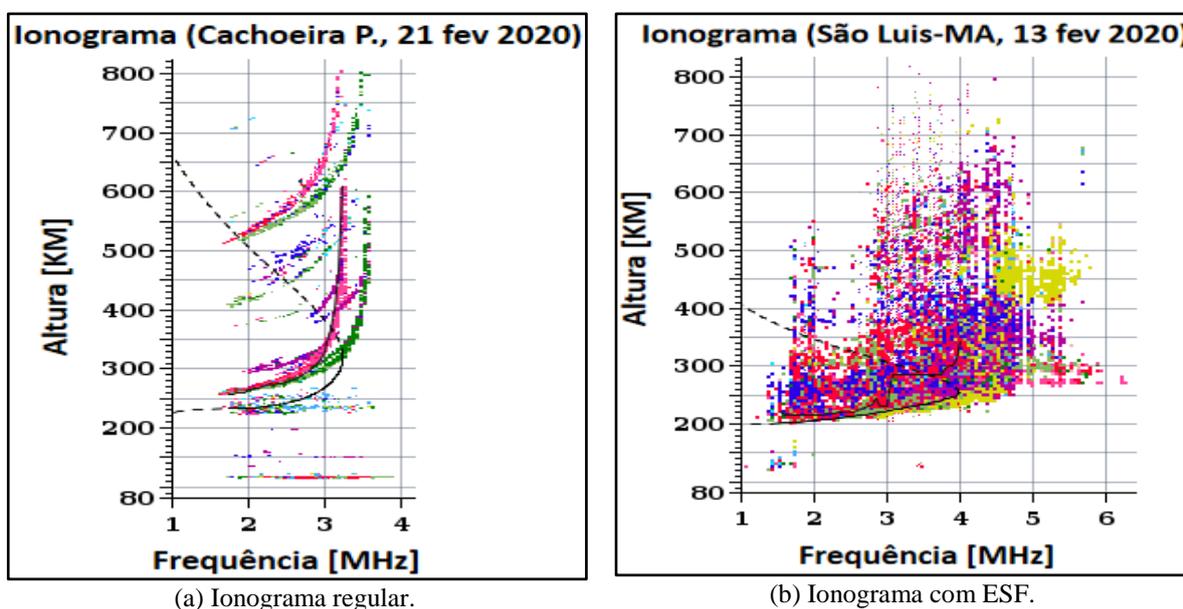
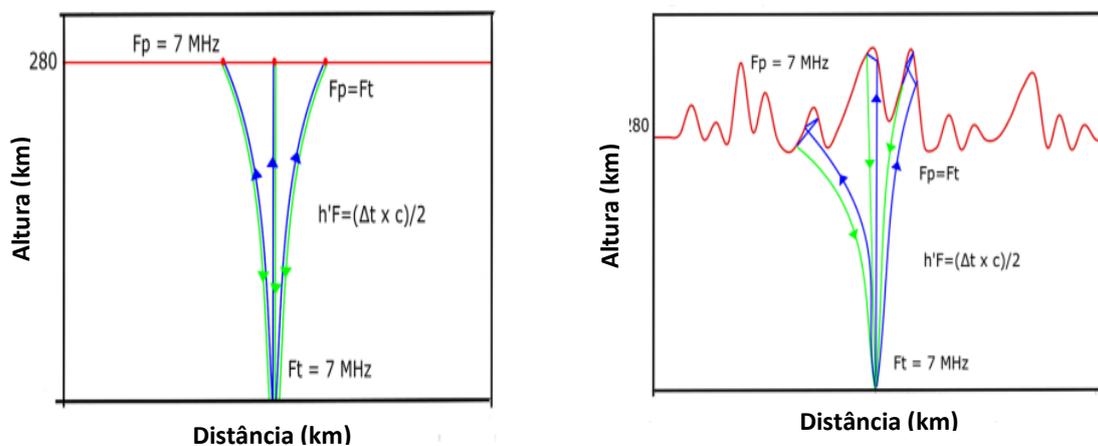


Figura 2.10 - Ionograma regular em Cachoeira Paulista-SP (a) comparado a um ionograma onde foi detectado o ESF na ionossonda de São Luís-MA (b) [28].

A Figura 2.11 representa um esquema desse espalhamento: devido ao ESF, no momento em que as camadas da ionosfera não estão mais no seu modo regular - semelhante a uma estrutura plana - o pulso irá sofrer múltiplas reflexões em diferentes alturas, com diferentes percursos e

tempos de retorno dessincronizados, o que dará origem ao ionograma de aspecto semelhante ao encontrado na Figura 2.10 (b).



(a) Ionograma regular.

(b) Ionograma com ESF.

Figura 2.11 - Processo de detecção da altura de reflexão do pulso sem ESF(a) e com ESF (B) [16].

O ESF pode ser classificado em três diferentes tipos: (1) *Range* ESF (RSF), são irregularidades que se estendem desde a base até topo da camada F. A sua manifestação nos ionogramas se dá por múltiplos ecos em todas as frequências; (2) Frequência ESF (FSF), são irregularidades que também se estendem desde a base até topo da camada F, porém sua manifestação nos ionogramas se dá por múltiplos ecos em frequências mais altas e (3) Misto ESF (MSF), quando ocorrem as características de RSF e de FSF simultaneamente [38, 39].

As origens da anomalia, que está associada à rarefação da densidade eletrônica, ou bolhas, em locais e altitudes variadas [40] ainda não foram plenamente identificadas, sendo detectada pela primeira vez aproximadamente 80 anos atrás em um ionograma de Huancayo, Peru [41]. O fenômeno manifesta-se especialmente em períodos noturnos, com amplo percentual de ocorrência entre 20 e 24 horas, conforme pode ser observado na Figura 2.12, com maior preponderância do RSF, e pode levar à indisponibilidade de sistemas de comunicação HF. Sua extensão também é variável, podendo alcançar centenas de quilômetros quadrados em território brasileiro, prejudicando transmissões e reduzindo a SNR, o que acarreta maior indisponibilidade dos enlaces em HF, não somente na zona do equador magnético.

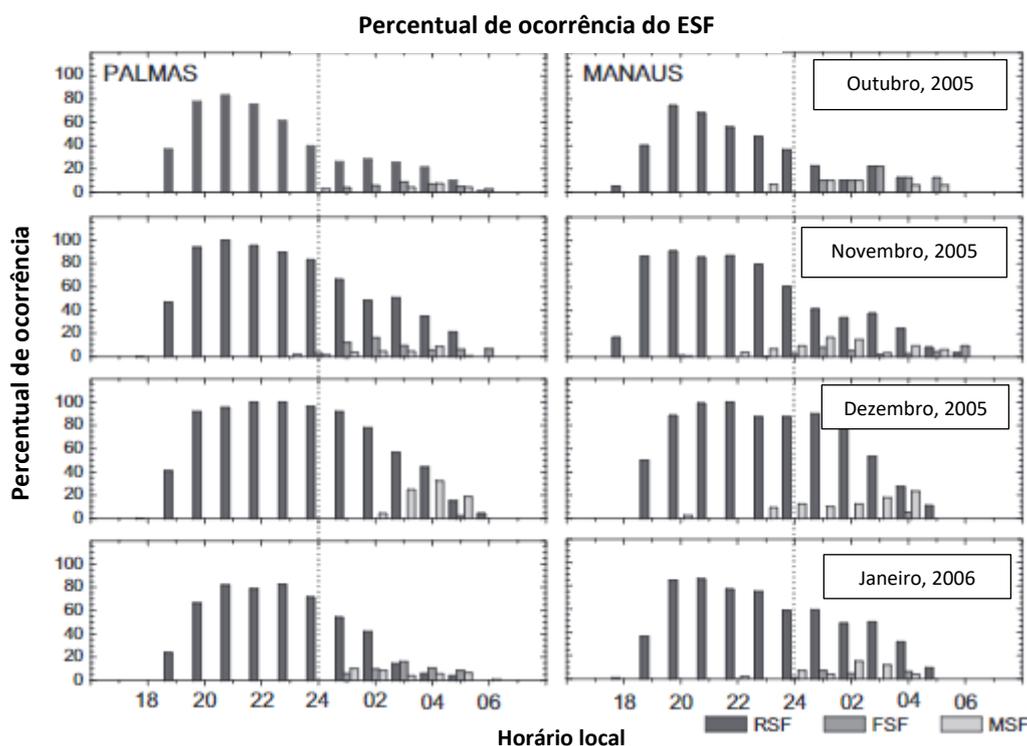


Figura 2.12 – Percentual de ocorrência do ESF em Palmas-TO e em Manaus-AM [42].

2.2. ESCOLHA DE FREQUÊNCIAS EM HF

Devido às grandes mutações horárias e sazonais da ionosfera, faz-se necessário estudos detalhados e atualizados das condições de propagação para cada projeto de enlace. Um dos aspectos mais relevantes na utilização do canal HF é a definição de qual frequência será utilizada para transmissão, e, embora haja *softwares* disponíveis para simulações, alguns fenômenos geográficos e perturbações pontuais podem não ser corretamente estimados, exigindo experimentos de campo para verificar a acurácia dos modelos.

Entre tais perturbações, encontram-se explosões solares, tempestades magnéticas e as já citadas TID. Todos esses fenômenos naturais se juntam ao ruído, bastante presente em frequências até 30 MHz, e dificultam a obtenção de uma SNR satisfatória para os equipamentos transceptores [23].

Embora os equipamentos mais atuais para transmissões em HF possuam a capacidade de lidar com parâmetros adversos do canal, como desvio Doppler e diferenças de retardos acentuadas, os avanços recentes – tais quais o ALE ou os enlaces digitais com SNR próxima de zero - da capacidade de processamento dos transceptores ainda não são suficientes para permitir que o

sinal transmitido em uma frequência inapropriada alcance o receptor. Dessa forma, surgiram diversas classificações para as frequências utilizadas no HF, de acordo com o comportamento esperado em cada enlace.

2.2.1. MUF, FOT e LUF

Como limite superior da frequência a ser escolhida para transmissões em HF, tem-se a Máxima Frequência Utilizável (MUF) básica e a MUF operacional. A MUF básica é definida como a mais alta frequência que uma onda de rádio pode propagar se entre dois terminais, sob condições específicas, levando em conta somente a reflexão na ionosfera. A MUF Operacional é a frequência que permite um desempenho aceitável de um enlace rádio, sendo que esse desempenho pode ser avaliado em termos de taxa de erro ou SNR requerida [43].

Servindo como uma margem de erro para estimativas da MUF, tendo em vista as diversas variáveis que afetam a ionosfera, há também a Frequência Ótima de Trabalho (FOT), que é definida usualmente como 90% da MUF Operacional. Embora 90% e 85% sejam valores comuns encontrados na literatura [38], o valor a ser multiplicado para se obter a FOT pode ser alterado de acordo com a época do ano e horário do dia. Entretanto, mais relevante ainda é que esse valor não seja inferior a Menor Frequência Utilizável (*Lowest Useable Frequency* - LUF), pois transmissões abaixo da LUF são absorvidas pela ionosfera, especialmente pela sua camada inferior, a D, não sendo possível alcançar o receptor [12, 38].

No passado, para se obter a MUF entre dois pontos determinados, eram utilizados mapas de predição de longo prazo, onde se buscava essencialmente determinar a frequência crítica (a mais alta em que ocorreu reflexão) da camada mais ionizada da ionosfera, denominada f_oF2 , e a frequência que permitiria um enlace de 3000 km, denominada MUF (3000) [12]. Atualmente, há modelos de predição de enlace para HF que atuam quase em tempo real, levando em conta dados como índice de perturbação magnética da Terra e frequências críticas sondadas por ionossondas [38].

2.2.2. Tipos de Propagação em HF e influência do ângulo de partida

Os modos de propagação em HF podem ser divididos, basicamente, em três tipos, de acordo com o grau de relevância: visada direta, ondas terrestres e ondas ionosféricas. Os três modos

podem colaborar para o sucesso de um enlace a distâncias reduzidas, da ordem de alguns quilômetros de separação entre os transceptores, porém, à medida que essa distância é ampliada, somente as ondas ionosféricas predominarão [12].

(a) Visada Direta

No Brasil, nas regiões onde há a maior utilização do HF para uso estratégico, regiões de florestas e de fronteiras, há diversas obstruções naturais, como árvores altas e folhagem densa, que impedem o alcance efetivo de enlaces em visada direta. Isso acarreta, em várias transmissões, a obstrução da zona de Fresnel, que é caracteriza por:

$$R1 = 17,32 \sqrt{\frac{D}{4f}} \text{ [m]} \quad (2.12)$$

em que $R1$ é o raio em metros da seção transversal da primeira zona no centro da linha de visada, D é a distância entre as estações em quilômetros e f é a frequência de propagação em GHz. Analisando a equação do raio de Fresnel, pode-se observar que $R1$ é inversamente proporcional à frequência, assim, conforme forem escolhidas para transmissão frequências em HF, de poucos MHz, haverá uma dificuldade acentuada de manter a zona de Fresnel desobstruída. Por exemplo, para 10 MHz, em um enlace de 15 km, $R1$ terá o valor de 335,21 m; para 5 MHz, em um enlace de 10 km, $R1$ terá o valor de 387,06 m, tornando pouco praticável esse tipo de enlace na região.

Adiciona-se também o fato que os enlaces em HF geralmente são da ordem de dezenas ou de centenas de quilômetros, o que fará com que a curvatura da Terra também influencie na visada direta. Por exemplo, para uma antena posicionada em uma viatura, de altura de 3 m, o alcance máximo, utilizando a Equação 2.13, antes que a Terra obstrua a visa direta do enlace, é de, aproximadamente, 6,2 km, que é um valor muito abaixo do necessário para esse tipo de comunicação [44],

$$D = \sqrt{2HR} \text{ [m]} \quad (2.13)$$

em que D é a distância máxima aproximada que permitirá um enlace sem obstrução pela Terra, H é a altura da antena radiante, R é o raio equivalente da terra, após correções troposféricas.

(b) Ondas Terrestres

Em especial para o território brasileiro, a condutividade do solo em regiões de selva é muito baixa, desfavorecendo sobremaneira os enlaces via onda de superfície. Assis e Filho (2010) [45] em testes de transmissões em HF na Amazônia observaram que a condutibilidade do solo (σ_f) é da ordem de 0,2 mSiemens/m e a permissividade (ϵ_f) 1,2, o que representa o menor decil na classificação mundial de condutibilidades de acordo com estudo realizado em escala global [46]. Embora esse tipo de transmissão possua um alcance maior que os enlaces via visada direta, a sua limitação é de natureza oposta, enquanto a propagação via visada direta é prejudicada em frequências entre 0 e 5 MHz, devido ao elevado valor de RI ; essa faixa de frequências, para as ondas terrestres, é o melhor valor encontrado. Utilizando como referência os dados encontrados na Figura 2.13, com valores de condutibilidade e permissividade típicos da Amazônia, pode-se perceber que frequências acima de 5 MHz terão um alcance bem menor, para o mesmo nível de potência radiada, que frequências da ordem de quilohertz.

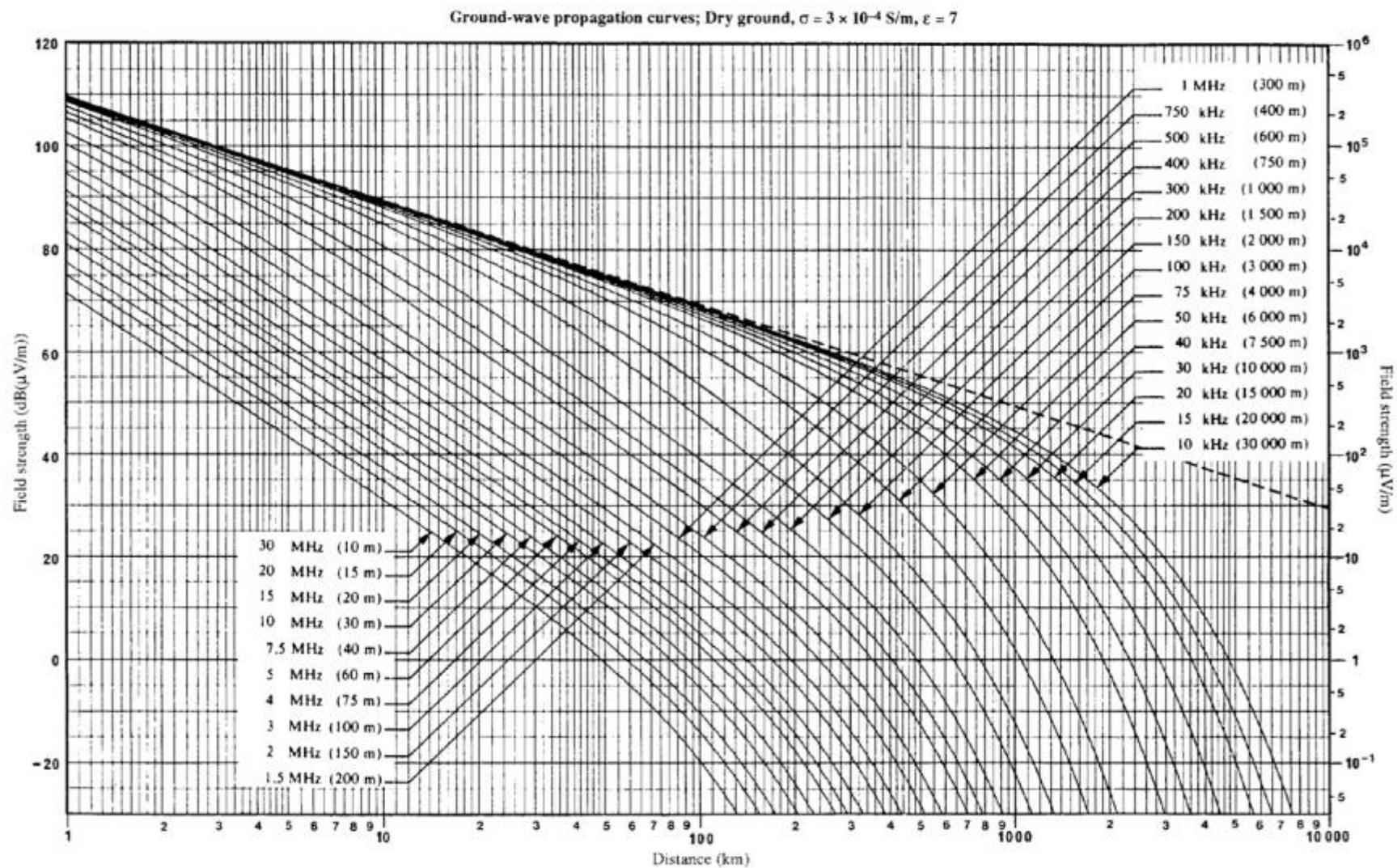


Figura 2.13 - Intensidade do campo elétrico para 1 kW, de acordo com distância e frequência [46].

Por exemplo, para sinais com frequências de 20 MHz, utilizando o ganho de uma antena vertical veicular na parte da recepção, o limite máximo de alcance da propagação, para 20 W radiados também a partir de uma antena vertical, é por volta de 9 km; já para 1 MHz, nas mesmas condições, pode-se alcançar por volta de 120 km, porém, ressalta-se que sinais com frequências de valores tão baixos dificilmente serão refletidos na ionosfera.

(c) Propagação via ondas ionosféricas

Conforme citado na seção 2.2.1, há frequências típicas para propagação em HF, sendo mais relevantes a MUF e a FOT. Além da escolha correta das frequências a serem transmitidas, cabe observar também, o ângulo de partida de radiação, visando a se adequar a enlaces mais curtos ou a longas distâncias.

A propagação quase vertical de ondas espaciais (*Near Vertical Incident Skywave* - NVIS) é uma técnica de transmissão em HF que permite alcançar estações receptoras situadas em locais onde a visada direta, ou as ondas de superfície, já não mais possuem SNR suficiente para a recepção do sinal transmitido. Wivlet et al. (2015) apontam que as propagações ionosféricas em NVIS podem funcionar com eficácia para um raio de até 150 km a partir da fonte emissora. Uma faixa favorável do espectro eletromagnético seria de 3 MHz a 9 MHz, pois essa faixa de frequência é geralmente menor que a frequência crítica da camada F, porém transmissões abaixo desses valores sofrem acentuadamente o fenômeno de absorção na camada D, o que impede o sinal de retornar ao solo pela reflexão total [31].

A forma de cobertura do NVIS assemelha-se a um guarda-chuva nas proximidades da antena transmissora, conforme pode ser observado na Figura 2.14. Esse tipo de transmissão obterá maior taxa de sucesso em propagações com ângulos de partida elevados, entre 70° e 90°, e com antenas que apresentem ganho, em dBi, nesses ângulos, de forma que possam alcançar a ionosfera e serem refletidos de volta para o solo.

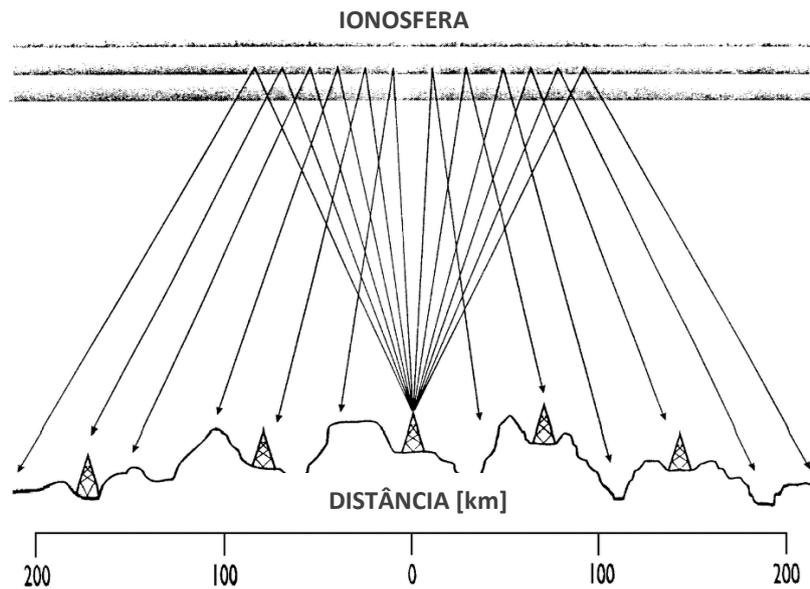


Figura 2.14 - Aspecto esquemático de uma propagação em NVIS [31].

