



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS

Cap Com ANTONIO ANDERSON SILVA MARQUES

**ANÁLISE DE ANOMALIAS IONOSFÉRICAS NO PLANEJAMENTO DE
SISTEMAS TÁTICOS DIGITAIS NA FAIXA HF**

**Rio de Janeiro
2021**



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS

Cap Com ANTONIO ANDERSON SILVA MARQUES

**ANÁLISE DE ANOMALIAS IONOSFÉRICAS NO PLANEJAMENTO DE
SISTEMAS TÁTICOS DIGITAIS NA FAIXA HF**

Trabalho acadêmico apresentado à Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, como requisito para a especialização em Ciências Militares com ênfase em Gestão Operacional.

**Rio de Janeiro
2021**



**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DECEx - DESMil
ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS (EsAO/1919)
DIVISÃO DE ENSINO / SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
FOLHA DE APROVAÇÃO**

Autor: **Cap Com ANTONIO ANDERSON SILVA MARQUES**

Título: **ANÁLISE DE ANOMALIAS IONOSFÉRICAS NO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS TÁTICOS DIGITAIS NA FAIXA HF.**

Trabalho Acadêmico, apresentado à Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, como requisito parcial para a obtenção da especialização em Ciências Militares, com ênfase em Gestão Operacional, pós-graduação universitária lato sensu.

APROVADO EM _____ / _____ / _____ CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

Membro	Menção Atribuída
CARLOS ANDRÉ DOS SANTOS MEIRELLES DE ANDRADE – Maj Cmt Curso e Presidente da Comissão	
IVO LEANDRO BOTELHO LIMA – Cap 1º Membro e Orientador	
ROGÉRIO GOMES BARBOSA JUNIOR – Cap 2º Membro	

ANTONIO ANDERSON SILVA MARQUES – Cap
Aluno

AGRADECIMENTOS

Aos instrutores da Casa do Capitão.

Aos meus amigos de longa data.

À minha família indissolúta.

RESUMO

Diversas técnicas e equipamentos foram desenvolvidos ao longo dos últimos 40 anos para lidar com as complexidades das transmissões em HF, porém, o canal de transmissão via ionosfera ainda está sujeito a vários fenômenos e anomalias de difícil previsão. Este trabalho teve como objetivo observar quais anomalias ionosféricas possuem impacto no planejamento e no emprego de sistemas digitais na faixa de radiofrequência HF para uso militar, que se estendem desde as comunicações de Subunidades até Grandes Comandos. Ao analisar esses fenômenos, foi possível identificar formas de lidar com suas peculiaridades e quais as suas consequências nas operações militares. Também foi analisado se o material disponibilizado na literatura militar aborda a complexidade de enlaces reais via ionosfera, e possíveis procedimentos que o planejador de sistemas em HF deve realizar, levando em conta os equipamentos disponíveis adquiridos pelo Exército Brasileiro e as faixas de frequências reguladas pela Agência Nacional de Telecomunicações disponibilizadas para uso da Força Terrestre.

Palavras-chave: Perturbação Ionosférica. Radiofrequência. Propagação Rádio. Transmissões Militares.

ABSTRACT

Several techniques and equipment have been developed over the last 40 years to deal with the complexities of HF transmissions, however, the transmission channel via the ionosphere is still subject to several phenomena and anomalies that are difficult to predict. This work aimed to observe which ionospheric anomalies have an impact on the planning and use of digital systems in the HF radio frequency band for military use, which extend from Subunit communications to Grand Commands. By analyzing these phenomena, it was possible to identify ways to deal with their peculiarities and what are their consequences in military operations. It was also analyzed whether the material available in the military literature addresses the complexity of real links via the ionosphere, and possible procedures that the HF systems planner must perform, considering the available equipment acquired by the Brazilian Army and the frequency bands regulated by the National Agency of Telecommunications made available for use by the Ground Force.