A chamada zona de silêncio ocorre quando o rádio receptor está em um local além da propagação em visada direta, e das ondas terrestres, e a uma determinada distância em que a frequência escolhida para reflexão na ionosfera está acima da frequência ideal, a MUF para aquela distância, $MUF(D)$. Para frequências abaixo da frequência crítica da camada F (f_oF2), e até o limite aproximado de 150 km, não há zona de silêncio, essas frequências são chamadas de frequências de incidência quase vertical (NVIS).

A partir de [47], sabe-se que:

$$MUF(D) = f_c \sec\theta \text{ [MHz]} \quad (2.14)$$

sendo f_c a frequência crítica e θ o ângulo de incidência na ionosfera, que é aproximadamente complementar ao ângulo de partida do raio. Essa relação, derivada da lei de Snell para índices de refração, mostra que à medida que o ângulo de incidência é ampliado, a $MUF(D)$ aceitará valores maiores de frequência, pois seu valor é inversamente proporcional ao cosseno ($\frac{1}{\sec\theta}$) do ângulo.

Utilizando a relação trigonométrica da secante, e adotando o modelo de camadas ionosféricas planas, os resultados da Tabela 2.6 foram obtidos através de [12]:

$$MUF(D) = f_c \sec\theta = f_c \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2H}\right)^2} \text{ [MHz]} \quad (2.15)$$

em que D é a distância do enlace; H é a altura da camada mais densa da ionosfera [12].

Os dados da Tabela 2.6 indicam, por exemplo, para a frequência crítica de 5,65 MHz, no cenário “a”, que transmitir em uma frequência acima de 5,89 MHz para cobrir uma distância menor que 25 km, em NVIS, levará à perda do sinal pois o mesmo não refletirá nas camadas da ionosfera. De forma análoga, no cenário “b”, uma propagação de 6,03 MHz para uma estação receptora a 100 km deverá ter seu ângulo de incidência limitado a 12,8°, ou seu ângulo de partida deverá ser no máximo 77,2° ($90^\circ - 12,8^\circ = 77,2^\circ$). Caso essa frequência assuma ângulos de partida maiores, a onda ultrapassará a atmosfera e não retornará para a Terra.

Tabela 2.6 - Influência do ângulo de incidência em NVIS para a f_c de 5,65 MHz

Cenário	θ [graus]	MUF(D) [MHz]	D [km]
	0,3	5,88	2
	0,7	5,88	5
	1,0	5,88	8
	1,8	5,88	14
a	3,3	5,89	25
	6,5	5,92	50
	9,7	5,96	75
	b	12,8	6,03
	15,9	6,11	125
	21,7	6,33	175
	24,4	6,46	200
	27,1	6,60	225
	32,0	6,93	275
	34,3	7,12	300
	36,5	7,31	325
	40,4	9,04	375
	42,3	10,65	400
	69,9	17,08	1200

Raciocínio análogo pode ser utilizado para avaliar a viabilidade do uso de uma frequência específica em um ponto desejado, por exemplo, um enlace a 100 km do transmissor utilizando

a frequência de 5 MHz. Utilizando a Equação 2.15, o termo $\sqrt{1 + \left(\frac{D}{2H}\right)^2}$ pode ser isolado, permanecendo o valor de D fixo, igual a 100 km, o valor de H irá oscilar ao longo do dia, conforme pode ser observado na Figura 2.15 pela linha cor laranja, onde consta a altura da camada F2 ao longo de 24 horas no dia 11 de agosto de 2020, de acordo com os dados coletados pela ionossonda de Santa Maria-RS. Tal comportamento cíclico ocorrerá também para a frequência crítica, com seu pico por volta 17 horas, representada pela linha de cor cinza.

Percebe-se também que, por mais que haja aumento da altura da camada F2, indo por exemplo de 150 km, às 14h05, para 350 km, às 18h20, isso pouco alterou a MUF(D), na cor azul. Notavelmente, o que mais influencia a MUF(D), quando se trata de ângulos de partida até 70°, típicos de NVIS, é a f_c , linha de cor cinza. Nota-se também que a frequência desejada para enlace nessa situação, 5 MHz, a 100 km de distância, só estaria disponível para uso entre 16h00 e 20h10; nos demais horários, os raios propagados iriam transpassar a ionosfera.

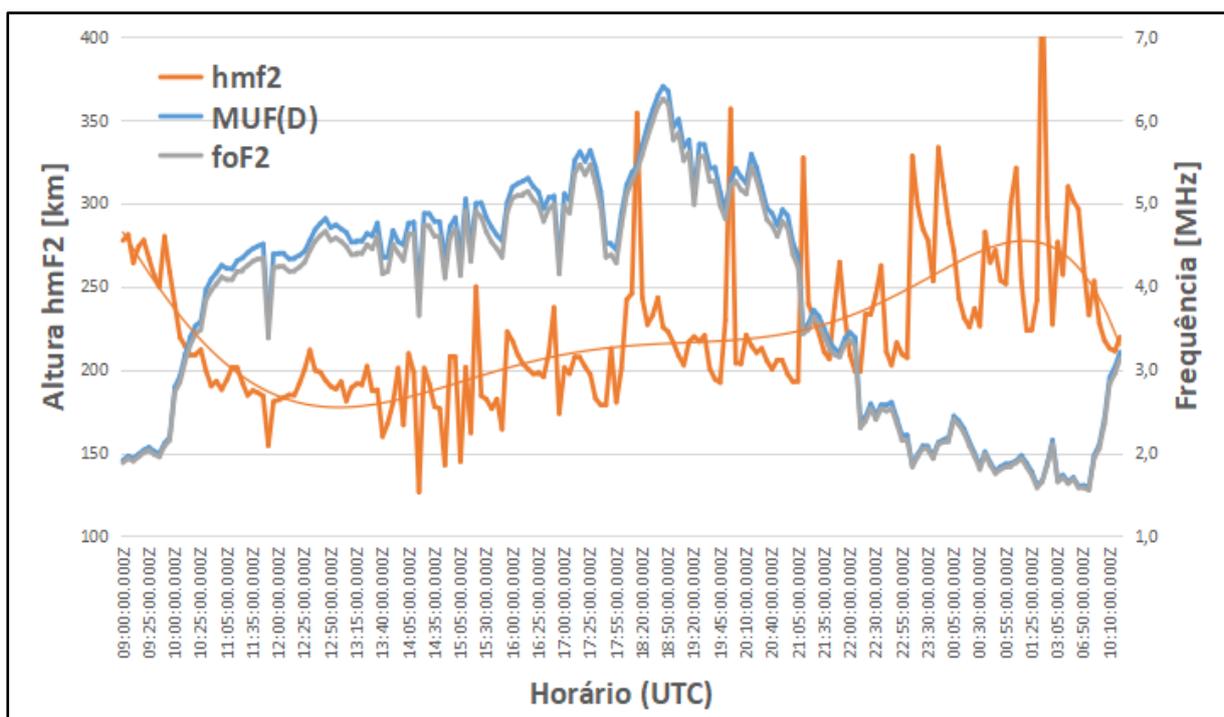


Figura 2.15 - Altura virtual da camada F, mais valores de f_c e de MUF(D) em 11/8/20, dados extraídos de [28].

Por outro lado, utilizando ainda os dados de 11 de agosto de 2020, caso a distância para a estação receptora fosse ampliada, o valor de D na Equação 2.15, haveria necessidade de reduzir cada vez mais os ângulos de partida, complementar de θ , da transmissão para se utilizar uma frequência específica, conforme consta na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Ângulo de partida necessário para alcançar o receptor em diferentes distâncias (D) no mesmo horário

Distância D [km]	f_oF2 [MHz]	MUF(D) [MHz]	hmF2 [km]	(90°- θ) [graus]
100	4,1	4,34	142,6	70,7
110	4,1	4,39	142,6	68,91
120	4,1	4,45	142,6	67,18
130	4,1	4,51	142,6	65,50
140	4,1	4,57	142,6	63,85

À medida que são utilizadas frequências maiores que MUF(D), e o receptor não é mais sensibilizado pelas ondas de superfície, a zona de silêncio irá aumentar até não ser mais possível a recepção. Como a Terra é curva, mesmo que o sinal seja proveniente de uma antena completamente direcional, com ângulo de partida horizontal, paralelo ao solo, o raio irá alcançar a ionosfera em um ângulo entre 15° e 20°, após percorrer entre 1.500 km e 2.000 km, sendo o alcance máximo médio de um enlace via ionosfera entre 3.000 km e 4.000 km, supondo que haverá apenas 1 salto.

Por ser 3.000 km a distância máxima a ser alcançada via HF, alguns institutos fornecem tanto os mapas de frequências críticas (ideal para NVIS), atualizados a cada 15 minutos, quanto os mapas de MUF(3000), conforme apresentado na Figura 2.16, onde os números de cor branca representam a frequência MUF que pode ser utilizada de acordo com as condições da ionosfera no ponto médio do enlace, que é o local onde irá ocorrer a reflexão do raio. Para enlaces de 4.000 km, basta multiplicar a MUF por 1,1 [48]. A MUF(D) com D entre 100 km e 3.000 km também está presente nos ionogramas, conforme consta no canto inferior esquerdo da Figura 2.7.

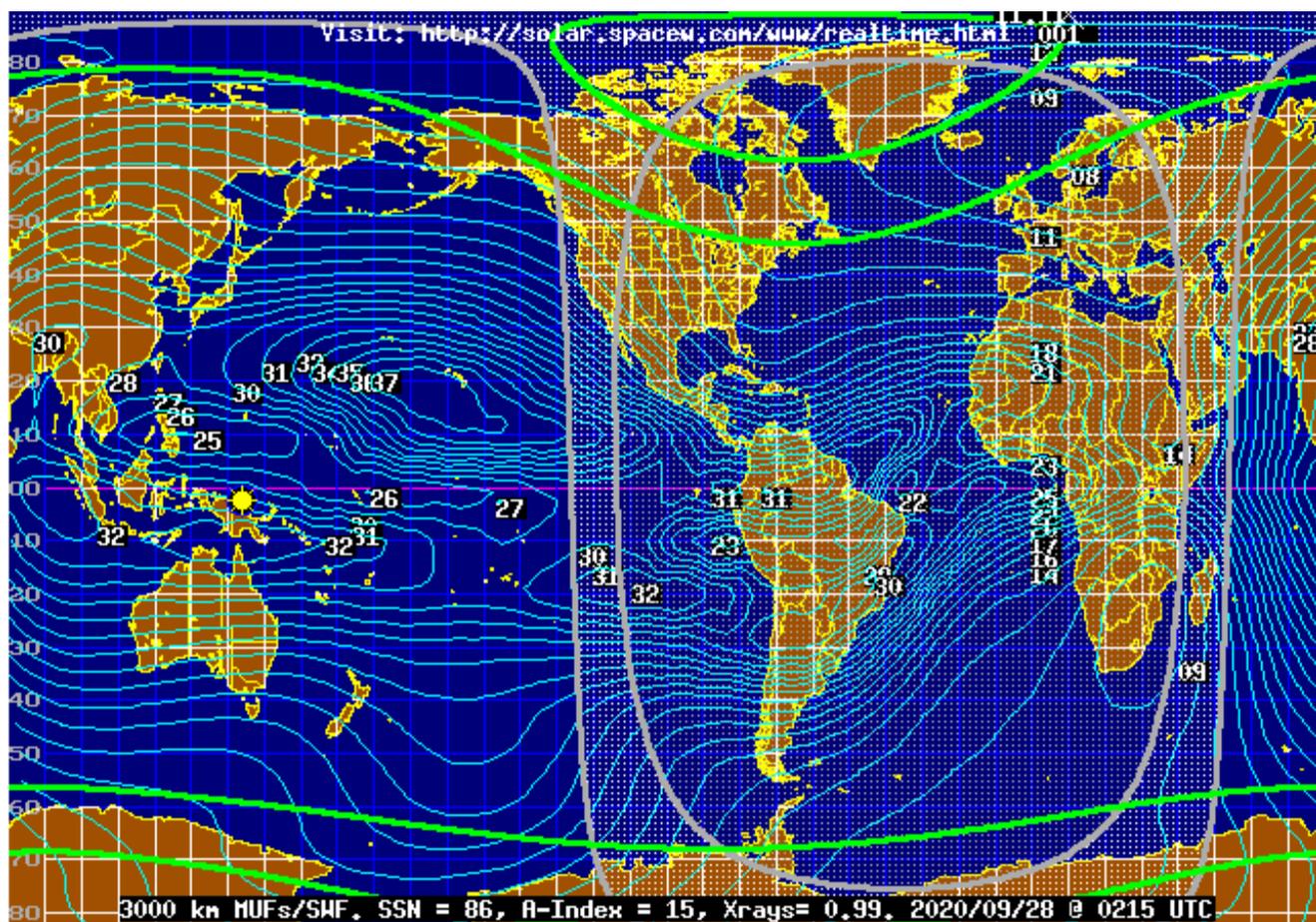


Figura 2.16 - Mapa de MUF(3000) em 28/09/2020, às 02h15 UTC [48].

2.2.3. Modelos de Predição para Frequências em HF

Ao longo dos anos, foram criados diversos modelos para a determinação da melhor frequência possível de acordo com o mês, localização, intensidade da radiação solar e outros critérios. Entre as contribuições mais relevantes, destacam-se as aplicações hospedadas no *Institute for Telecommunication Sciences* (ITS) [49], subordinado ao Departamento de Comércio dos EUA, e que são recomendadas pela ITU [50].

(a) VOACAP

O *Voice of America Coverage Analysis Program* (VOACAP) é uma adaptação do *Ionospheric Communications Analysis and Prediction Program* (IONCAP). O IONCAP é uma das primeiras aplicações, teve seu desenvolvimento iniciado na década de 1970, completamente automatizadas para predições de frequências em HF [51], tendo sido utilizada amplamente para fins civis e militares até a década de 1980.

O VOACAP, derivado de seu antecessor, teve seu desenvolvimento iniciado em 1983, com múltiplos colaboradores, como a emissora de radiodifusão *Voice of America* (VOA), o *National Telecommunications and Information Administration* (NTIA), o *Naval Research Laboratory* (NRL) e o *Institute for Telecommunication Sciences* (ITS) [51].

O *software* possui uma extensa base empírica e diversas versões com correções do seu modelo de predição ao longo de aproximadamente 40 anos. Ressalta-se que, apesar dos diversos aperfeiçoamentos realizados, seus resultados trazem informações que podem, e geralmente estão, com algum nível de erro, estimados em 15% para mais ou para menos pelos próprios fabricantes [50]. A base principal de dados do sistema advém de coletas diárias ao longo de 5 anos na década de 1960, o que compreendeu um ciclo solar completo. Nesse ciclo, foi observada, de hora em hora, a Máxima Frequência Observada (*Maximum Observed Frequency* - MOF), sendo montada, posteriormente, uma distribuição estatística de janela mensal desses valores. Nessa distribuição, foram observados três valores principais: a MUF, a FOT, já citadas na seção 2.2.1, e a mais alta frequência provável (*Highest Probable Frequency* – HPF). Sobre a MOF, a HPF corresponde a 90% da mediana das coletas mensais; a MUF corresponde a 50% e a FOT, a 10%, sendo, portanto, a FOT a frequência com maior probabilidade de sucesso no enlace. Em síntese, o VOACAP pode ser definido como um modelo probabilístico que infere 22 parâmetros, entre eles SNR, confiabilidade do enlace (percentual estimado de sucesso da comunicação), potência requerida, potência do sinal, intensidade do campo elétrico no receptor, MUF, LUF e ângulo de partida. Em suas premissas, são levadas em conta as antenas utilizadas, o tipo de solo, o nível de ruído local, a localização das estações, o mês e o SSN [13].

Apesar de utilizar essa base empírica, o VOACAP também realiza interações do tipo *ray trace*, especialmente para enlaces de comprimento menor que 10.000 km, visando a identificar os possíveis modos - saltos em diferentes camadas ou dentro de uma mesma camada - que o raio possa percorrer [51].

Os principais problemas encontrados, ao serem realizados testes de performance do sistema, foram [13, 51, 52 e 53]:

- o VOACAP não leva em conta os índices planetários *ap* e *Kp*, citados na seção 2.1.3, o que implica em predições piores em momentos de tempestades magnéticas;

- as previsões de LUF não possuem uma base empírica extensa, como a da MUF, o que reduz o nível de confiabilidade dessa estimativa;
- as variações de SSN, especialmente quando há intensa atividade solar, no pico do ciclo, também podem levar a previsões pouco acuradas, já que foram observadas grandes variações da MOF nesses momentos;
- há coeficientes de correção de erro, chamados URSI 88, – que levam em conta parâmetros adicionais como dia do mês, presença de oceano etc. – inacabados, que podem provocar erros de previsão quando empregados, logo, a não ser que haja condições muito específicas, esses coeficientes não devem ser utilizados;
- embora já tenham sido desenvolvidos novos, e mais precisos, modelos para o cálculo do SSN, o VOACAP utiliza somente uma antiga medida, desenvolvida pelo *National Geophysical Data Center* (NGDT), chamada, pelo instituto, de *Predicted SSN*. Essa medida em particular foi a única utilizada nos aperfeiçoamentos do *software* e de seus algoritmos, o que pode levar a previsões errôneas caso seja utilizada outra forma de SSN;
- há modelos de previsão que o usuário pode escolher, Figura 2.17, que já foram testados extensivamente, e são recomendados pelos fabricantes, como os modelos 30, 25, 21 e 20, e outros menos confiáveis e/ou inacabados, como os modelos 12, 26 ou 27;
- as previsões funcionam melhor para horas pares, devido à forma como foi realizado o trabalho empírico de mapeamento das frequências e do ruído;
- por ser um modelo probabilístico, por mais rigorosa que seja a medida estimada pelo *software*, o usuário, dentro da janela de um mês, nunca saberá quando virão os dias ruins de propagação, tem-se apenas uma estimativa da quantidade de dias, mas não a data precisa de suas ocorrências. E isso está amparado na realidade da ionosfera, que pode sofrer mudanças repentinas de um dia para o outro.

Conforme pode ser observado na Figura 2.17, há 30 resultados selecionáveis, que podem ser divididos em quatro categorias: os métodos 1 e 2 trazem descrições da ionosfera; os métodos de 3 a 12 fornecem previsões da MUF; 13, 14 e 15 apresentam os diagramas das antenas e, por

fim, os métodos 16 a 30 trazem dados completos de SNR, potência e confiabilidade do enlace de acordo com as condições configuradas pelo usuário.

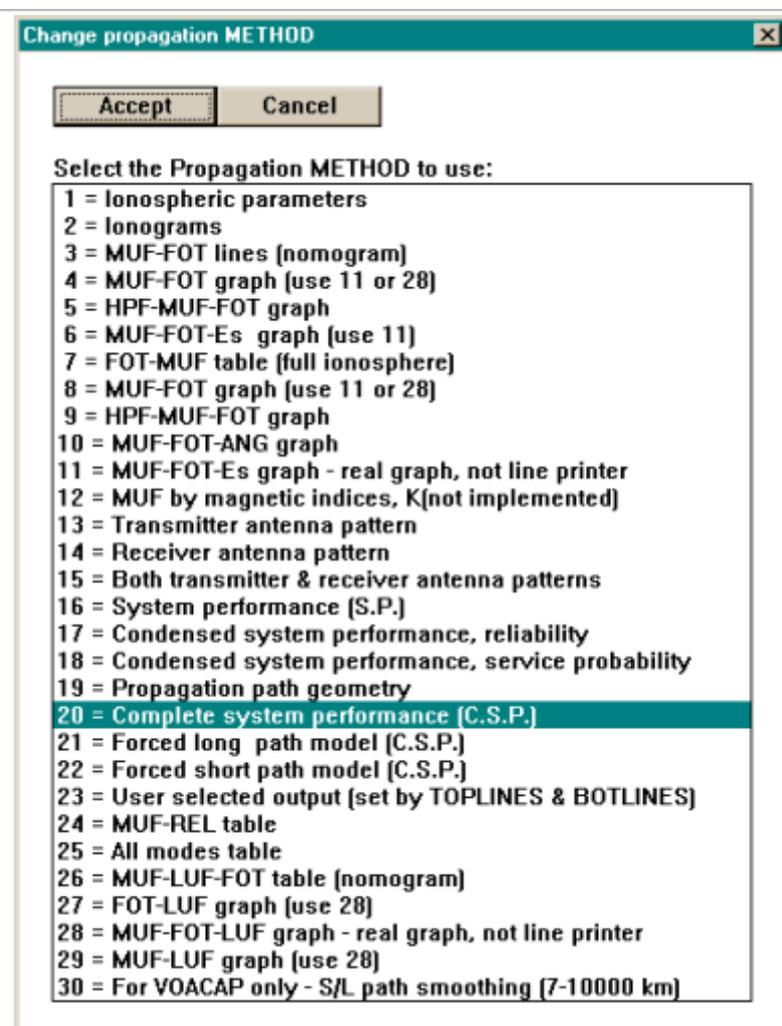


Figura 2.17 -Modelos de predição do VOACAP [49].