Keywords: Ionospheric disturbance. Radiofrequency. Radio Propagation. Military transmissions.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	PROBLEMA	9
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	Objetivo Geral	10
1.2.2	Objetivos Específicos	10
1.3	QUESTÕES DE ESTUDO	10
1.4	METODOLOGIA	11
1.4.1	Objeto Formal de Estudo	12
1.4.2	Procedimentos para Revisão da Literatura	12
1.4.3	Instrumentos de Pesquisa	13
1.5	JUSTIFICATIVA	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	CARACTERÍSTICAS DA IONOSFERA	16
2.1.1	Frequências críticas e máximas de transmissão	17
2.1.2	Softwares de predição de enlace	20
2.2	ALTERAÇÕES E ANOMALIAS NA IONOSFERA	24
2.2.1	Irradiações Solares	24
2.2.2	Anomalias Ionosféricas	24
2.2.3	ESF	25
2.3	O CANAL HF EM REPOSITÓRIOS MILITARES	26
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
3.1	RESULTADOS DOS FORMULÁRIOS	29
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES	38
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

A utilização de rádios transmissores em Alta Frequência (*High Frequency* – HF) possui uma ampla aplicabilidade em sistemas de comunicações militares. Em particular para o Exército Brasileiro (EB), há diversas situações operacionais e táticas em que esse tipo de transmissão pode ser empregada, como as comunicações em ambiente de selva na Amazônia ou para transmissões entre Grandes Unidades (GU) em situações de contingência.

AGARD (1990) aponta que a ionosfera é uma região da atmosfera terrestre que possui íons livres em quantidade suficiente para alterar as propriedades de ondas eletromagnéticas, que são a forma a qual os transceptores de rádio em HF transmitem as suas informações. Entretanto AGARD (1990) elucida que a densidade de íons, e a sua dispersão no espaço, pode sofrer elevadas variações de acordo com o horário do dia, estação do ano e região geográfica, especialmente nas latitudes equatoriais – que é uma região de forte interesse para o Exército Brasileiro –, havendo inclusive anomalias e fenômenos típicos nessas localidades.

Mayor (2016) cita que há três tipos mais comuns de propagação para as transmissões em HF que podem sensibilizar um receptor: as ondas diretas, que radiam diretamente do transmissor para o receptor através do espaço (seja esse espaço ionizado ou não); as ondas terrestres, que radiam acompanhando as diversas peculiaridades de cada terreno (como presença de vegetação, grau de condutibilidade, de umidade e presença de obstáculos naturais e artificiais) e as ondas ionosféricas, que refletem nas camadas da ionosfera e retornam para o solo. Essa última forma de propagação em particular, apesar de sua complexidade e de sua disponibilidade limitada, possui a qualidade de poder propiciar o maior alcance para um enlace de comunicações em HF.

Elementos receptores situados além do limite do alcance das ondas diretas e terrestres terão que contar com o sinal advindo da ionosfera, porém, essas ondas terão características próprias de acordo com o nível de energia (em especial energia proveniente da irradiação solar) presente na ionosfera, de forma que esse sinal pode percorrer múltiplos percursos até retornar ao solo

novamente. O limite entre o alcance das ondas diretas e o das ondas ionosféricas compreende uma “zona de silêncio”, em que elementos importantes de uma tropa podem estar sem comunicação (MARQUES, 2020).

Amendola (2003) aponta que estudos da ITU (*International Telecommunication Union*) conseguiram determinar de forma satisfatória a confiabilidade de enlaces ionosféricos entre 2 e 30 MHz, sendo tal procedimento detalhado na Recomendação ITU-R P.533-14 (ITU, 2019).

Além dos estudos direcionados para a peculiaridades da ionosfera, faz-se necessário analisar mais detalhadamente os equipamentos já adquiridos pelas EB para as transmissões em HF, tendo em vista que os tipos de rádios e de antenas empregados modificam a forma que a radiação incidirá sobre a ionosfera, alterando o potencial de ganho e a eficácia da transmissão.

1.1 PROBLEMA

Enlaces em HF são empregados em comunicações estratégicas (Sistema Estratégico de Comunicações – SEC) e táticas (Sistema Tático de Comunicações – SISTAC) militares brasileiras. No contexto estratégico, transmissores fixos em HF são os meios de transmissão da Rede Rádio Fixa (RRF) do EB.

Sistemas em HF também são utilizados para comunicações táticas, por operadores móveis, que necessitam estabelecer enlaces em regiões remotas, com poucas estruturas fixas, ou em situações que não há tempo hábil para o apontamento de enlaces de micro-ondas, que necessitam azimute e linha de visada direta (ALEM, 2001).