(b) REC533

Desenvolvida pela ITU, com melhorias de outras agências, é baseada na *Recommendation P.533-14 (Method for the prediction of the performance of HF circuits)*. É o modelo oficialmente recomendado para transmissões ponto a ponto e cobertura de área [14]. Apresenta muitas semelhanças com o VOACAP, porém teve a base empírica de dados alterada visando a realizar melhorias nas predições.

O fabricante cita que, em regiões equatoriais, pode haver distorções dos resultados, devido a fenômenos estruturais que não foram tratados no modelo [14].

Outro fator a ser observado é que o *software* desenvolvido a partir da REC533 depende fortemente da estimativa da altura da camada F2 para a correta predição dos enlaces. Como essa altura pode sofrer alterações repentinas, podem ocorrer enlaces preditos sem sucesso [14].

(c) GRAFEX

Outra aplicação de destaque, hospedada no SWS australiano, é o GRAFEX, por utilizar um método de predição mais contemporâneo e que leva em conta as perturbações magnéticas da Terra, o que não ocorre nos modelos disponíveis na página eletrônica do ITS [54].

Porém, conforme pode ser observado na literatura, os modelos possuem comportamentos distintos de acordo com a região de testes, o que leva à necessidade de ajustes locais, que podem ser feitos via novas campanhas de medição, através de leituras de ionogramas ou correções do modelo da ionosfera utilizado, a exemplo do que ocorreu para a região polar, com o desenvolvimento do *software* ICEPAC [21 e 53].

2.2.4. ALE

O Estabelecimento Automático de Enlaces (*Automatic Link Establishment – ALE*) é um padrão já maduro para as comunicações em HF, tendo iniciado seu desenvolvimento na década de 1980 [10] e estando hoje na terceira geração.

A primeira geração de sistemas em HF controlados via *software* teve sua origem na necessidade de controle remoto desses sistemas. Com o barateamento da tecnologia e com melhor capacidade de processamento, foi possível estabelecer enlaces automatizados, avaliação de SNR em tempo real e alteração de parâmetros da transmissão – como frequência de operação, potência empregada e tipo de modulação – de acordo com as condições da ionosfera observadas.

Nos Estados Unidos, a primeira padronização oficial do ALE, chamado de ALE de 2ª geração (ALE 2G), veio através do documento *Military Standard Interoperability and Performance Standards for Data Modems 188-141A* (MIL-STD-188-141A) e sua versão civil, a *Federal Standard 1045A* (FED-STD-1045A). Desde a sua divulgação, em 1988, diversos equipamentos de radiofrequência em HF têm adotado essas padronizações e suas novas versões – as normas MIL-STD-188-141B publicada em 2000 e a MIL-STD-188-141C de setembro de 2011 –, o que

vem permitindo melhores condições para a comunicação em HF e interoperabilidade entre diferentes fabricantes.

Em síntese, o ALE de 2ª geração pode ser descrito como:

- tem como objetivo principal a escolha do canal de propagação sem a necessidade de interferência manual dos operadores;
- uma estação irá transmitir para uma lista de estações ou para uma estação específica utilizando frequências previamente determinadas pelo operador; as estações ouvintes irão escanear de forma contínua as frequências designadas. Durante o escaneamento, será realizada uma avaliação da qualidade do enlace (*Link Quality Analysis – LQA*) baseada em SNR e BER. Os valores de LQA, chamados escores, serão armazenados em uma tabela contendo os dados das estações e frequências associadas. Quando houver a solicitação de envio de mensagens, a estação receptora parará de escanear e utilizará o canal com melhor LQA. Após interromper o escaneamento, a estação receptora buscará o modo de transmissão que permita a menor quantidade de erros de acordo com a leitura de SNR e BER;
- possui o tipo de modulação 8-FSK, Figura 2.18;
- sua largura de banda é de 3 kHz, Figura 2.19. Cada símbolo é transmitido em 8 ms, acarretando 125 símbolos por segundo; sendo 8 símbolos possíveis (8-FSK), são alocados 3 bits por símbolo, o que resulta em uma taxa de transmissão de até 375 bps;
- voltado principalmente para a transmissão de voz e não de dados;
- implementação ampla em equipamentos HF civis e militares;
- tempo para estabelecimento do enlace depende bastante da quantidade de frequências selecionadas.

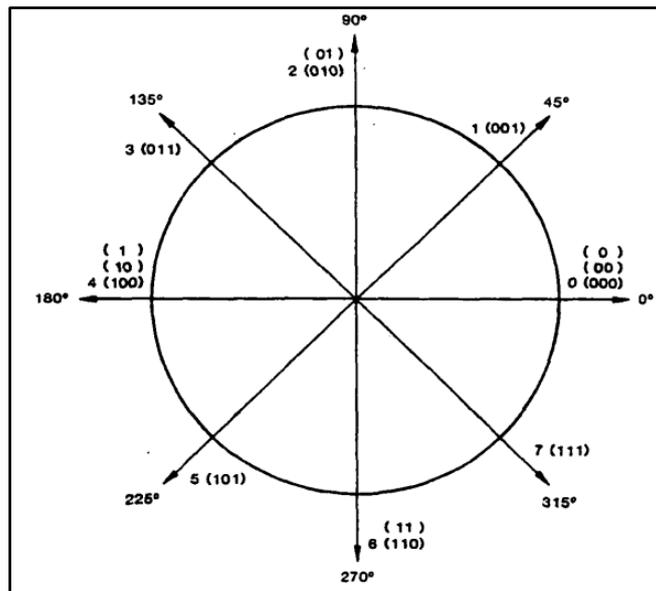


Figura 2.18 - Modulação 8-FSK do ALE 2G [11].

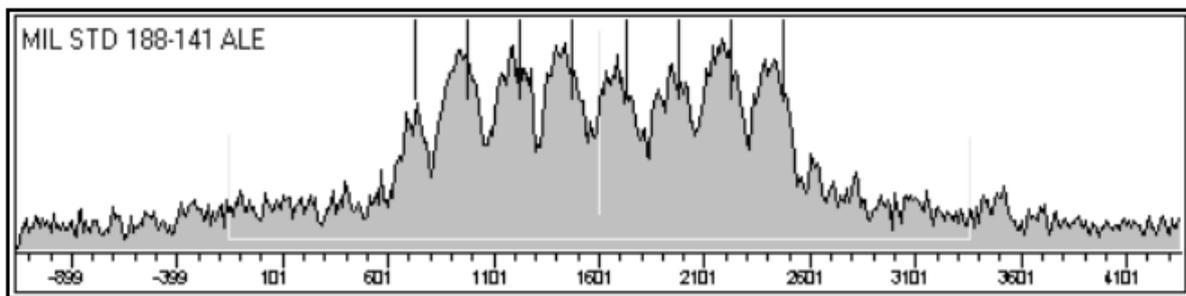


Figura 2.19 - Espectro do ALE 2G, símbolos espaçados de 250 Hz entre 750 Hz e 2500 Hz [55].

Com o avanço da necessidade de transmissões em HF mais estáveis e com taxas de transmissão melhores, foi desenvolvido, em um esforço conjunto de governos, indústria e academia, o ALE de 3ª geração (ALE 3G), o qual se encontra descrito na norma MIL-STD-188-141B, no seu Apêndice “C”. As características se resumem a:

- modulação por deslocamento de fase (8-PSK) para os símbolos de sincronização e de ajustes do sistema;
- modulação de amplitude em quadratura (QAM) para os símbolos de informação, se a taxa de transmissão for superior a 4800 bps; caso contrário, será PSK;
- transmissão através de uma família de formas de onda – chamadas de BW0 a BW5 – que são utilizadas de acordo com as condições do canal e/ou finalidades específicas, onde são alterados os parâmetros taxa de codificação convolucional,

comprimento do entrelaçamento, tamanho do preâmbulo e volume de bits de informação;

- largura de banda de 3 kHz, taxa de símbolos constante de 2400 baud;
- de acordo com os valores de SNR, haverá diferentes taxas de transmissão, conforme conta na Tabela 2.8;
- síncrono, com maior complexidade e custo mais elevado para implementação;
- taxas de transmissão de até 12800 bps, utilizando o 64-QAM;
- enlaces estabelecidos com SNR e tempo de escaneamento menores, quando comparados ao ALE 2G, Figura 2.20, com medidas empíricas indicando de 6 a 9 dB de melhoria no sinal;
- capacidade de lidar com redes maiores, com mais transmissores.

Tabela 2.8 - Diferentes taxas de transmissão de acordo com a SNR no ALE 3G [56]

SNR	Uso potencial
SNR <= -6	Não é possível estabelecer comunicação
-6 < SNR <= -3	50 bps a 75 bps
-3 < SNR <= 0	50 bps a 75 bps
0 < SNR <= 3	150 bps
3 < SNR <= 6	300 bps
6 < SNR <= 9	300 bps
9 < SNR <= 12	1200 bps para dados e voz digital de baixa qualidade
12 < SNR <= 15	1200 bps para dados e voz digital
15 < SNR <= 18	1200 bps para dados e voz digital
18 < SNR <= 21	2400 bps e voz em boa qualidade
21 < SNR <= 24	4800 bps, voz na qualidade máxima

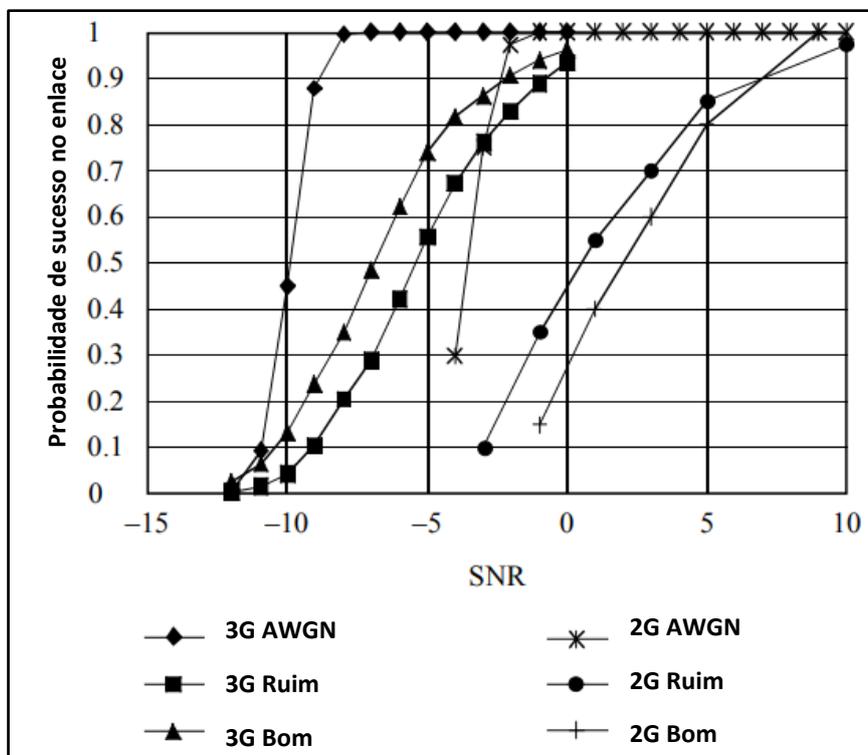


Figura 2.20 - Probabilidade de sucesso no enlace para ALE 2G e 3G de acordo com as condições do canal [57].

Embora a norma MIL-STD-188-141B traga a possibilidade de se obterem taxas de transmissão de até 12.800 bps, a própria documentação impõe condições de SNR muito elevadas para tal condição, conforme pode ser observado na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - SNR necessária para diferentes taxas de transmissão no ALE 3G [57].

Taxa de Transmissão (bps)	SNR (dB) necessária para BER < 1.0E-5	
	Canal AWGN	Canal ITU-R pobre (Tabela 2.3)
12.800	27	-
9.600	21	33
8.000	19	28
6.400	16	24
4.800	13	20
3.200	9	15

Para transmissões além da visada direta (*Beyond Line-Of-Sight* – BLOS) e utilizando a potência normalmente encontrada em equipamentos táticos, até 20 W, a SNR raramente conseguirá

ultrapassar o valor de 20 dB, conforme será exibido no capítulo 4 deste trabalho. Além do que, dependendo do tipo de desvanecimento encontrado no canal utilizado, a BER poderá ser superior a $1.0E-5$, o que também impactará na taxa de transmissão de acordo com o tamanho dos pacotes de dados, Figura 2.21 [58].

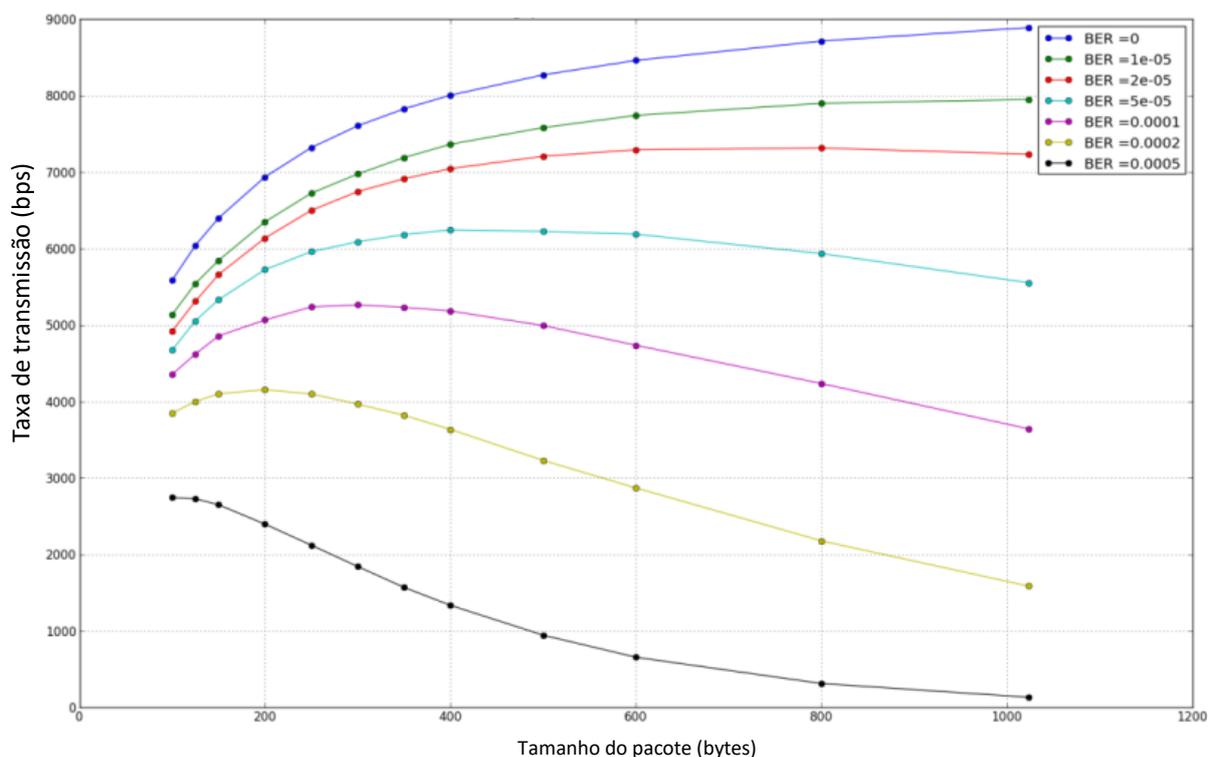


Figura 2.21 - Taxas de transmissão com diferentes tamanhos de pacote e de BER [58].

Atualmente, há outras padronizações militares em vigor para o ALE, a MIL STD 188-110C, publicada em 2011, e a MIL STD 188-110D, de 2017, porém ainda não há equipamentos disponíveis, no Brasil, com esses novos parâmetros.

2.3. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou diversos aspectos que influenciam na comunicação em HF, trazendo esse conteúdo, o máximo possível, para o contexto dos testes a serem realizados em território nacional. Embora a comunicação em HF possua tantas peculiaridades, o uso das ferramentas citadas, VOACAP, REC533 e ionossondas, e a compreensão dos fenômenos comuns à ionosfera, como o ESF e as tempestades magnéticas, permitem que sistemas em HF sejam utilizados em larga escala.

No próximo capítulo, será apresentada a metodologia para a consecução dos objetivos propostos, onde será necessário empregar as informações apresentadas no Referencial Teórico, assim como será apresentada a esquematização para a realização dos testes empíricos para se escolher a melhor ferramenta de predição e para averiguar o impacto do ESF em enlaces ionosféricos.

3. METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS MODELOS E ESTRUTURAÇÃO DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO

Conforme citado na Introdução deste trabalho, o principal objetivo é a obtenção de frequências adequadas para enlaces entre transceptores táticos, que, muitas vezes, não possuem as melhores condições quando comparados às de estações fixas, seja devido à infraestrutura reduzida ou a menor capacidade de potência a ser empregada.

Uma resposta simples para o problema seria empregar mais potência nas transmissões, porém, a estrutura necessária para isso é impeditiva em alguns casos, como em deslocamentos a pé, ou até mesmo em motorizados. Outra abordagem possível é a escolha judiciosa das frequências propagadas, pré-programando os transceptores para realizarem trocas de frequências de acordo com as condições da ionosfera. Porém, até mesmo essa abordagem pode levar a falhas imprevisíveis, se houver, por exemplo, tempestades magnéticas ou outros distúrbios ionosféricos, como o ESF.

Logo, uma resposta satisfatória para o problema deve envolver mais de uma ferramenta, quais sejam: inicialmente, os modelos de predição disponíveis via *software*, como o VOACAP, REC533 e o GRAFEX, que fornecerão valores iniciais de frequências adequadas, como os da FOT; após isso, as ionossondas podem ser utilizadas para compreender a ionosfera local, verificando, por exemplo, a presença de distúrbios e em que horário eles ocorrem mais frequentemente; em conjunto com as ionossondas, é necessário verificar periodicamente os índices planetários Kp ou ap , visando a identificar a presença de tempestades magnéticas que possam prejudicar o sistema, por fim, pode-se empregar o ALE, percorrendo uma lista de frequências de forma sistemática e que não seja excessivamente oneroso em termos de tempo despendido.

Para se alcançar o objetivo proposto número 1 - *obter, a partir de modelos já existentes, resultados para predição de valores de frequências a serem utilizados em enlaces entre transceptores móveis* -, serão selecionados modelos já consagrados na literatura de referência e todos eles, e seus respectivos *softwares*, serão alimentados levando em conta o que foi exposto no capítulo 2.

Para o objetivo proposto número 2 - *definir uma metodologia para comparação dos resultados dos modelos de predição de frequência* -, será necessário esquematizar uma campanha de

medições empírica, de forma a poder verificar, em um enlace HF real, qual o melhor modelo de predição. A campanha de medição seguirá padronizações definidas na Rec. ITU-R F.1148-1 [48], porém, além da avaliação de cada modelo para comparação das SNR preditas com SNR observadas em campanha, será identificado o modelo de predição que proporcione o menor desvio-padrão da diferença entre as frequências preditas e a melhor frequência de transmissão obtida empiricamente, embasando-se nos escores da técnica ALE, que permitem identificar a frequência que garante a maior SNR, denominada neste trabalho f_m .

Quanto ao objetivo número 3 – *Avaliar o impacto do fenômeno ESF na degradação da SNR* -, para que o fenômeno seja averiguado, será necessário, em princípio, escolher duas localidades próximas do Equador Magnético, local de maior intensidade da anomalia. Além disso, é necessário que haja ionossondas na proximidade dessas localidades, de forma que seja possível detectar o ESF no momento de sua ocorrência, por meio da observação de ionogramas. Porém, do ponto de vista da viabilidade da realização do experimento, deve-se levar em conta as limitações logísticas (disponibilidade de equipamentos e agenda da equipe de suporte, entre outros aspectos) e o fato de que o fenômeno ESF, quando ocorre, pode ser observado, mesmo com menor intensidade, em uma ampla região de abrangência [17]. Assim sendo, a escolha das localidades nas quais o transmissor e o receptor do enlace serão instalados na campanha em tela levará em conta todos esses aspectos.

Por fim, para o objetivo número 4 – *apresentar um método para definição das frequências de transmissão a serem empregadas pela técnica ALE* -, serão utilizadas as informações já disponíveis na literatura de referência mais os resultados alcançados nos objetivos 1, 2 e 3, de forma a apresentar um método que possua base teórica e empírica e que reflita em especial as dificuldades para comunicações HF no território brasileiro.

3.1. A RECOMENDAÇÃO ITU-R F.1148-1

A Rec. ITU-R F.1148-1 [48] padroniza uma série de especificações para comparar valores preditos e empíricos de SNR em enlaces ionosféricos, assim como a forma de apresentar esses dados. O objetivo, com isso, é verificar a acurácia dos modelos e identificar possíveis pontos de melhoria.

Os dados a serem observados e computados são:

- quantidade de medidas para um determinado tipo de enlace, onde esses são segmentados por características específicas, tais como frequência, hora local ou distância entre os transceptores; e
- desvio-padrão (σ), ou a Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* - RMSE), em dB, Equação 3.1, entre as SNR previstas e empíricas,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - m_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n (p_i - m_i))^2}{n}}{n - 1}} \text{ [dB]} \quad (3.1)$$

em que p_i são os valores de SNR previstos por um determinado modelo (a ITU-R F.1148-1 recomenda o uso do REC533), m_i é a SNR observada em campo e n é o número de amostras. O subíndice i refere-se a um determinado tipo de enlace, a ser classificado de acordo com as segmentações padronizadas pela ITU-R F.1148-1.

As segmentações da ITU-R F.1148-1, que diferenciam os diversos tipos de enlaces, visam a identificar valores de desvios-padrões sistemáticos e perenes em condições específicas. As segmentações são classificadas de acordo com os parâmetros abaixo.

- Frequências, as quais podem ser:
 - uma frequência única para todos os testes;
 - todas as frequências possíveis de enlace;
 - frequências de intervalos específicos, por exemplo, entre 2 MHz e 5 MHz.
- Distância entre os transceptores, divididos em intervalos de mil quilômetros, por exemplo, entre 0 e 1.000 km.
- Latitude geomagnética do enlace, dividida a cada 20°, por exemplo, entre 0° e 20°.
- SSN, dividido em intervalos específicos, por exemplo, entre 0 e 15.
- Estação do ano, de acordo com o hemisfério e com o mês.
- Hora local, para a região que está no meio do enlace.
- Modos de propagação do raio, por exemplo, via camada F2 ou via camada E.

- Razão entre a frequência transmitida e a MUF mensal predita pelo modelo.

As características das segmentações da campanha empírica deste trabalho podem ser encontradas na Tabela 3.1, na seção 3.3 deste capítulo.

Adicionalmente, além de comparar os valores de SNR preditas e empíricas para o mesmo modelo, conforme Equação 3.1, este trabalho buscará, prioritariamente, identificar o modelo que forneça a frequência mais próxima da *melhor frequência observada empiricamente* (f_m). Para isso, será utilizada a Equação 3.2, computando e comparando valores de frequências preditos e empíricos, na forma abaixo:

- desvio-padrão (s_j), RMSE, em MHz, Equação 3.2, entre as frequências preditas e empíricas,

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - f_{mi})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n (d_i - f_{mi}))^2}{n}}{n - 1}} \text{ [MHz]} \quad (3.2)$$

em que d_i são os valores de frequências preditos em cada modelo, f_{mi} é a melhor frequência observada em campo, n é o número de amostras. O subíndice i refere-se a um determinado tipo de enlace, a ser classificado de acordo com as segmentações padronizadas pela ITU-R F.1148-1. O subíndice j refere-se aos modelos de predição, no total de 3, mais a um modelo adicional de predição obtido diretamente a partir de ionogramas, a ser detalhado na seção 3.2. Todas as frequências preditas obtidas a partir dos modelos, as d_i , serão apresentadas no capítulo 4, na seção 4.5.

3.2. REQUISITOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO E VALORES ENCONTRADOS

Levando-se em consideração todos os pontos anteriormente discutidos, a campanha de medições deste trabalho foi segmentada e estruturada de acordo com as informações apresentadas a seguir.

(a) Localização das estações

Requisitos	Valores Propostos
<ul style="list-style-type: none">• Deve haver transmissão do sinal apenas via ionosfera, de forma que o principal critério a ser avaliado seja esse tipo de enlace, e não via ondas terrestres ou via visada direta;• Deve ocorrer apenas 1 reflexão na ionosfera, de forma a mitigar possíveis efeitos de desvanecimento devido a multipercursos [20], já que o foco deste trabalho está em analisar o fenômeno do ESF e não o retardo proveniente dos diferentes caminhos que o raio possa vir a percorrer;• Deve ser em área do território brasileiro em que ocorra o fenômeno do ESF; e• Deve haver ionossonda disponível próxima à região do enlace para detecção do ESF.	<ul style="list-style-type: none">• <i>Cidades escolhidas para posicionar os transceptores: Brasília-DF e Cristalina-GO, distantes entre si 120 km, o que permite somente enlaces via ionosfera;</i>• <i>Ionossonda próxima disponível para observação do ESF: Cachoeira Paulista-SP.</i>

Ressalta-se que, embora Cachoeira Paulista não esteja exatamente na região de testes, variações da ordem de centenas de quilômetros não produzem impacto significativo na estrutura da ionosfera local. Observando-se o mapa de frequências críticas (f_c) de ionossondas do SWS australiano [59], Figura 3.1, é possível verificar, em diversos horários, que uma ampla extensão da ionosfera, em algumas ocasiões por mais de 4 mil km², possui a mesma f_c . Dessa forma, a diferença de 240 km entre a região do enlace e Cachoeira Paulista não será significativa.

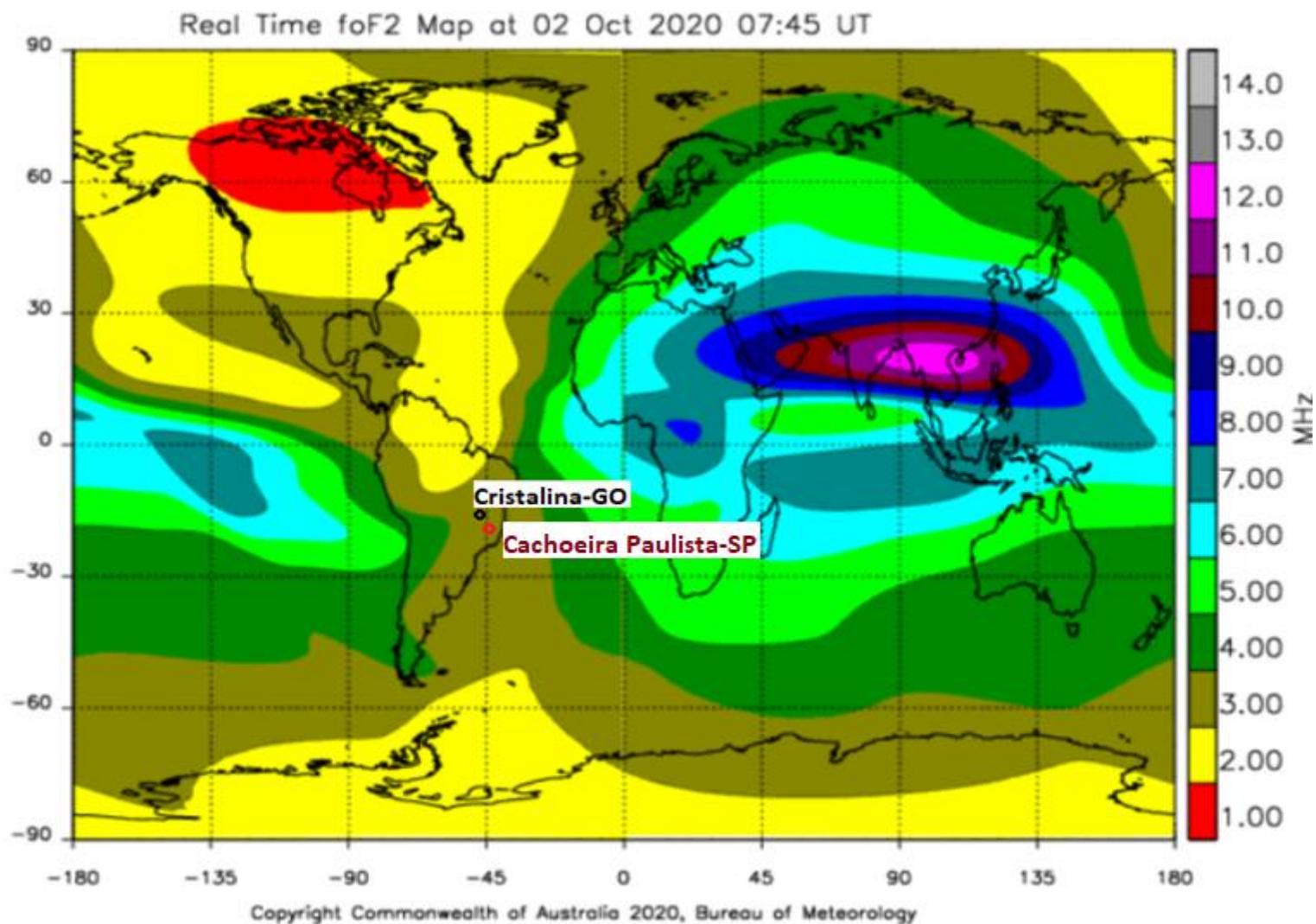


Figura 3.1 - Mapa de Frequências Críticas (fc) do SWS em 2 de outubro de 2020 [59].

De fato, o próprio VOACAP trata as FOT, mostradas na Figura 3.2, de regiões próximas como altamente semelhantes, com coeficiente de correlação de 0,97 e desvio-padrão entre as frequências de 0,76 MHz. A linha vermelha é o enlace da campanha (entre Brasília-DF e Cristalina-GO); a linha azul é um enlace de mesmo comprimento, 120 km, no sentido Norte-Sul tendo Cachoeira Paulista-SP como ponto médio. As frequências da Figura 3.2 foram calculadas para o mês da campanha realizada neste trabalho.

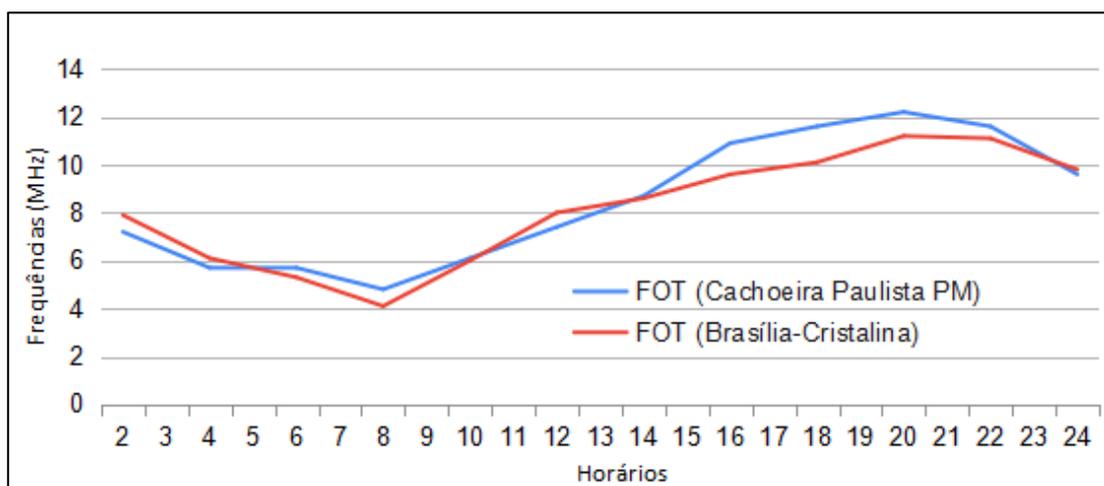


Figura 3.2 - FOT para o enlace de Cachoeira Paulista e para o de Brasília-Cristalina com alto coeficiente de correlação: 0,97, obtidas no VOACAP.

(b) Dias e horários para execução dos testes

Requisitos	Valores Propostos
<ul style="list-style-type: none"> Não deve haver tempestades magnéticas ou intensas explosões solares que possam ocasionar perturbações na ionosfera e/ou aumentar o desvio Doppler, devido às mudanças no meio de transmissão ao longo do enlace [36], de forma que o principal fenômeno a ser explorado seja o ESF e não tempestades magnéticas; e Os horários para coleta dos dados devem ser semelhantes à forma como os modelos apresentam os seus resultados: a cada 60 minutos, ao longo de 24 horas. 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Período escolhido em que houve baixa perturbação geomagnética: 17 a 21 de fevereiro de 2020, conforme pode ser observado na Figura 3.3;</i> <i>Visando a atender a limitações da equipe de apoio e ainda poder confrontar os resultados empíricos com os obtidos a partir dos modelos sob análise, foram coletados dados a cada 120 minutos.</i>

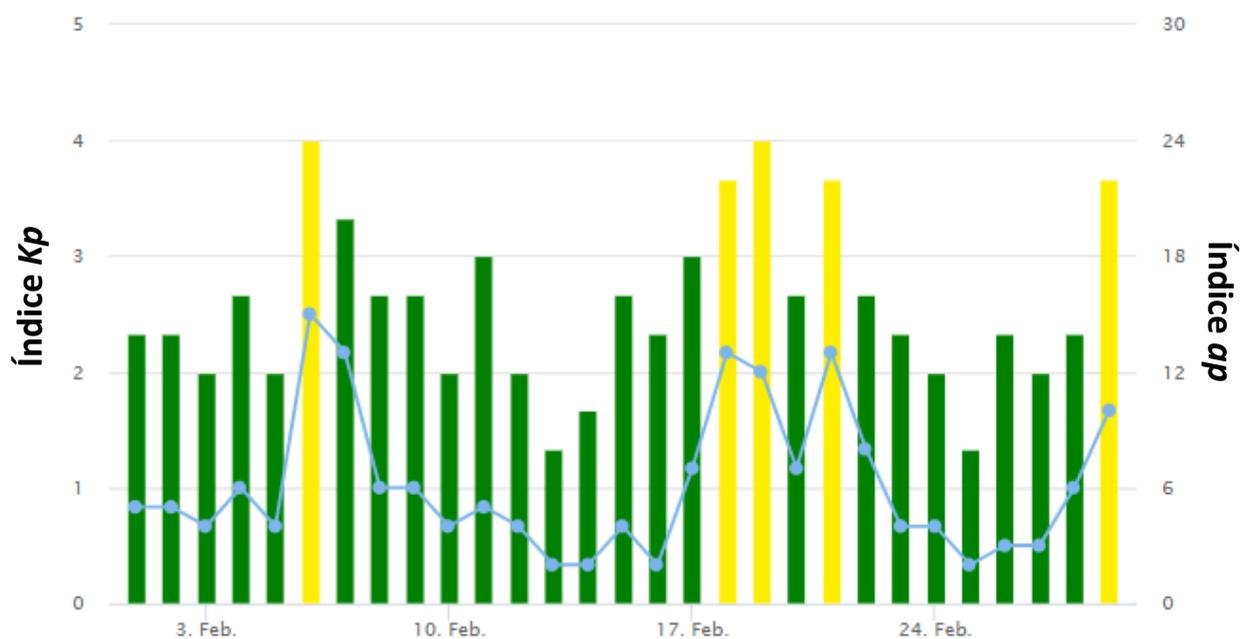


Figura 3.3 - Valores de K_p (histograma nas cores verde e amarela, eixo à esquerda), no máximo 4, e de a_p (linha de cor azul, eixo à direita), no máximo 13, entre 17 e 21 de fevereiro de 2020 [60].

(c) Modelos sob análise e suas frequências a serem observadas

Requisitos	Valores Propostos
<ul style="list-style-type: none"> Os <i>softwares</i> dos modelos selecionados devem fornecer frequências de operação para as condições de teste desta campanha e cujos valores obtidos permitam comparação com dados empíricos; e A frequência a ser comparada entre os modelos de predição e as frequências empíricas deve estar presente a maior parte do tempo disponível para testes, de forma a garantir uma quantidade de testes significativa e, ao mesmo tempo, satisfazer um dos objetivos desta campanha, que é incrementar a taxa de sucesso, definida neste trabalho como uma SNR acima ou igual a 3 dB, e a disponibilidade, de sistemas HF. 	<ul style="list-style-type: none"> Os modelos de predição escolhidos foram: VOACAP, REC533 e GRAFEX. A frequência dos modelos de predição escolhida para ser avaliada foi a FOT, que é definida como a frequência que permite sucesso nas transmissões em pelo menos 90% dos dias de um mês [48], ou seja, é aquela que possui a maior disponibilidade, quando comparada à MUF, à HPF ou à MOF.

(d) Modelo baseado nas frequências críticas dos ionogramas (f_c)

Conforme citado na seção 3.1, este trabalho traz um modelo adicional de predição, obtido diretamente a partir de ionogramas, para também ser comparado com dados empíricos. Esse

modelo é baseado nas frequências críticas (f_c), que serão extraídas diretamente do banco de dados do *Global Ionospheric Radio Observatory* (GIRO) [28], que consolida dados de ionossondas de diversos locais da Terra, inclusive das brasileiras. A intenção desse modelo é obter valores de frequência para operação que são plenamente baseados na ionosfera local.

Durante 30 dias distribuídos de forma equivalente antes, durante e após os dias da campanha, serão coletadas as f_c da ionossonda mais próxima disponível. Após isso, adotando-se o mesmo procedimento que o VOACAP utiliza para realizar o cálculo da FOT [48], será analisada a distribuição dos valores das frequências críticas, de forma a obter o primeiro decil da distribuição e, como consequência, uma frequência de operação que garanta disponibilidade em 90% dos dias do mês, denominada neste trabalho f_{c10} .

Requisitos	Valores Encontrados
<ul style="list-style-type: none"> A coleta das frequências críticas será realizada para horas pares (<i>Universal Time</i>) durante 30 dias distribuídos de forma equivalente antes, durante e após os dias da campanha. Isso constitui o período aproximado de 1 mês e mantém a equivalência com os resultados dos modelos de previsão, que também apresentam seus resultados para períodos de 1 mês. 	<ul style="list-style-type: none"> A análise da coleta das frequências críticas está na seção 4.3.

(e) Método de avaliação dos modelos de previsão

Requisitos	Valores Encontrados
<ul style="list-style-type: none"> A cada horário de teste, deverá ser observado: o RMSE entre as SNR preditas e empíricas, utilizando a Equação 3.1, e o RMSE entre as frequências preditas e a melhor frequência em termos de escores da técnica ALE, f_m, utilizando a Equação 3.2. 	<ul style="list-style-type: none"> Os RMSE entre as frequências preditas e empíricas de cada modelo estão na seção 4.5.

(f) ALE

O ALE está vinculado ao principal objetivo desse trabalho, que é a obtenção de frequências adequadas para enlaces entre transceptores móveis. Conforme observado no Capítulo 2, há diversos fatores que podem modificar a estrutura da ionosfera e, conseqüentemente, a definição da melhor frequência de operação, dessa forma, o ALE atua como importante ferramenta, ao testar várias frequências em intervalos de 15 a 40 segundos (se forem até 5 frequências para

sondagem). Porém, em algumas situações, esse tempo de testes não pode ser exacerbado e para mitigá-lo, o ALE, neste trabalho, será configurado atendendo a dois critérios: um número limitado de frequências, para que o teste ocorra em tempo hábil, e que o ALE teste todos os modelos sob análise, de forma a identificar aquele com o melhor resultado frente às medições em campo. A definição das frequências a serem utilizadas no ALE está descrita na seção 4.4, após coleta das frequências previstas de todos os modelos sob análise.

(g) Posicionamento da antena

Especialmente no VOACAP e no REC533, a altura da antena terá influência direta na SNR predita dos enlaces, sendo um dos critérios de configuração do sistema. Cada antena, nesses *softwares*, possui um arquivo de configuração específico, onde é definido, em dBi, o ganho azimutal e por grau de elevação. Além disso, deve-se dedicar especial atenção à altura da antena em relação ao solo, pois, esses arquivos pressupõe uma altura exata em que a antena deve ser posicionada. Cabe ao usuário do *software* avaliar o tipo de antena, e o seu respectivo ganho, de acordo com o ângulo de radiação onde se deseja o maior ganho. Enlaces em NVIS, por exemplo, conforme citado no capítulo anterior, exigem ganhos elevados em ângulos próximos de 90°.

Para a campanha de medição deste trabalho, será escolhida uma antena, e sua altura em relação ao solo, que ofereça o maior ganho possível, conforme será apresentado na seção 4.1, assim como, serão observados os critérios para que a SNR predita esteja de acordo com a SNR empírica.

3.3. DADOS PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DOS MODELOS

Com base no que foi exposto, e utilizando os dados da Tabela 3.1, serão obtidas as frequências e as SNR previstas pelos modelos, de forma a serem confrontadas com os resultados da campanha de medição. Os resultados de cada modelo serão apresentados no próximo capítulo.

Tabela 3.1 - Dados para VOACAP, REC533 e GRAFEX

Parâmetro	Valor	Descrição
Ano	2020	Ano da execução da campanha.
Mês	Fevereiro	Mês da execução da campanha.
Coordenadas de Brasília	15.71S; 47.81W	Localização da estação.
Coordenadas de Cristalina	16.77S; 47.60W	Localização da estação.

Parâmetro	Valor	Descrição
Coordenadas Geomagnéticas de Cristalina	8.09S; 24.05W	Esse é o ponto mais ao Sul do enlace, esse valor servirá apenas para classificar o enlace conforme as padronizações da ITU-R F.1148-1.
Distância entre as estações	120 km	O valor escolhido inviabiliza tanto a propagação via ondas terrestres como via visada direta, restando somente a via ondas ionosféricas.
Ruído local (dBW/Hz)	-150	Valor escolhido para estações em ambiente rural, pois os dois rádios estarão distantes de centros urbanos.
SSN (<i>Smoothed Sunspot Number</i>)	4	Intensidade de radiação solar para VOACAP e REC533 (obtida de acordo com o método de suavização McNish & Lincoln, conforme sugerido pelo fabricante do VOACAP) [48].
TINDEX	-4	Intensidade de radiação solar para GRAFEX (obtida automaticamente no SWS).
SNR requerida (dB-Hz)	45	SNR em dB-Hz, equivalente a 10 dB para uma largura de banda de 3 kHz.
Potência (W)	20	Máxima possível do equipamento.
Antena	Harris RF-1940	Os dados de potência por ângulo de radiação foram levados em conta no enlace de acordo com a antena do fabricante, assim como, a altura correta em relação ao solo.

3.4. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

No Capítulo 3, foi definida a metodologia deste trabalho, onde foi relacionado cada objetivo do trabalho com a proposta de um método para se atingir cada um deles.

O objetivo número 1 - *obter, a partir de modelos já existentes, resultados para predição de valores de frequências a serem utilizados em enlaces entre transceptores móveis* -, será alcançado utilizando os *softwares* dos modelos selecionados e dados de ionogramas.

Os objetivos 2 e 3, que são *comparar os modelos e avaliar o impacto do ESF na degradação da SNR*, exigem uma campanha de medições empírica, visando a obter respostas com maior confiabilidade, e uma padronização de como essas medidas serão comparadas com os modelos, para isso, será utilizado o que está prescrito na ITU-R F.1148-1.