Dessa forma, o planejador de sistemas em HF deve compreender o comportamento típico da ionosfera, com suas sazonalidades específicas mensais e anuais, e incorporar em sua análise a observação de fenômenos típicos da região onde o enlace será estabelecido, como o nível de ruído local e as anomalias periódicas que possam vir a prejudicar o enlace.

Em síntese, questiona-se: os fenômenos que impactam no sucesso de comunicações em HF estão sendo observados no planejamento e no emprego desse tipo de sistema no âmbito do EB?

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos gerais e específicos deste estudo foram delineados com o propósito de identificar quais fenômenos podem impactar enlaces em HF em situações de emprego militares.

1.2.1 Objetivo Geral

Identificar anomalias e recorrência de fenômenos que afetem enlaces em HF, levando a reduções no sucesso de comunicações em enlaces militares.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Enumerar os diversos fenômenos que podem reduzir a eficácia de um enlace em HF para transmissões via ionosfera;
- Observar o impacto desses fenômenos em transmissões militares;
- Identificar se a literatura disponível (manuais militares, cadernos de instrução, notas de aula de estabelecimentos de ensino de comunicações etc.) no âmbito do EB aborda os fenômenos que impactarão no sucesso nesse tipo de sistema.

1.3 QUESTÕES DE ESTUDO

Algumas questões de estudo são apresentadas a seguir com a finalidade de delimitar o escopo da pesquisa.

- a. Quais fenômenos acontecem na ionosfera brasileira com mais periodicidade que são relevantes para as comunicações militares do EB?

- b. Esses fenômenos interrompem os enlaces, prejudicando a capacidade de comunicação eficaz entre elementos de uma tropa?
- c. Existem regiões geográficas com maior incidência de anomalias prejudiciais ao sistema?
- d. Os sistemas em HF utilizados pelo EB possuem condições de se sobreporem a essas anomalias da ionosfera, superando-as ou se adaptando a condições dinâmicas de propagação?
- e. A literatura disponível em manuais e notas de aula militares aborda as situações reais de emprego dos equipamentos, indicando possíveis soluções e indicando ferramentas apropriadas para o planejamento de enlaces em HF?

1.4 METODOLOGIA

Para se alcançar os objetivos propostos neste trabalho será realizada a leitura e o respectivo fichamento de diversas fontes, militares e civis, que lidem com a temática de enlaces em HF. Posteriormente, os dados serão consolidados no contexto específico do uso militar da faixa do HF, com as restrições pertinentes a esse tipo de sistema, o que inclui os equipamentos disponíveis adquiridos pelo EB e as faixas de frequências reguladas pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) para uso militar. Por fim, os dados serão verificados e analisados para a consolidação dos resultados.

Quanto à forma de abordagem do problema será utilizada predominantemente a modalidade qualitativa, com ênfase em solucionar o problema proposto. Quanto aos objetivos gerais, a pesquisa será do tipo descritiva, visando a consubstanciar o estabelecimento da relação entre as variáveis elencadas neste trabalho.

Quanto aos procedimentos técnicos, será utilizada a pesquisa bibliográfica, utilizando como fontes de consulta manuais militares, artigos técnicos civis e livros que lidam com a ionosfera já consagradas.

Além disso, como instrumento de pesquisa, serão realizados questionários com operadores em HF que possuam experiência nessa área e tenham lidado com adversidades nesse tipo de enlace.

1.4.1 Objeto Formal de Estudo

Este trabalho está voltado para transmissões militares na faixa do HF, sejam elas táticas ou operacionais. O principal objeto de estudo são os fenômenos que possam vir a impactar o sucesso do enlace em HF, avaliando o grau de interrupção no sistema que as perturbações possam provocar.

Dessa forma, as variáveis independentes elencadas são as perturbações e anomalias da ionosfera. Já as variáveis dependentes são o seu impacto na comunicação, a ser medido em uma escala qualitativa que será padronizada após a consolidação final dos dados.