Por fim, o objetivo 4, *apresentar um método para definição das frequências de transmissão a serem empregadas pela técnica ALE*, será alcançado reunindo todas as informações coletadas ao final do trabalho, propondo um método de seleção de frequências adequado a este tipo de enlace, nas condições estudadas.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, serão apresentados todos os resultados obtidos. Inicialmente, será apresentado como foi escolhida a antena e sua posição em relação ao solo para que o enlace da campanha de medições tenha uma SNR adequada e visando a garantir que a SNR predita esteja de acordo com a SNR empírica. Na seção 4.2, serão apresentados os dados obtidos através dos modelos de predição. O VOACAP e o REC533 fornecem tanto as FOT como as SNR preditas, já o GRAFEX apresenta somente valores de frequência.

Na seção 4.3, apresenta-se o modelo baseado em frequências críticas elaborado neste trabalho, onde se utilizou o primeiro decil dessas frequências para se obter um conjunto de valores bem adaptado às características da ionosfera local. Na seção 4.4, utilizando os dados das seções 4.2 e 4.3, será especificado como o ALE será configurado para os testes da campanha de medição. A seção 4.5 traz o RMSE de todos os modelos sob análise, visando a identificar aquele com menor desvio-padrão. Após essa etapa, este trabalho terá seu foco nesse modelo, analisando-o detalhadamente na seção 4.6. Na seção 4.7, será abordada a degradação de SNR provocada pelo ESF, assim como, os momentos em que o fenômeno esteve presente.

Por fim, após reunir todas as informações das seções anteriores, será apresentada uma resposta para o principal objetivo do trabalho, que é um procedimento de escolha de frequências para o ALE, que visa à obtenção de frequências adequadas para enlaces entre transceptores móveis, assim como, outras medidas que visam a aumentar a disponibilidade do sistema.

O Quadro 4.1 apresenta novamente os objetivos do trabalho e o Quadro 4.2 sintetiza o conteúdo de cada seção e a que objetivo do trabalho se relaciona.

Quadro 4.1 – Objetivos do trabalho

Objetivo	Descrição
1	Obter, a partir de modelos já existentes, resultados para predição de valores de frequências a serem utilizados em enlaces entre transceptores móveis.
2	Definir uma metodologia para comparação dos resultados dos modelos de predição de frequência através de uma campanha de medições empírica, identificado o modelo de predição que proporcione o menor RMSE entre as frequências preditas e a melhor frequência de transmissão obtida empiricamente.
3	Avaliar o impacto do fenômeno ESF na degradação da SNR, em território brasileiro, em um enlace HF real.
4	Apresentar um método para definição das frequências de transmissão a serem empregadas pela técnica ALE, de forma a obter maior disponibilidade do enlace em HF.

Quadro 4.2 – Seções do Capítulo 4

Seção	Descrição	Relacionada principalmente ao(s) objetivo(s)
4.1	Avaliação do ganho da antena, para que o enlace da campanha de medições tenha uma SNR adequada e visando a garantir que a SNR predita esteja de acordo com a SNR empírica.	1 e 2
4.2	Obtenção das frequências, na forma de FOT, e das SNR preditas dos modelos sob análise.	1
4.3	Modelo baseado em frequências críticas adaptado às características da ionosfera local.	1
4.4	Configuração do ALE para os testes da campanha de medição.	2 e 4
4.5	RMSE entre as frequências preditas e a melhor frequência obtida empiricamente de todos os modelos sob análise, visando a identificar aquele com menor desvio-padrão.	2 e 4
4.6	Análise detalhada do modelo que possui o menor RMSE entre as frequências preditas e a melhor frequência obtida empiricamente.	2 e 4
4.7	Análise da degradação de SNR provocada pelo ESF.	3
4.8	Apresentação do procedimento de escolha de frequências para o ALE e outras medidas que podem ser empregadas para aumentar a disponibilidade de sistemas em HF.	4

4.1. DETERMINAÇÃO DA ALTURA DA ANTENA

A antena escolhida para a campanha de medições empíricas foi a Harris RF-1940, uma antena dipolo que possui um ganho significativo, em dBi, para radiações em 90° , que é o principal ângulo, apontado pelo VOACAP e pelo GRAFEX, que será utilizado no enlace.

As simulações de altura da antena em relação ao solo foram realizadas no *software* 4nec2, utilizando o modelo de solo Sommerfeld-Norton ($\epsilon_f = 13$, $\sigma_f = 5$ mS/m), que representa uma simulação realista de perdas e reflexão [61]. O raio dos fios foi considerado 10 mm. Antenas próximas ao solo podem ser muito influenciadas por reflexão ou por absorção da radiação, especialmente para HF, e quando a altura da antena é menor que 1 comprimento de onda. Para este tipo de antena, o solo será parte componente do sistema, influenciando nos lóbulos de radiação e em sua impedância [62].

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de radiação para a altura de $0,02 \lambda$, que apresenta alta diretividade, porém com baixo ganho (menos de -7 dBi). A Figura 4.2 apresenta 4 alturas em termos de comprimento de onda: $0,02 \lambda$; $0,06 \lambda$; $0,2 \lambda$ e $0,4 \lambda$. À altura de $0,4 \lambda$ do solo a antena perde diretividade, formando dois lóbulos laterais acentuados, reduzindo essa altura, a $0,2 \lambda$ (em azul no gráfico), o diagrama volta a ser mais eficiente para NVIS.

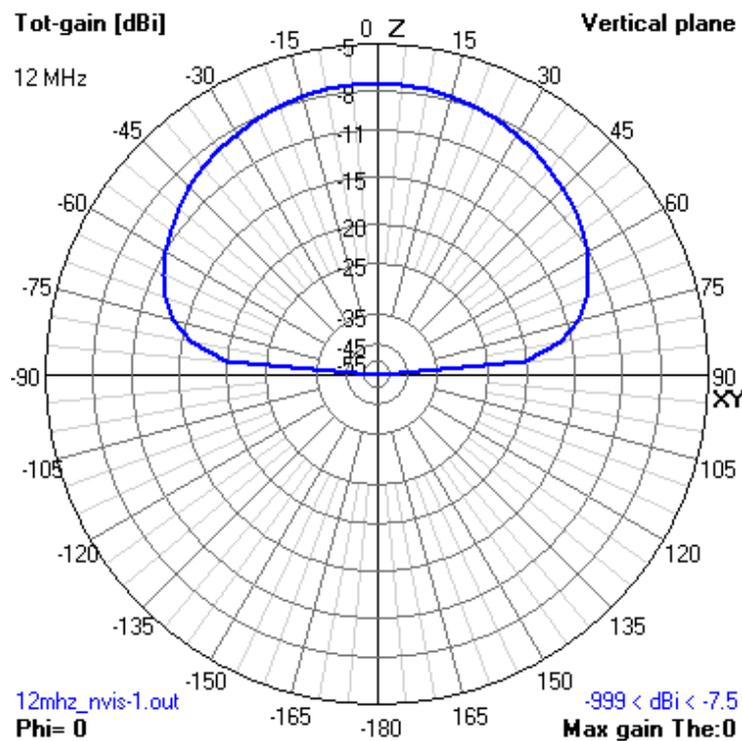


Figura 4.1 - Antena RF-1940 a $0,02 \lambda$ do solo.

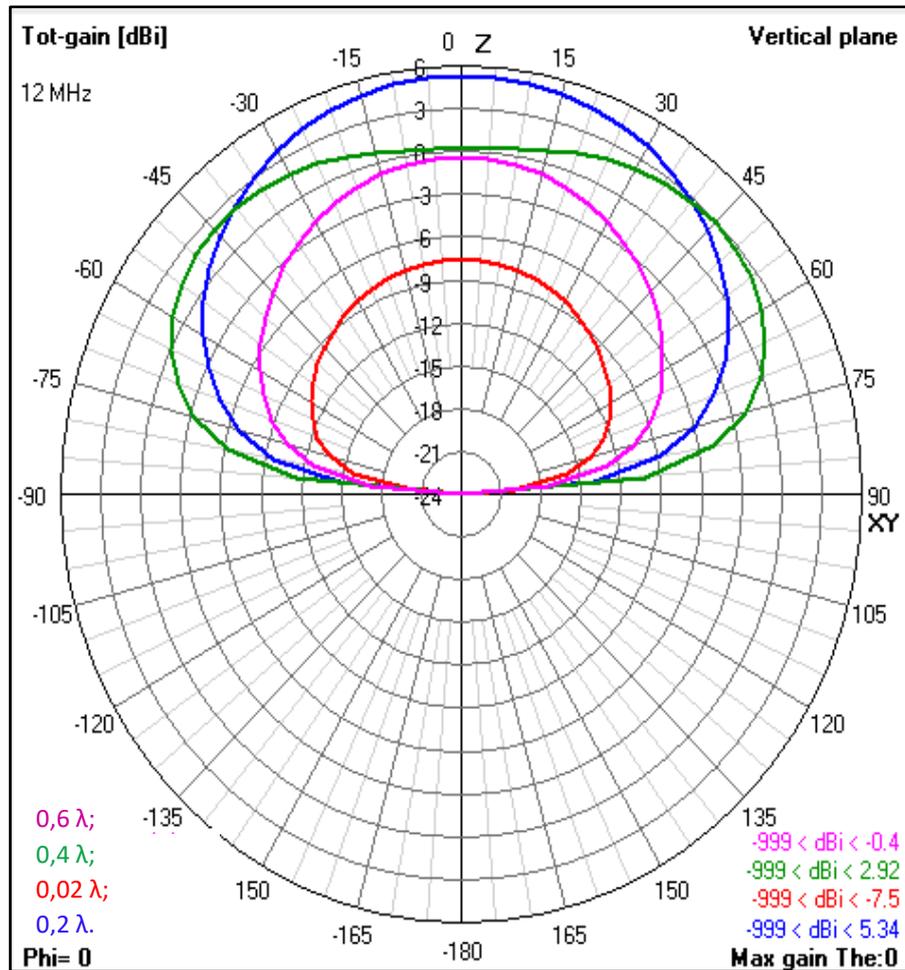


Figura 4.2 - Antena RF-1940 a 0,02 λ (vermelho), 0,06 λ (rosa), 0,2 λ (azul) e 0,4 λ (verde) do solo.

O valor de 0,2 λ apresentou-se como a altura ótima para o diagrama, a partir deste valor, os lóbulos irão se achatar cada vez mais ou formar lóbulos laterais, o que seria um desperdício para o NVIS, Figura 4.3.

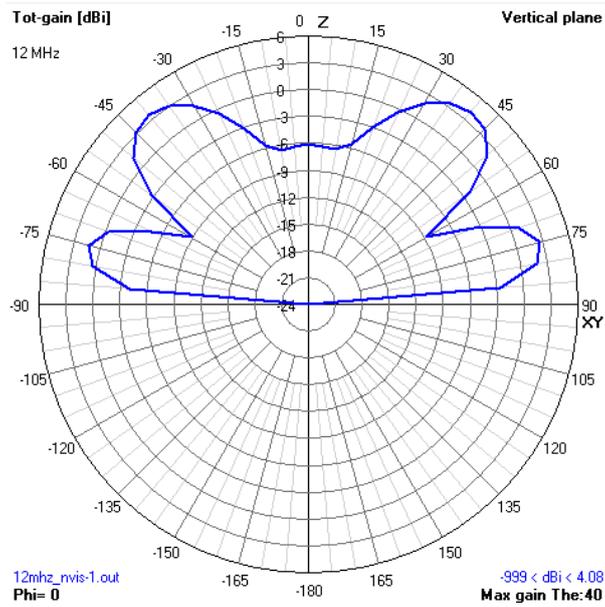


Figura 4.3 - Antena RF-1940 a 1λ do solo.

A Figuras 4.4 e 4.5 mostram detalhes do estaiamento e da antena, modelo RF-1940, em Cristalina-GO, instalada em ambiente rural, na altura de $0,2 \lambda$ em relação ao solo.



Figura 4.4 - Antena modelo RF-1940 em Cristalina-GO.



Figura 4.5 - Instalação da antena modelo RF-1940.

4.2. OBTENÇÃO DAS FOT E DAS SNR PREDITAS EM CADA MODELO

(a) Obtenção das FOT e das SNR previstas no *software* VOACAP

A Figura 4.6 apresenta os resultados de predição da FOT utilizando o *software* VOACAP, em conjunto com um código de cores que assinala a probabilidade de obtenção de uma SNR - de acordo com a frequência e com o horário - acima da SNR requerida especificada na Tabela 3.1

(45 dB-Hz). Ou seja, *Time availability*, à direita do gráfico, pode ser interpretado como uma medida de disponibilidade do sistema ao longo de 1 mês de comunicação. Por exemplo, às 20h00 UTC, para a frequência de 7 MHz, em 27 dias, ou mais, dos 30 dias de um mês, o que representa 90%, a SNR obtida em campo será, de acordo com o modelo, maior que a SNR requerida (maior ou igual a 45 dB-Hz). Os dados são apresentados em um ciclo de 24 horas, no *Universal Time*. Assim, dos resultados exibidos na Figura 4.6, é possível extrair as FOT, linha de cor azul, e também identificar o nível de disponibilidade do sistema, realizando ajustes se for necessário, como por exemplo, realizar a troca da antena, modificar sua posição, ou reduzir a SNR requerida.

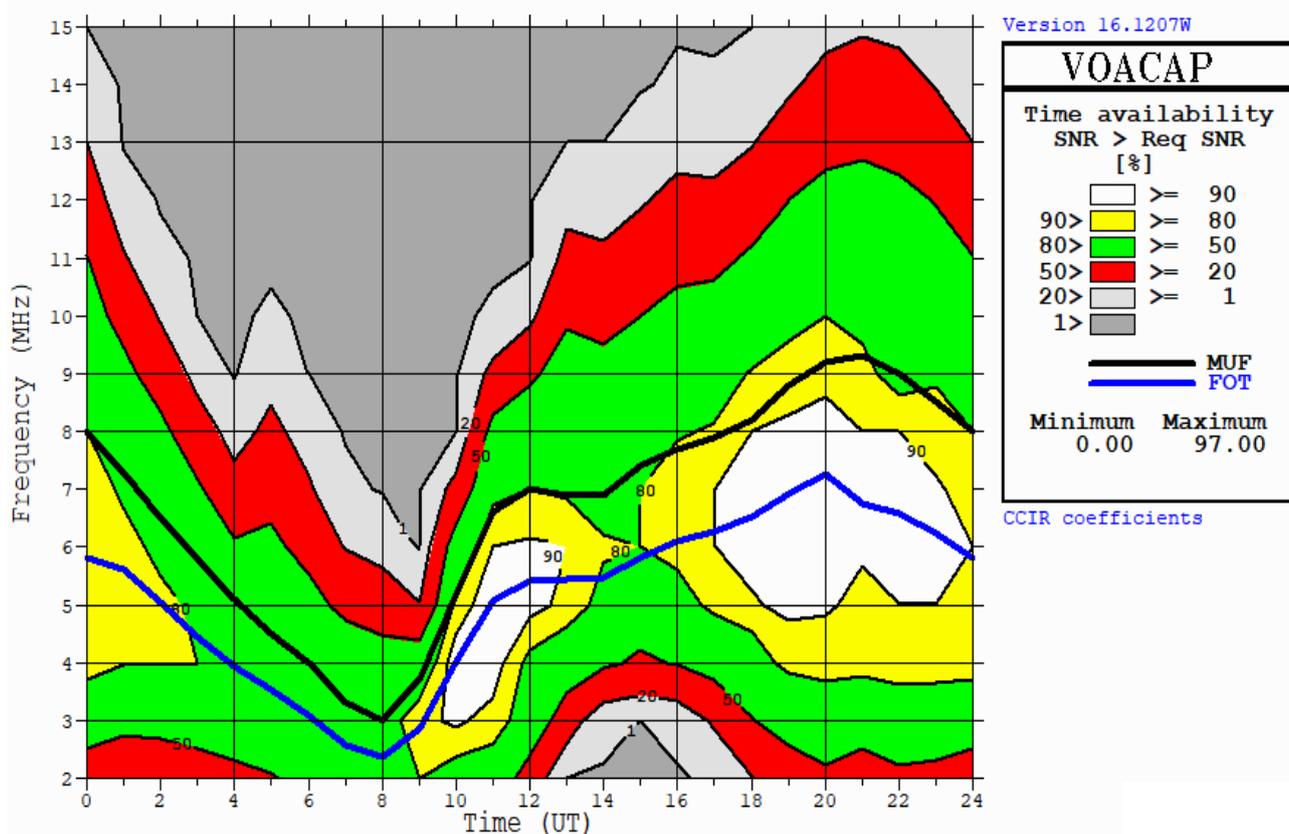


Figura 4.6 - FOT (linha azul) obtida com dados da Tabela 3.1 no VOACAP [47].

Alternativamente, os resultados podem ser apresentados em termos da mediana da SNR no receptor, Figura 4.7, para fins de utilização na Equação 3.1. Sendo a SNR requerida de 45 dB-Hz, conforme consta na Tabela 3.1, percebe-se que, quando a SNR está entre 45 dB-Hz e 50 dB-Hz, portanto, acima da SNR requerida, o VOACAP ainda indicará que o enlace possui baixa probabilidade de sucesso (menor que 50%). E somente quando a SNR predita está acima de 55 dB-Hz, é que o VOACAP indicará um sistema com 80% de probabilidade de sucesso. Esses

resultados vão ao encontro da metodologia do cálculo das frequências preditas FOT e MUF, onde o modelo pressupõe maior disponibilidade, entre 80% e 100% dos dias do mês estará disponível, somente quando os valores observados estão bem acima, mais de 22%, do valor da SNR mediana.

Isso corrobora que o usuário do *software* deve utilizar a FOT, já que essa medida tende a apresentar, analisando as duas figuras, maior disponibilidade. Por exemplo, às 16h00, a FOT, na Figura 4.7, apresenta uma SNR entre 55 dB-Hz e 60 dB-Hz, já a MUF apresenta uma SNR entre 50 dB-Hz e 55 dB-Hz, 5 dB-Hz a menos.

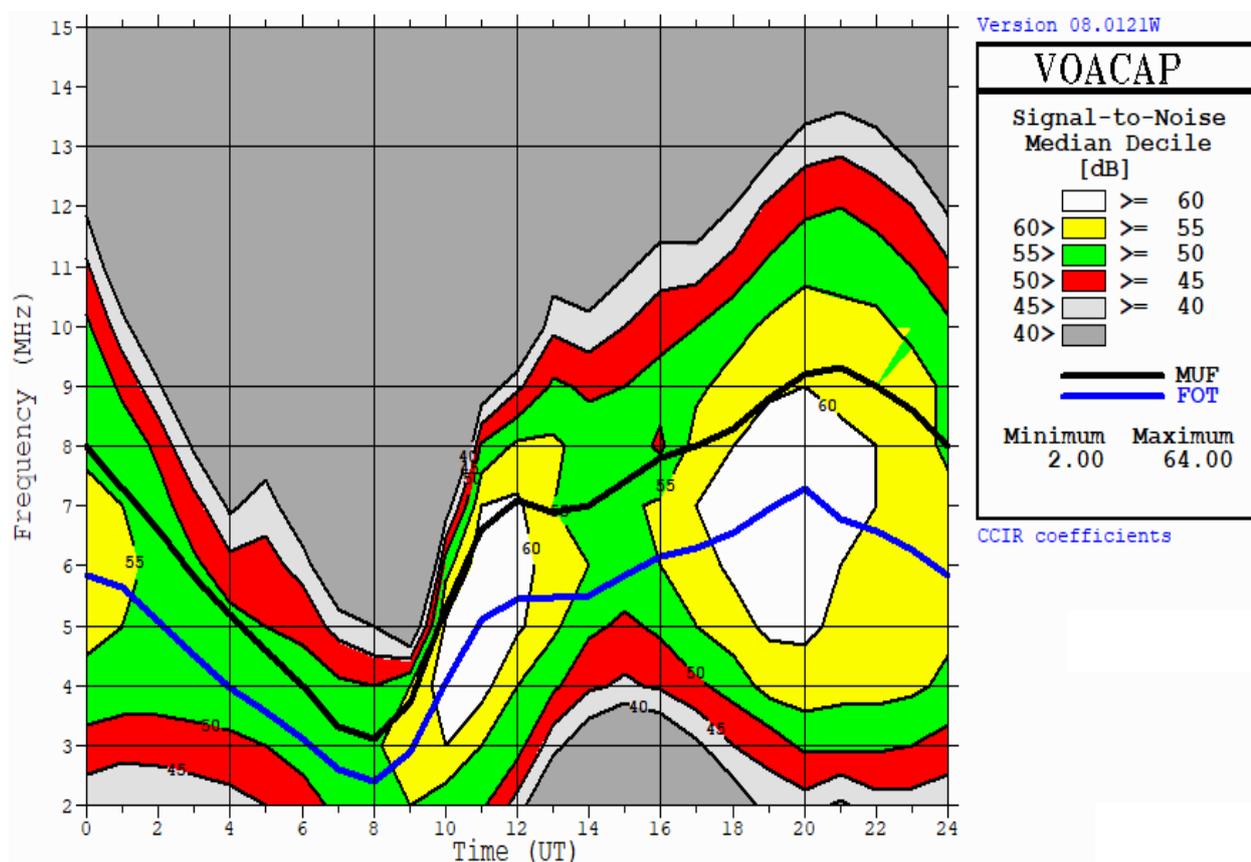


Figura 4.7 - Mediana da SNR (db-Hz) para o enlace entre Brasília-DF e Cristalina-GO utilizando o *software* VOACAP [47].

(b) Obtenção das FOT e das SNR preditas no *software* REC533

Para o REC533, os resultados estão apresentados na Figura 4.8, em termos da mediana da SNR no receptor, onde percebe-se, de imediato, que o *software* prevê menor taxa de sucesso no enlace, já que a mediana da SNR está menor na maioria dos horários, conforme pode ser observado pela redução da área das cores branca, amarela e verde, porém, simultaneamente, percebe-se que a FOT assume valores maiores no REC533 quando comparado ao VOACAP:

às 20h00, por exemplo, no VOACAP, esse valor é 7 MHz, no REC533 é 9 MHz; às 04h00, no VOACAP, a FOT é 4 MHz, enquanto no REC533 é 5,2 MHz. Essa diferença de 2 MHz, em alguns horários, resultou em valores de SNR muito distintos, no momento em que foram realizados os testes de campo, conforme será verificado na seção 4.5.

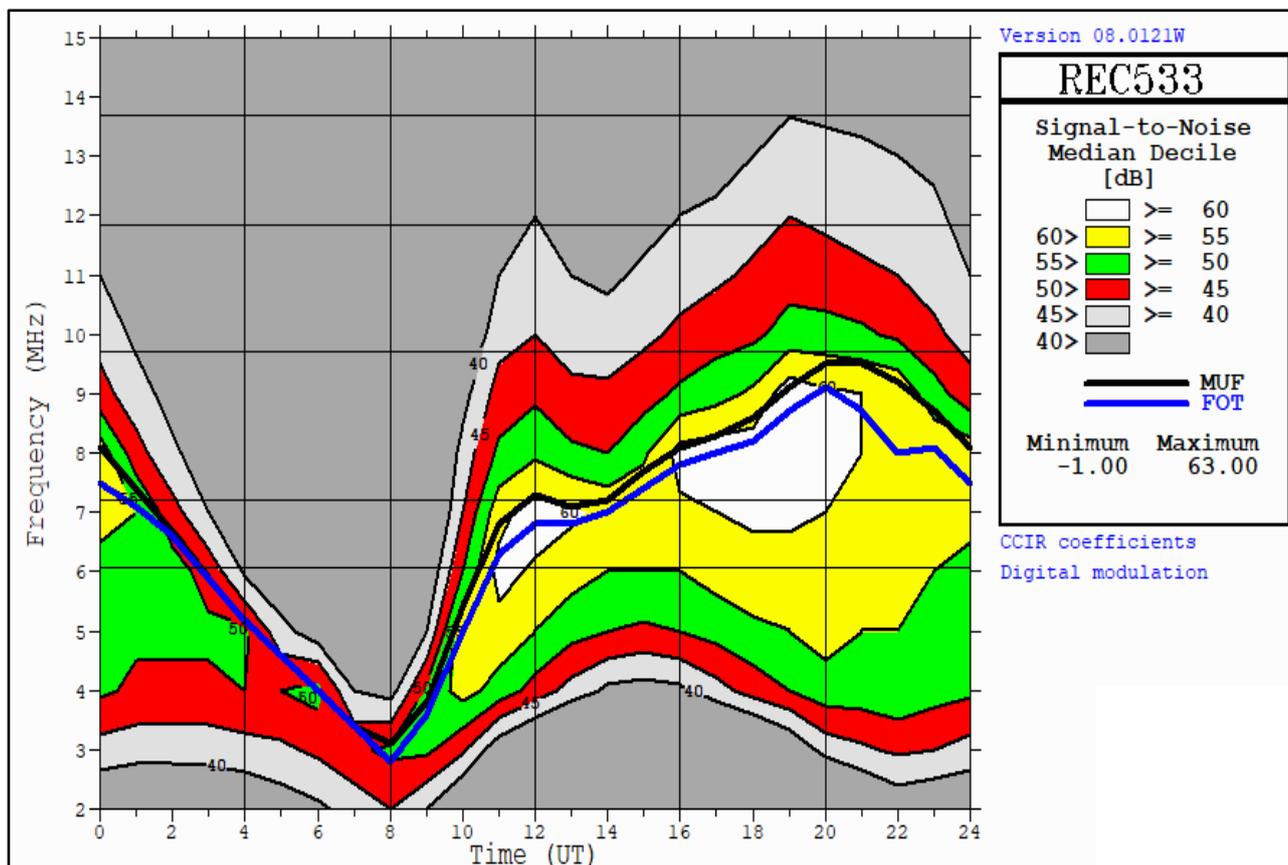


Figura 4.8 - Mediana da SNR (db-Hz) para o enlace entre Brasília-DF e Cristalina-GO utilizando o software REC533 [47].

(c) Obtenção das FOT previstas no *software* GRAFEX

Por fim, os resultados do GRAFEX estão apresentados na Figura 4.9, onde não há valores de SNR previstos, mas há a Frequência Ótima de Trabalho (*Optimum Working Frequency – OWF*), que também é definida, pelo SWS australiano, como o primeiro decil da MUF. Os resultados são apresentados por letras, onde cada uma representa 1 MHz, de 0 até a máxima frequência possível de propagação [63].

Um dado relevante para transmissões em HF, disponível no GRAFEX, é a frequência no limiar para absorção (*Absorption Limiting Frequency – ALF*), que no VOACAP é indicada como a LUF e, como já citado no capítulo 2, é reconhecida pelos autores do *software* como de baixa

confiabilidade. Neste trabalho, ao se configurar o ALE, somente serão utilizados valores de frequências acima da ALF e da LUF.

Diferentemente do VOACAP, o GRAFEX também fornece os modos de propagação do raio, identificados como “1F/1E”, o que aponta para o usuário, em conjunto com a legenda para cada horário, como o raio está sendo refletido na ionosfera. Na Figura 4.9, por exemplo, é possível identificar que, às 00h00 UT, as frequências até 5.2 MHz, assinaladas pela letra “F”, irão propagar com 1 salto na ionosfera na camada F (modo 1F). O GRAFEX também apresenta os dados do ângulo de radiação necessário para o enlace pretendido diretamente na tabela da OWF – está descrito como *Near 90* -, esse dado foi utilizado na escolha da antena, favorecendo aquela com ganhos mais elevados em ângulos de radiação verticais.

Conforme citado no item “a” da seção 3.2, nos enlaces a serem testados deve ocorrer apenas 1 reflexão na ionosfera, de forma a mitigar possíveis efeitos de desvanecimento devido a multipercursos.

Para fins práticos, utilizando equipamentos de potência limitada, os melhores resultados de SNR virão, de acordo com o GRAFEX, utilizando o ângulo correto de propagação para o modo 1F, nas frequências que estão assinaladas com a letra “F”. Outros modos de propagação terão geralmente vários dB a menos para o sinal recebido [63].

```

Date: 5 2 2020
T index: -4
Tx name: BSB Tx latitude: -15.71 Tx longitude: 312.19
Rx name: Cristalina Rx latitude: -16.77 Rx longitude: 312.40
=====

SWS GRAFEX HF FREQUENCY PREDICTIONS
=====
Circuit: BSB          Cristalina          Date: 5 February, 2020  T-index: -4
Bearings: 169 349          Distance: 120 km
First Mode      |-----F r e q u e n c y (MHz)-----|      Second Mode
1F/1E: Near 90   1  5  10  15  20  25  30  35  40      ** NONE **
UT  OWF EMUF ALF |...|...|  ....|....|  ....|....|  ....|....|  OWF EMUF ALF UT
00  5.2  0.3  0.0 FFFFF%.                      00
01  4.8  0.3  0.0 FFFF%.                        01
02  4.6  0.3  0.0 FFFF%.                        02
03  4.2  0.3  0.0 FFFF%.                        03
04  3.6  0.3  0.0 FFF%.                         04
05  3.2  0.3  0.0 FFF%.                         05
06  2.6  0.3  0.0 FF%.                          06
07  2.2  0.3  0.0 FF%.                          07
08  1.9  0.3  0.0 F%.                           08
09  2.7  1.3  1.2 F%.                           09
10  4.1  2.5  2.0 AFF%.                          10
11  4.9  3.0  2.3 BF%.                           11
12  5.3  3.3  2.6 AFF%.                          12
13  5.5  3.5  2.7 AFF%.                          13
14  5.7  3.6  2.8 AFF%..                         14
15  5.9  3.7  2.8 AFF%..                         15
16  6.3  3.6  2.8 AFFF%..                        16
17  6.6  3.5  2.7 AFFF%..                        17
18  7.1  3.4  2.6 AFFFF%..                       18
19  7.2  3.1  2.4 BFFFF%..                       19
20  7.1  2.7  2.2 FFFFF%..                       20
21  6.7  1.9  1.6 AFFFF%..                       21
22  6.1  0.3  0.0 FFFFFFF%..                      22
23  5.8  0.3  0.0 FFFFFFF%..                      23
UT  OWF EMUF ALF |...|...|  ....|....|  ....|....|  ....|....|  OWF EMUF ALF UT
=====
|.  USABLE LESS THAN 50% OF DAYS      |%  USABLE 50% TO 90% OF DAYS      | |
|B  BOTH E and F MODES 90% OF DAYS    |M  MIXED FIRST AND SECOND F MODES |
|F  FIRST F MODE ONLY      |E  E-LAYER PROPAGATION      |P  90% E and 50-90% F  |
|S  SECOND MODES ONLY      |A  HIGH ABSORPTION          |X  COMPLEX MODES      |

```

Figura 4.9 - Frequências, em MHz, para o enlace entre Brasília-DF e Cristalina-GO utilizando o software GRAFEX [63].

4.3. ANÁLISE DA COLETA DAS f_c E OBTENÇÃO DAS f_{c10}

A obtenção das f_{c10} foi realizada conforme exposto no capítulo 3, no período e horários estabelecidos no item “d” da seção 3.2. A Figura 4.10 apresenta a média dos valores obtidos de f_c no referido período, além de dados referentes ao intervalo de confiança, para o nível de confiança de 90%, calculados por meio da distribuição t-Student. Foi possível observar que os valores das f_{c10} obtidos em cada horário ao longo dos 30 dias possuem baixo desvio-padrão, sendo a média do coeficiente de variação (desvio-padrão dividido pela média) dos horários observados igual a 16%. Também se observou que sua distribuição possui comportamento bastante simétrico, a diferença média entre a média e a mediana das f_{c10} é quase nula. Dessa forma, adotando uma distribuição gaussiana, foi extraída a f_{c10} de cada horário, como ilustrado na Figura 4.10, e apresentado na Tabela 4.1.

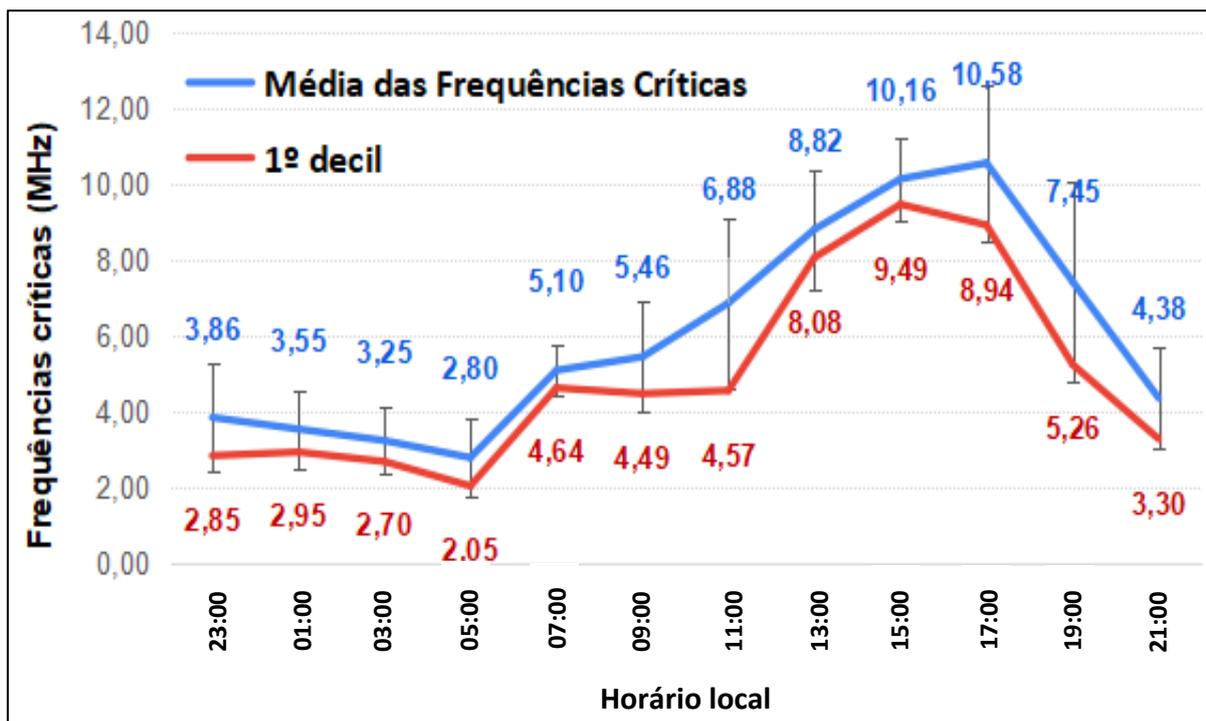


Figura 4.10 - Média das frequências críticas, intervalo de confiança para 90% da distribuição e o seu 1º decil (f_{c10}).

4.4. DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE FREQUÊNCIAS DO ALE PARA UTILIZAÇÃO NA CAMPANHA

Ao comparar os dados empíricos das f_{c10} com as FOT dos modelos de predição, é possível observar que, em vários horários, há f_{c10} abaixo das frequências previstas, Figura 4.11. Isso

sugere que, em alguns momentos, os modelos de predição podem estar sobrestimando a capacidade da ionosfera ou as condições nas quais a ionossonda realizou a sondagem representaram uma ionização abaixo da regular, sem descartar a possibilidade de anomalias, como o ESF.

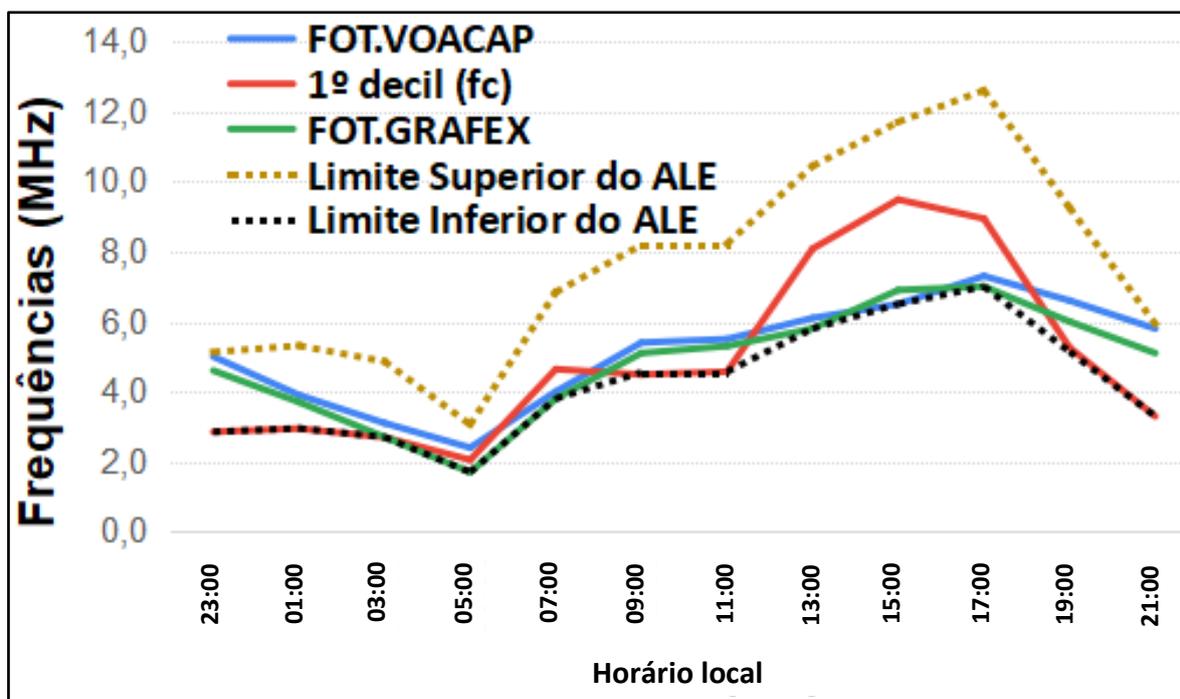


Figura 4.11 - FOT dos modelos de predição versus f_{c10} .

Logo, para abarcar tanto as frequências preditas como as f_{c10} e testar todas as frequências preditas dos modelos sob análise, o intervalo de frequências determinado para o ALE foi até o valor de 180% a partir da menor frequência observada entre todos os modelos, estando os limites indicados na Figura 4.11 por linhas tracejadas. Com base nesse intervalo, foram estipulados 5 valores de frequência para cada horário, do menor para o maior, igualmente espaçados, de forma que o tempo de teste fosse o mesmo para todos. Em síntese, para a campanha:

1. Foram obtidas as frequências dos modelos de predição recomendados pela ITU e pela SWS;
2. Foi calculada a f_{c10} com dados da ionossonda mais próxima disponível, visando a obter dados empíricos da ionosfera local;

3. Os valores obtidos nos passos 1 e 2 foram utilizados como limites, superior e inferior, para sondagem das frequências do ALE;
4. A diferença máxima observada entre as frequências foi de até 180%, a partir da menor frequência observada entre todos os modelos. Após definição dos limites inferiores e superiores, foram estipulados 5 valores de frequência para cada horário: 1; 1,2; 1,4; 1,6 e 1,8 da menor frequência. Dessa forma, em todos os horários, todos os modelos de predição e as f_{c10} foram englobados nos testes;
5. A cada duas horas, foram realizados três ciclos de testes das frequências determinadas no passo 4, após isso, os resultados foram consolidados para os mesmos horários de diferentes dias da campanha.

4.5. RMSE DOS CONJUNTOS DE FREQUÊNCIAS

Utilizando os dados da Tabela 3.1, foram obtidas todas as frequências e as SNR preditas de cada modelo, incluindo as frequências f_{c10} . Já a média das f_m , foi obtida através do procedimento exposto na seção 4.4, em que, a cada 2 horas, através dos testes empíricos da campanha de medição, foram observadas as melhores frequências avaliadas através dos escores da técnica ALE, em todos os dias da campanha, sendo realizados três ciclos de testes a cada duas horas. A próxima seção, 4.6, apresenta o intervalo de confiança dessa média calculado a partir da distribuição t-Student.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados das frequências preditas e a média das f_m por horário.

Tabela 4.1 - FOT do VOACAP, REC533, GRAFEX; f_{c10} e f_m

Hora (hora local)	A (MHz)	B (MHz)	C (MHz)	D (MHz)	E (MHz)
1	3,90	5,17	3,70	2,95	4,95
3	3,10	4,01	2,70	2,70	3,93
5	2,40	2,85	1,70	2,05	2,14
7	4,00	5,02	3,80	4,64	4,60
9	5,40	6,77	5,10	4,49	5,23
11	5,50	6,97	5,30	4,57	5,50

Hora (hora local)	A (MHz)	B (MHz)	C (MHz)	D (MHz)	E (MHz)
13	6,10	7,80	5,80	8,08	6,41
15	6,50	8,21	6,90	9,49	7,15
17	7,30	9,06	7,00	8,94	9,86
19	6,60	7,96	6,00	5,26	5,40
21	5,80	7,54	5,10	3,30	4,74
23	5,00	6,59	4,60	2,85	4,41

A, B e C: FOT obtidas no VOACAP, REC533 e GRAFEX, respectivamente, com dados da Tabela 3.1; **D:** Frequências f_{c10} obtidas conforme exposto na seção 4.3 e **E:** média das f_m , obtidas empiricamente, através dos escores da técnica ALE.

A Tabela 4.2 apresenta o erro médio quadrático por horário entre os conjuntos de frequências e a média das f_m , de acordo com a Equação 3.2.

Tabela 4.2 - RMSE entre as frequências previstas e a melhor frequência obtida empiricamente (Equação 3.2)

Hora (hora local)	RMSE por horário	RMSE por horário	RMSE por horário	RMSE por horário
	A vs E (MHz)	B vs E (MHz)	C vs E (MHz)	D vs E (MHz)
1	1,10	0,05	1,56	4,02
3	0,68	0,01	1,51	1,52
5	0,07	0,51	0,19	0,01
7	0,36	0,18	0,64	0,00
9	0,03	2,36	0,02	0,55
11	0,00	2,16	0,04	0,86
13	0,09	1,95	0,37	2,81
15	0,42	1,12	0,06	5,45
17	6,53	0,63	8,15	0,84
19	1,45	6,57	0,36	0,02
21	1,12	7,84	0,13	2,09
23	0,35	4,75	0,04	2,43
RMSE TOTAL	1,01	1,53	1,04	1,31

A, B, C, D e E definidos na Tabela 4.1.

Observa-se, a partir da Tabela 4.2, que o modelo de predição com o menor RMSE, comparado

à média das f_m , foi o proposto pelo VOACAP, com 1,01 MHz (A vs E). As FOT obtidas por meio do VOACAP apresentaram RMSE menor do que as FOT obtidas por meio do REC533 e do GRAFEX, e menor do que as f_{c10} . A aplicação de fato recomendada pela ITS para predições ponto a ponto, REC533, apresentou 1,53 MHz de desvio-padrão (B vs E).

Quanto às f_{c10} , houve uma forte aderência em todos os horários, RMSE menor que 1,08 MHz, com exceção do período vespertino, entre 11h00 e 15h00, RMSE maior que 1,7 MHz, o que indica que o modelo deve incorporar de forma mais precisa a atenuação da camada D, que atinge seu pico nesse período do dia, pois as f_{c10} aumentaram os seus valores, entre 11h00 e 15h00, mais rapidamente que as f_m , incrementando o erro médio e descolando-se da realidade empírica.

Sendo a FOT obtida por meio do VOACAP a que possui o menor erro médio quadrático, as próximas análises serão realizadas para esse conjunto de frequências comparado à média das f_m .

4.6. COMPARAÇÕES ENTRE FOT DO VOACAP E MÉDIA DAS f_m

Na Figura 4.12, observa-se a FOT do VOACAP e a média das f_m por horário, juntamente com o intervalo de confiança dessa média calculado a partir da distribuição t-Student, com nível de confiança de 90%. A diferença média entre esses dois conjuntos de frequências é 15%, sendo que, em 50% dos horários, a f_m está acima da FOT predita pelo VOACAP. Esses dados apontam que, embora a FOT do VOACAP tenha o menor RMSE, o operador, ao configurar o ALE, deve inserir outras frequências para aumentar a probabilidade de escolher aquela com maior SNR. Às 17h00, por exemplo, a diferença entre FOT e média das f_m estava acima de 2 MHz, o que parece ter reduzido sensivelmente os escores da técnica ALE no enlace, conforme será detalhado a seguir.

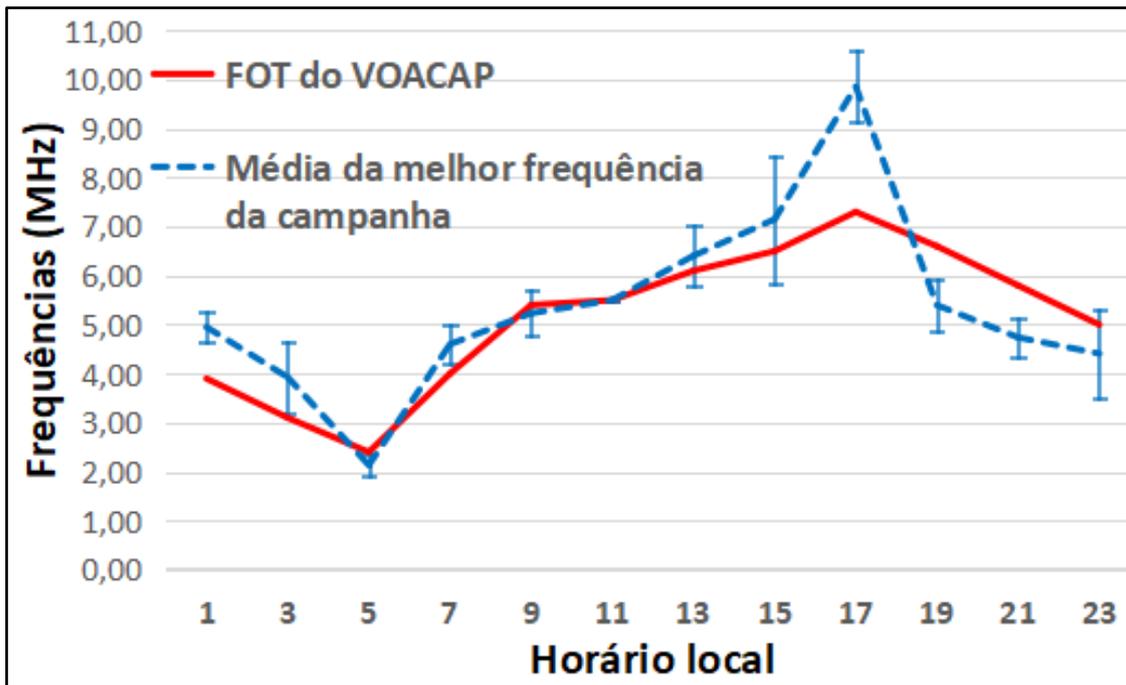


Figura 4.12 - FOT do VOACAP e a média da melhor frequência da campanha por horário.

Essa diferença média de 15% entre os conjuntos de frequências teve impacto significativo na SNR, sendo que, em alguns horários, houve impacto em mais de 8 dB. Esse impacto reflete na taxa de sucesso dos testes e, no caso de um enlace em operação, na sua disponibilidade e/ou na sua taxa de sucesso, traduzida como sua capacidade de garantir pelo menos uma SNR maior ou igual a 3 dB para viabilidade de comunicação em tempo real.

Conforme a Figura 4.13, somente em 33,33% dos horários, 01h00 e entre 05h00 e 09h00 AM, a média da SNR da FOT do VOACAP esteve acima de 3 dB, que consiste em limiar acima do qual exige-se o uso do modo de transmissão mais robusto do equipamento (*Mixed-Excitation Linear Prediction* - MELP 600), para que transmissões digitais HF em tempo real ainda possam ocorrer, mesmo que de forma precária. O MELP 600 é um tipo de transmissão de baixa *bitrate*, baixa qualidade de voz, mas passível de utilização com SNR muito baixa, comum às transmissões via ionosfera. Utilizando-se a média das f_m , a média da SNR está acima de 3 dB em 75% dos horários, com nível de confiança de 90%, de acordo com a distribuição t-Student, havendo maior degradação do sinal somente nos momentos em que a camada D está mais energizada (período vespertino), entre 11h00 e 15h00 AM, Figura 4.13. Ou seja, somente entre 01h00 e 09h00, foi possível obter uma SNR satisfatória (acima de 3 dB) utilizando a FOT predita pelo VOACAP.

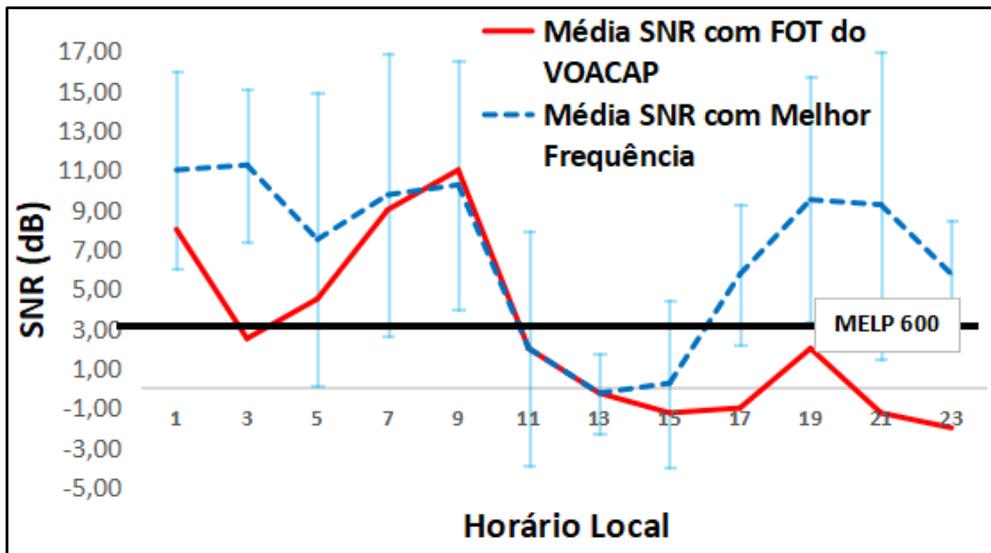


Figura 4.13 - SNR com a FOT do VOACAP e a SNR com a média das f_m .

Observa-se também, na Figura 4.13, que, somente em um horário, 09h00, obteve-se SNR melhor para a FOT do VOACAP que para a média das f_m , com uma diferença de apenas 0,75 dB, e dentro do intervalo de confiança das duas médias, para o nível de confiança de 90%, calculados por meio da distribuição t-Student.

Conforme exibido na Figura 4.14, isso pode ser justificado pelo fato de que os escores do ALE têm correlação com a SNR de 0,76, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,575, o que aponta que somente 57,5% da variação da SNR pode ser explicada pelos escores. Essa baixa correlação entre SNR e escores advém do fato de que a técnica ALE também leva em conta no seu sistema de pontuação *delay spread* e efeito Doppler.

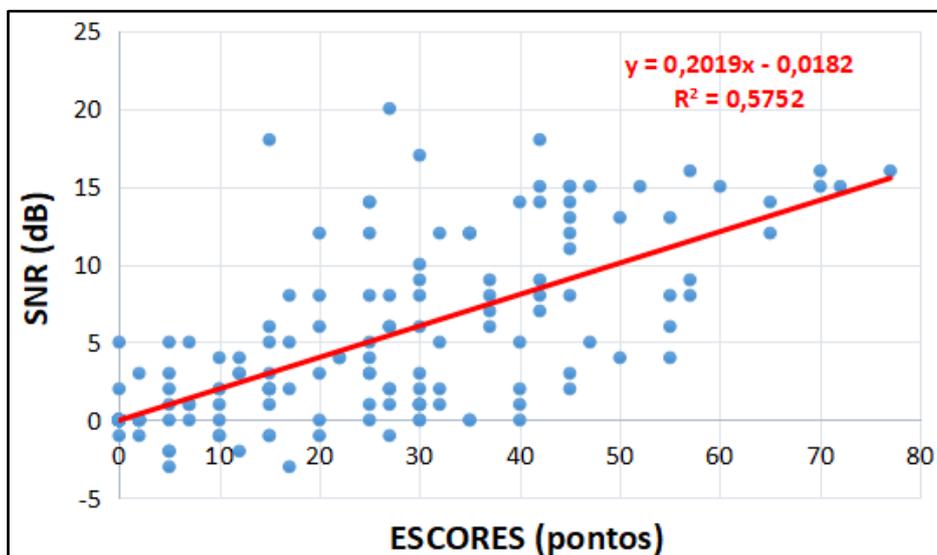


Figura 4.14 - Correlação entre SNR e escores da técnica ALE dos enlaces da campanha.

4.7. COMPORTAMENTO DA SNR NA PRESENÇA DO ESF

Quanto ao ESF, foi detectada a presença do fenômeno em 4 horários distintos ao longo dos dias de testes, com maior intensidade às 05h00 AM, no horário local. A Figura 4.15 apresenta os ionogramas dos dias 18 e 21 de fevereiro de 2020, às 05h00 AM, onde é possível visualizar a perturbação nas camadas da ionosfera, semelhante à Figura 2.10, devido ao ESF.

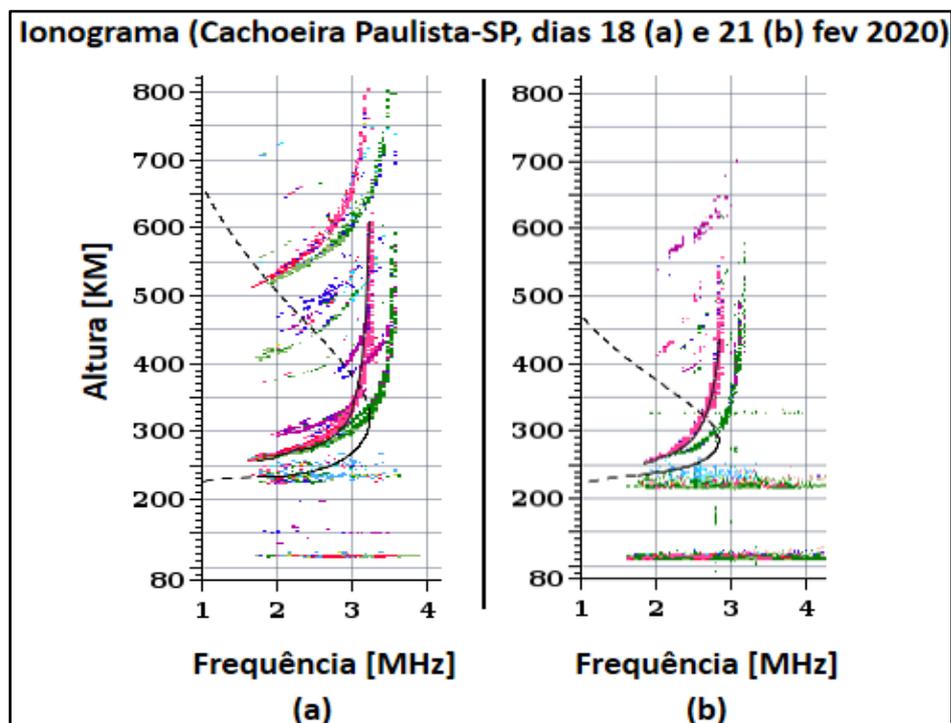


Figura 4.15 - ESF às 05h00 AM (local), nos dias 18 (a) e 21 (b) de fevereiro de 2020 [28].

Na Figura 4.16, é possível observar a média da SNR nos horários em que não houve o fenômeno (variável A) e a média da SNR nos horários em que houve (variável B), juntamente com o intervalo de confiança dessas médias, calculado pela distribuição t-Student e com nível de confiança de 90% para cada medida. Houve uma queda de 34,04% de SNR de A para B, o que demonstra o impacto da anomalia ESF nos enlaces.

De forma semelhante, na Figura 4.17, visualiza-se a média de escores do ALE nos horários em que não houve o fenômeno (variável C) e a média de escores nos horários em que houve (variável D), com os seus respectivos intervalos de confiança, de acordo com a distribuição t-Student e com nível de confiança de 90%. Para os escores, houve uma queda de 30,04% de C para D.

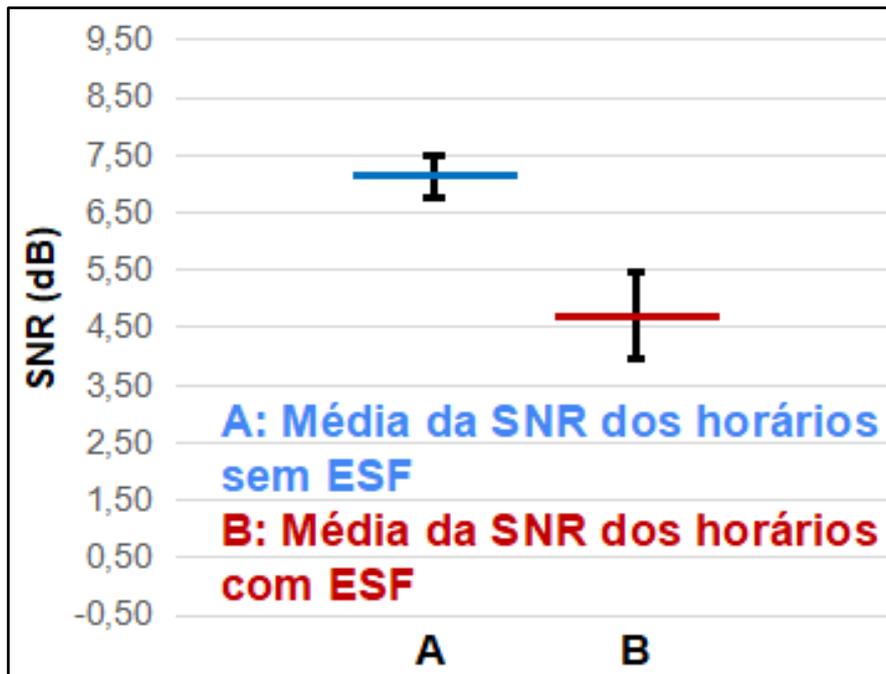


Figura 4.16 - Queda de 34,04% na média da SNR na presença de ESF.

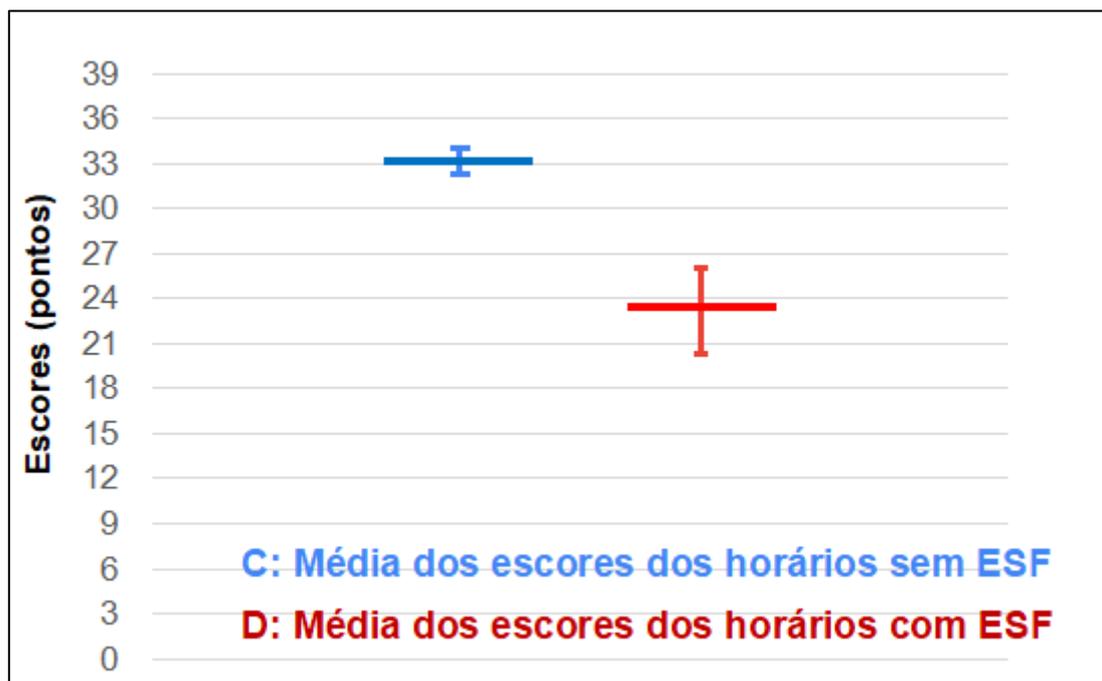


Figura 4.17 - Queda de 30,04% na média de escores de C para D.

Os horários em que o fenômeno foi detectado, 23h00; 01h00; 03h00 e 05h00, estão de acordo com o seu comportamento noturno descrito na literatura [16, 17]. Esse comportamento deve ser levado em consideração no planejamento de um sistema HF, pois esses sistemas já possuem, costumeiramente, uma SNR próxima de 0 [8]. Como medida prática para mitigar os impactos do ESF, sugere-se que o operador identifique na região do enlace os horários de ocorrência do

fenômeno através de ionogramas da ionossonda mais próxima disponível, evitando assim, enviar grandes fluxos de dados nos momentos em que o ESF se manifesta mais intensamente.

Embora o fenômeno reduza, em especial, a SNR em enlaces noturnos, esse horário, devido à redução da atenuação provocada pela camada D [12], ainda é o período do dia que possibilita observar os maiores valores de escores da técnica ALE. A Figura 4.18 apresenta o somatório de escores e de SNR, consolidados a cada duas horas, observados ao longo da campanha de medições, para todos os dias. Percebe-se claramente a queda de escores e de SNR à medida que a camada D torna-se mais energizada, entre 11h00 e 17h00, e a recuperação desses valores até o pico por volta de 01h00. Esse comportamento se repete com ou sem a presença de ESF, o período vespertino sempre é pior que o período noturno.

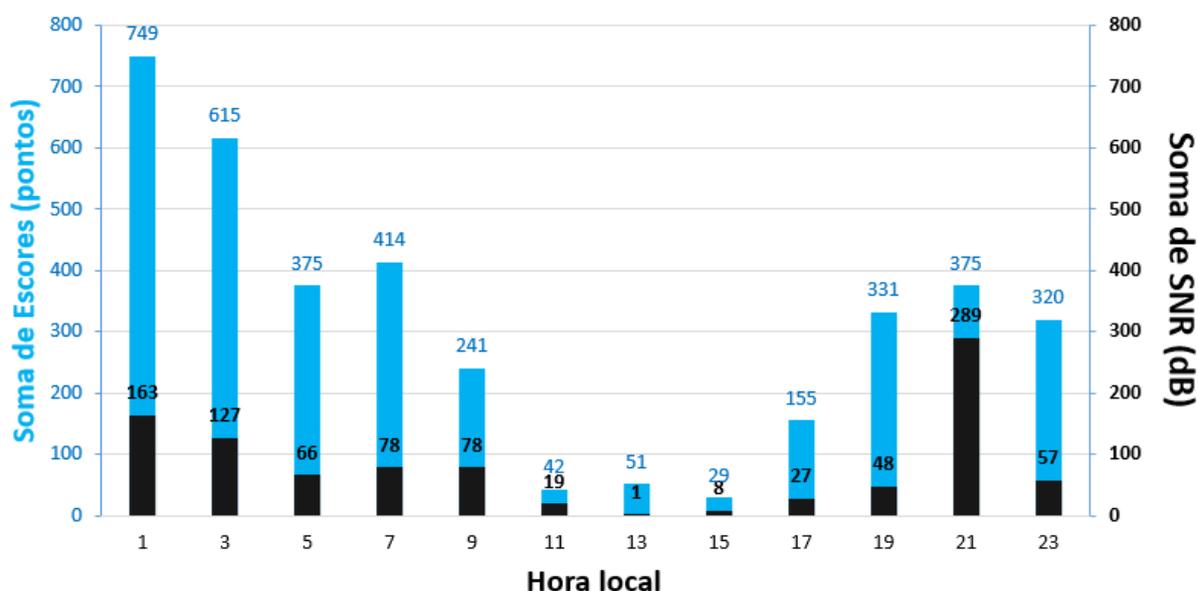


Figura 4.18 - Somatório de escores e de SNR para todos os dias de campanha.

Ressalta-se que, com a crescente utilização do HF para comunicação em territórios isolados [2], seriam necessárias mais ionossondas no Brasil para apoiar no planejamento de sistemas de comunicação, pois, no momento desta campanha (fevereiro de 2020), só havia 6 ionossondas disponíveis para consulta em todo o território nacional [28].

4.8. PROCEDIMENTO DE ESCOLHA DE FREQUÊNCIAS PARA O ALE E OUTRAS MEDIDAS

Conforme exibido na Figura 4.13, a escolha incorreta do conjunto de frequências pode levar a vários momentos de SNR abaixo do mínimo necessário para um enlace de qualidade, como ocorreu entre 11h00 e 23h00 para a FOT predita pelo VOACAP. Ao mesmo tempo, utilizar muitas frequências para testes no ALE pode aumentar o tempo necessário para se estabelecerem enlaces, tornando esse processo uma etapa dispendiosa.

A partir dos resultados obtidos, recomenda-se o seguinte procedimento a ser adotado tanto em campanhas de medição quanto para a operação de sistemas de comunicação em HF, com o objetivo de obter percentual de sucesso no estabelecimento da comunicação superior ao que seria obtido com o emprego apenas da FOT fornecida pelos aplicativos disponíveis:

1. Preencher, no VOACAP, as coordenadas das estações, mês e ano em que serão realizados os enlaces;
2. Obter o SSN, conforme base de dados do VOACAP [51];
3. Extrair a FOT do VOACAP com os resultados de 1) e 2);
4. Identificar na região do enlace os horários de ocorrência do fenômeno ESF através de ionogramas da ionosonda mais próxima disponível, evitando-se transmitir nesses horários;
5. Verificar a presença de tempestades magnéticas através de institutos de referência [36]. Em caso positivo, optar por modos de transmissão do equipamento de baixo *bitrate*;
6. Utilizando os valores preditos da FOT em cada horário do mês selecionado para enlace, obter as frequências correspondentes entre 80% e 200% da FOT, no total de 5 valores. Esse intervalo compreende todos os valores encontrados na campanha entre a FOT do VOACAP e a melhor frequência da campanha; e
7. Adotar essas frequências para configuração do ALE. Baseando-se no VOACAP, os grupos de frequência terão validade de 2 horas e deverão ser trocados a cada mês [48].

Caso não seja possível utilizar o ALE e as frequências sejam trocadas manualmente pelo

operador, sugere-se usar valores entre 85% e 115% da FOT. Esses valores estão sendo sugeridos com base na observação dos valores mais frequentes da diferença entre a FOT sugerida pelo VOACAP e a média das frequências f_m .

O procedimento citado permitiu obter pelo menos 70% de sucesso no estabelecimento de comunicação em HF no modo MELP, que exige uma SNR superior ou igual a 3 dB, contra 33% de sucesso utilizando a FOT do VOACAP.

Ressalta-se que os resultados encontrados se referem a esta campanha de medição, em uma região e época do ano específicas, sendo possível encontrar erro médio quadrático maior em condições diversas das testadas [19, 21].

4.9. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou todos os resultados deste trabalho. As principais conclusões de cada seção estão sintetizadas abaixo.

Na seção 4.1, foi observado que o usuário dos *softwares* de predição deve verificar o arquivo de ganho, em dBi, da antena a ser utilizada. Pois, a depender do tipo de enlace, haverá diferentes ganhos em diferentes ângulos de radiação. O valor de $0,2 \lambda$ apresentou-se como a altura ótima para o diagrama da antena utilizada nesta campanha. Na seção 4.2, foi possível observar que os modelos VOACAP e REC533 apresentam os seus resultados de forma semelhante, porém, o REC533 tende a sobre-estimar as FOT e a subestimar as SNR preditas para enlaces de mesma localização geográfica. Já o GRAFEX apresenta frequências mais semelhantes ao VOACAP que ao REC533.

Na seção 4.3, foi exibido um modelo adicional de predição de frequências, baseado na ionosfera local. Embora esse modelo tenha tido boa aderência à média das f_m em certos horários, no período vespertino, o RMSE aumentou acentuadamente, o que revela a necessidade de revisão do modelo para esse horário.

A seção 4.5 trouxe o erro médio quadrático por horário entre os conjuntos de frequências e a média das f_m , o que apontou que o VOACAP foi o modelo com menor RMSE. E, de forma surpreendente, o modelo com maior erro médio foi o recomendado pela ITU-R F.1148-1, o REC533.

Na seção 4.6, foram analisadas detalhadamente as diferenças, em termos de SNR e de disponibilidade do sistema, entre a FOT do VOACAP e a média das f_m . Embora a diferença média entre os dois os conjuntos de frequências tenha sido a menor encontrada entre os modelos sob análise, na avaliação geral de disponibilidade do sistema, ficou claramente evidenciado que várias frequências devem ser utilizadas no ALE, já que a média das f_m apresentou uma disponibilidade de mais de 74% contra apenas 33,33% pela FOT do VOACAP.

A seção 4.7 trouxe a análise da degradação da SNR devido ao fenômeno do ESF, onde foi possível verificar uma queda de mais de 30% da Razão Sinal-Ruído nos momentos de sua presença. Os horários em que o fenômeno foi detectado estão de acordo com o seu comportamento noturno descrito na literatura. Ressalta-se que embora o fenômeno tenha maior presença durante a noite, nesse horário, o nível de atenuação pela camada D é reduzido, o que favorece os enlaces. Em termos gerais, embora o ESF provoque redução da SNR, os enlaces noturnos ainda têm maior SNR que os enlaces diurnos, com ou sem ESF.

Por fim, visando a atender ao objetivo principal deste trabalho, que é a obtenção de frequências adequadas para enlaces entre transceptores móveis, foi detalhado, na seção 4.8, um procedimento para determinação das frequências a serem utilizadas no ALE, assim como, medidas adicionais que podem ser tomadas para aumentar a disponibilidade do sistema, como utilizar corretamente o *software* de predição e verificar a ocorrência de ESF, através dos ionogramas da região, e de tempestades magnéticas.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como um de seus objetivos avaliar comparativamente com dados empíricos os modelos de predição disponibilizados e recomendados pelo ITS e pelo SWS, para a predição de valores de SNR e de FOT para enlaces de HF via ionosfera, para emprego em sistemas que utilizam a técnica ALE. Como segundo objetivo deste trabalho, foi ainda avaliado de forma empírica o impacto do fenômeno ESF na SNR desses enlaces. Por fim, o último objetivo foi apresentar um método para definição das frequências de transmissão a serem empregadas pela técnica ALE, de forma a obter maior disponibilidade do enlace em HF.

Por meio de campanha de medição, foi possível avaliar o desvio entre a FOT predita pelos modelos de referência da literatura e a melhor frequência de operação determinada empiricamente, o que permitiu identificar o modelo de predição VOACAP como o que melhor se adequou à situação estudada, em território brasileiro. Além disso, nos estudos comparativos, ficou evidenciado que o REC533 tende a sobre-estimar as FOT e a subestimar as SNR preditas para enlaces de mesma localização geográfica. Já o GRAFEX apresenta frequências mais semelhantes ao VOACAP que ao REC533. Uma contribuição relevante do GRAFEX é a frequência no limiar para absorção, ALF, que no VOACAP é indicada como a LUF e, como já citado no capítulo 2, é reconhecida pelos autores do *software* como de baixa confiabilidade. Alternativamente, o VOACAP pode ser utilizado para predição de FOT e de SNR, mas a LUF pode ser substituída pela ALF nos planejamentos de sistemas em HF.

Também foi evidenciado, pelos dados coletados, que a FOT tende a apresentar maior disponibilidade que a MUF, sendo então mais indicada para uso no ALE. Em alguns horários, por exemplo, a SNR do enlace, utilizando as duas frequências, pode divergir em mais de 10 dB-Hz.

Com relação ao fenômeno ESF, verificou-se na prática o seu efeito na degradação da SNR, tendo sido observada uma diminuição de mais de 34% de seu valor médio no enlace estudado. Espera-se que o impacto desse fenômeno seja ainda maior, caso o enlace seja implantado em regiões de menor latitude [22]. Esse trabalho demonstrou ainda a importância da existência de ionossondas na região em que se instala um enlace em HF, que permita a identificação com maior precisão do fenômeno ESF, de forma a apoiar o operador do enlace em suas tomadas de decisão.

Foi possível verificar que o sistema de escores do ALE não possui uma correlação com a SNR muito elevada, o que pode levar o operador a escolher frequências que levarão a desempenho inferior, se forem empregados apenas os escores como critério principal de planejamento. Porém, constata-se que o ALE é de grande valia, pois permitiu melhorar, através do procedimento citado na seção 4.8, a taxa de sucesso do sistema HF, realizando sondagens de frequências de trabalho por vezes muito distintas das previstas pelas aplicações VOACAP, REC533 ou GRAFEX. A proposta de procedimento apresentada no artigo permite estabelecer o intervalo de frequências a ser utilizado em rádios que empregam ALE, com taxa de sucesso esperada superior ao que seria obtido com o uso de informações de escores de desempenho fornecidos pelas ferramentas convencionais.

Observou-se também que a média da SNR no tipo de enlace averiguado, utilizando as frequências dos modelos de predição, mesmo sem ESF, é costumeiramente baixa: para o nível de significância de 5%, medido pela distribuição t-Student, o valor máximo de SNR encontrado foi de 7,56 dB, o que evidencia que alguns serviços, como transmissão de dados acima de 10 kbps, ou voz de alta qualidade, talvez não estejam disponíveis a maior parte do tempo, com exceção de enlaces em distâncias reduzidas. E reforça mais ainda a necessidade de se utilizar a melhor frequência disponível para cada enlace, de forma a não haver perdas desnecessárias.

5.1. PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTE TRABALHO

Este trabalho deu origem a um artigo que foi aceito para publicação no XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2020) com o título “Análise e Verificação Empírica de Modelos de Predição para Comunicação em HF em Regiões de Baixa Latitude”.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Apesar de os resultados desse trabalho serem conclusivos e recomendativos quanto à necessidade de ajustes nos modelos de predição adotados na literatura em enlaces de HF via ionosfera instalados no Brasil, para que esses ajustes possam ser padronizados, torna-se necessária ainda a realização de campanhas de medição em outras regiões do território nacional,

em especial aquelas de baixa latitude, bem como a extensão do estudo em outras estações do ano e ao longo de anos de observação, conforme se observa de outros estudos divulgados na literatura [20, 21, e 22].

Apesar de o modelo baseado nas f_{c10} tenha tido baixo RMSE em alguns horários, no período vespertino, o erro médio aumentou acentuadamente, o que revela a necessidade de revisão do modelo para esse horário, com a produção de estudos mais amplos, envolvendo por exemplo, a capacidade de atenuação da Camada D.

Também podem ser realizados novos trabalhos visando a identificar outras anomalias e a periodicidade de fenômenos que possam acometer o canal HF, com foco naqueles que possuem grande impacto na ionosfera brasileira, avaliando, de forma semelhante a como foi realizado neste trabalho, o nível de degradação da SNR em enlaces entre transceptores móveis ou fixos.

Uma abordagem descritiva completa das frequências críticas das camadas da ionosfera também poderia ser tema de novos trabalhos, identificando, por exemplo, a média, desvio-padrão, coeficiente de variação e outras métricas. A base de dados fornecerá subsídios para a tomada de decisão do planejador desse tipo de sistema, identificando com melhor precisão as particularidades da ionosfera no Brasil, pois complementarará com dados empíricos os resultados dos modelos já existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OBREJA, R. Does Shortwave Have a Future? Radioworld. [Online]. Disponível em: <<https://www.radioworld.com>>.
- [2] ISA (Instituto Socioambiental). Diagnóstico da Efetividade do Fundo Kayapó na Melhoria da Qualidade de Vida do Povo Kayapó na Gestão e Integridade de seus Territórios. São Paulo, SP, pp. 181, Março, 2019.
- [3] TERRAS INDÍGENAS. Informações gerais sobre Terras Indígenas no Brasil. [Online]. Disponível em: <<https://terrasindigenas.org.br/pt-br/brasil>>.
- [4] ISA (Instituto Socioambiental). Colabore com a expansão da radiofonia na Terra Indígena Yanomami.. [Online]. Disponível em: <<https://www.socioambiental.org/pt-br/noticias-socioambientais/colabore-com-a-expansao-da-radiofonia-na-terra-indigena-yanomami>>.
- [5] BRASIL. Portaria n° 302. Ministério da Integração Nacional. Outubro, 2001.
- [6] _____. Portaria n° 1.212. Ministério da Defesa. Agosto, 2018.
- [7] ALEM, R. M. Análise e Projeto de Antenas para Sistemas de Comunicações Táticas Pessoais em Florestas, Tese de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [8] CANNON P. S et al. Damson HF channel characterisation-a review, MILCOM 2000 Proceedings. 21st Century Military Communications. Architectures and Technologies for Information Superiority. (Cat. No.00CH37155), Los Angeles, CA, 2000, pp. 59-64 vol.1.
- [9] ITU (International Telecommunication Union). Recommendation ITU-R F.1487. Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators. ITU Radiocommunication Study Group, Geneva, Switzerland, Maio, 2000.
- [10] P. ELIARDSSON, E. AXELL, P. STENUMGAARD, K. WIKLUNDH, B. JOHANSSON. Military HF Communications Considering Unintentional Platform-Generated Electromagnetic Interference, 2015 International C. on Military C. and Information Systems (ICMCIS), Cracow, 2015, pp.1-6.
- [11] U.S. DOD (U.S. Department of Defense). Interface Standard. MIL-STD-188-110C. Interoperability and Performance Standards for Data Modems. Oklahoma, 2011.
- [12] DAVIES, K. Ionospheric Radio Propagation. U.S. Department of Commerce. U.S. Government. Dover Publications, 1966.
- [13] GUEST P. S., GUEST A. A. Validation of the Voice of America Coverage Analysis Program (VOACAP). Naval Postgraduate School. Monterey, California. Fev., 2013.
- [14] ITU (International Telecommunication Union). Recommendation ITU-R P.533-14. ITU R. Study Group, Geneva, Switzerland, Agosto, 2019.
- [15] SWS (Space Weather Services). Prediction Tools [Online]. Disponível em: <http://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems/7/1>.
- [16] PILLAT, V.; FAGUNDES, P.; GUIMARÃES, L. Automatically identification of Equatorial Spread-F occurrence on ionograms. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Outubro, 2015.

- [17] MOOR, L. P.; De JESUS, R. Estudo de Ocorrência de Spread-F ao Longo do Meridiano Magnético durante o Mínimo Solar (Ciclo 23). X Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos, SP. Outubro, 2006.
- [18] DUTONO T. et al. A Spots Independent for NVIS Channels Observation, 2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), Bali, 2018, pp. 229-233.
- [19] M. AHMAD; I. RASHID; N. AHMAD, Validation of MUF and FOT parameters for plain, mountainous and sea region, International C. on Information and Communication Technologies (ICICT), Karachi, 2015, pp.1-6.
- [20] J. STOCKER; M. MURIUKI; E. M. WARRINGTON. Comparison of oblique sounding measurements and VOACAP predictions on a mid-latitude path, The Institution of Engineering and Technology 11th I. Conference on Ionospheric radio Systems and Techniques (IRST 2009), Edinburgh, 2009, pp. 1-4.
- [21] ATHIENO R.; P. T. JAYACHANDRAN; D. R. THEMENS; D. W. DANSKIN, Comparison of observed and predicted MUF(3000)F2 in the polar cap region, in Radio Science, vol. 50, no. 6, pp. 509-517, Junho, 2015.
- [22] MCNAMARA, L. F.; R. J. BARTON; T. W. BULLETT. Analysis of HF signal power observations on two North American circuits, in Radio Science, vol. 41, no. 05, pp. 1-17, Outubro, 2006.
- [23] ALLEN, Jeffery et al. Mid-Latitude Mobile Wideband HF-NVIS Channel Analysis: Part 1. SSC Pacific. San Diego, California, 2017.
- [24] J. WALRAND e P. P. VARAIYA, High-performance communication networks. Morgan Kaufmann Pub, 2000.
- [25] RAPPAPORT, Theodore S. 2002. Wireless communications: principles and practice. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR
- [26] DOLUKHANOV, M. Propagation of Radio Waves. Mir Publishers, Moscou, 1971.
- [27] SILVA, M. F. Técnicas de Estimação de Canal para Sistemas OFDM em Canais HF Baseadas no Arranjo Comb-Type de Subportadoras Piloto. UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2012.
- [28] GIRO (Global Ionosphere Radio Observatory). [Online]. Disponível em: <<http://giro.uml.edu>>.
- [29] ETSI (EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE). Digital Radio Mondiale (DRM). System Specification. ETSI ES 201 980 V4.1.2, abril 2017
- [30] REINISCH, B. Digisonde 4D Portable Sounder Technical Manual. v. 1.2.6. Lowell, 2009.
- [31] WIVLET, B. A. et al. Near Vertical Incidence Skywave Propagation: Elevation Angles and Optimum Antenna Height for Horizontal Dipole Antennas. IEEE Antennas and Propagation Magazine, v. 57, nº 1, fev. 2015.
- [32] PIGGOTT, W. R.; RAWER, K. (Karl). U.R.S.I. handbook of ionogram interpretation and reduction. International Union of Radio Science; United States, Environmental Data Service. Report UAG ; 23A, 1978.

- [33] DIGISONDE Directogram. Ulcar (University of Mass Lowell) . [Online]. Disponível em: <<https://ulcar.uml.edu/directograms.html>>.
- [34] MATSUOKA, M. T. et. al. Impact of Geomagnetic Storm in the Ionosphere and GNSS Positioning: Study of case for November 20, 2003 in Brazilian region. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 19, no 1, p.14-33, jan-mar, 2013.
- [35] GUYER, S.; CAN Z. Solar Flare Effects on the Ionosphere. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Istanbul, Turquia. Junho, 2013
- [36] SWPC (Space Weather Prediction Center). Planetary K-Index. [Online]. Disponível em: <<https://www.swpc.noaa.gov>>.
- [37] HARDEN, P. Solar activity and HF propagation. FDIM Symposium. Dayton, 2005.
- [38] ZOLESI B.; CANDLER L. R. Ionospheric Prediction and Forecasting. Springer Geophysics. Roma, 2014.
- [39] MOOR, L. P.; De JESUS, R.; PILLAT, V. G.; FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y. Estudo de ocorrência de Spread-F ao Longo do Meridiano Magnético durante o Mínimo Solar (Ciclo 23). Universidade do Vale do Paraíba/IP&D. São José dos Campos, SP, Brasil.
- [40] EQUATORIAL Spread F Modeling. NRL (Naval Research Laboratory). [Online]. Disponível em: <<https://www.nrl.navy.mil/ppd/equatorial-spread>>.
- [41] WOODMAN, R. F. Spread F – an old equatorial aeronomy problem finally resolved? Ann. Geophys., 27, 1915–1934, Lima, 2009.
- [42] BERTONI, F.C.P. Equatorial spread-F occurrence observed at two near equatorial stations. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics. Vol. 73. Issue 4. 2011.
- [43] ITU (International Telecommunication Union). Recommendation ITU-R P.373-7. Definitions of Maximum and Minimum Transmission Frequencies. ITU Radiocommunication Study Group. Genebra, 1995
- [44] EARTH Curve Calculator. [Online]. Disponível em: <<https://dizzib.github.io/earth/curve-calc/?d0=10&h0=1.8&unit=metric>>.
- [45] ASSIS, Mauro S.; FILHO, Rafael C. Pinto. Measurements of the electrical characteristics of vegetation in a dense jungle. Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Julho, 2010.
- [46] ITU (International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.368-9. Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz. ITU Radiocommunication Study Group, Geneva, Fev 2007.
- [47] MARTIN, D. F.; MARTYN, R. O. and GREEN A. L., Long-distance observations of radio waves of medium frequencies. Proc. Phys. Soc., vol. 47.2, pp. 323–340, Março, 1935.

- [48] NEAR-REAL-TIME MUF Map. Space Weather. [Online]. Disponível em: <<http://www.spacew.com/www/realtime.php>>.
- [49] HIGH Frequency Propagation Models. ITS. [Online]. Disponível em: <<https://www.its.bldrdoc.gov/resources/radio-propagation-software/high-frequency/high-frequency-propagation-models.aspx>>.
- [50] ITU (International Telecommunication Union). Recommendation ITU-R F.1148-1. Standardized Procedure for Comparing Predicted and Observed HF Sky-Wave Signal Intensities ITU Radiocommunication Study Group, Geneva, Maio, 1997.
- [51] VOACAP Quick Guide. VOACAP. [Online]. Disponível em: <<https://www.voacap.com/index.html>>.
- [52] T. LOMBRY. Review of HF propagation analysis e prediction programs. [Online]. Disponível em: <<http://www.astrosurf.com/luxorion/qs1-review-propagation-software.htm>>.
- [53] EXCERPTS from Original ICEPAC User's Manual .VOACAP [Online]. Disponível em: <<https://www.voacap.com/itshfbc-help/icepac-tech-manual.html>>.
- [54] T Index FAQ. Space Weather Services. [Online]. Disponível em: <<https://www.sws.bom.gov.au/Educational/5/2/1/>>.
- [55] ALE (Automatic Link Establishment), 2G ALE. [Online]. Hoka. Disponível em: <http://www.hoka.it/oldweb/th/TH_ALE.pdf>.
- [56] U.S. DOD (U.S. Department of Defense). MIL-STD-188-141B_NOTICE-1. Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio Equipment. Agosto, 2001.
- [57] ITU (International Telecommunication Union). Frequency-adaptive communication systems and networks in the MF/HF bands. Geneva, 2002.
- [58] GILLESPIE, A. F. HF ALE – 2G, 3G and Wideband: Some System Integration Perspectives. HFIA (High Frequency Industry Association). Thales UK. Setembro, 2015.
- [59] SWS (Space Weather Services). Ionospheric Map. [Online]. Disponível em: <https://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems/6/5/>.
- [60] SPACE Weather Archive. Kp index for Feb 2020. [Online]. Disponível em: <<https://www.spaceweatherlive.com/en/archive/2020/02/>>.
- [61] JOHNSON, R. C. Antenna Engineering Handbook. 3rd ed. McGraw-Hill. NEW YORK, 1993.
- [62] BURKE, G. J. et al., Computer modeling of antennas near the ground. Electromagnetics, vol. 1, no. 1, pp. 29–49, Jan. 1981.
- [63] SWS (Space Weather Services). Understanding Grafex Frequency Predictions. [Online]. <http://www.sws.bom.gov.au/Category/HF%20Systems/Online%20Tools/Prediction%20Tools/GRAFEX/grafex.html#gfx_mode>.