Variável I: fenômenos e anomalias da ionosfera

Nesta pesquisa, essa variável corresponde aos fenômenos e anomalias encontrados na literatura, e ratificados pelos especialistas questionados, que possam influenciar na eficiência de um enlace em HF, em especial na ionosfera brasileira, observando-se a extensão em dias ou horas, a intensidade da perturbação e a área abrangida em quilômetros quadrados.

Variável II: impacto na comunicação na faixa do HF

O impacto na comunicação será avaliado em uma escala qualitativa devido às características do desvanecimento, de natureza altamente dinâmica no espaço e no tempo, e sujeito a diferentes fatores de acordo com o tipo de enlace em análise.

1.4.2 Procedimentos para Revisão da Literatura

Para elucidar os conceitos referentes às características da ionosfera foram utilizados manuais militares, como o C 24-18 (Brasil, 1997) e o SC:25C (EUA, 2005). Porém, foi necessário expandir a literatura até livros e artigos acadêmicos já consagradas como fontes de consulta nessa área. Tais obras são encontradas como referências em diversos trabalhos publicados no Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), na ITU e no Instituto Militar de Engenharia (IME), como os trabalhos de Davies (1966), de Dolukhanov (1971) e de Zolesi (2014).

As palavras-chaves pesquisadas foram ionosfera, perturbação ionosférica, eventos solares, propagação rádio, transmissões militares, EIA, ESF e anomalias ionosféricas, em repositórios diversos, brasileiros e internacionais.

O tipo de Operação Militar em que houve foco nesse estudo foram aquelas afeitas aos grupos rádio designados no âmbito do EB que utilizam a faixa do HF, que expressa a comunicação entre Grandes Comandos, Grandes Unidades, Unidades e Subunidades (BRASIL, 2019).

1.4.3 Instrumentos de Pesquisa

Visando a ampliar o conhecimento sobre os fenômenos que afetam as comunicações militares no âmbito do Exército Brasileiro, foram elaborados questionários com especialistas em HF que tenham utilizado transceptores em anos recentes. Os questionários têm como intenção em especial responder à questão de estudo: “Os sistemas em HF utilizados pelo EB possuem condições de se sobrepôr às anomalias da ionosfera?”

Foram escolhidos 2 nichos específicos de pesquisa, de forma a agregar operadores que possuíssem vivências semelhantes na lide com as transmissões em HF.

O primeiro nicho, e mais relevante, foram os chefes e operadores da Rede Rádio Fixa do Exército Brasileiro, que pode ser definida como:

É a rede rádio do Sistema Estratégico de Comunicações (SEC) que opera, de forma ininterrupta, na faixa de alta frequência (HF). Possui, ao longo do território nacional, um ponto de presença (estação rádio) em cada guarnição e apresenta, como característica primordial, ser o meio de contingência para o Exército em qualquer eventual pane no Sistema Nacional de Telecomunicações (SNT). A RRF permite a transmissão de dados, voz (fonia), integração rádio-telefone e telegrafia, e subdivide-se na Rede Rádio Fixa Principal (RRFP) e nas Redes Rádio Fixas Secundárias (RRFS). A RRF também é considerada um sistema corporativo de infraestrutura do Exército, conforme estabelecido na Portaria Nr 026-DCT, de 31 mar 2006, que aprova as Instruções Reguladoras para Emprego Sistemático da Informática no Exército Brasileiro - IREMSI (IR 13-07). (GLOSSÁRIO, 2021).

Por estarem em operação permanente, os operadores dessa rede atendem plenamente ao requisito de terem utilizado transceptores em anos recentes e ainda possuem experiência com transceptores militares, facilitando, dessa forma, a identificação das anomalias mais recorrentes e o real impacto delas nas transmissões.

O segundo nicho foram os participantes, da modalidade fonia, do Concurso Verde Oliva (CVO) de Comunicações, um concurso voltado exclusivamente para Organizações Militares (OM) do EB, ocorrido no período de 1º a 4 de julho de 2021 e organizado pela Escola de Comunicações (EsCom). Esses participantes realizaram transmissões diuturnas durante o período do concurso e, semelhante a RRF, estão espalhados em todo o território brasileiro, o que os levou a lidar com uma gama de problemas distintos para o estabelecimento dos enlaces ao longo dos dias do concurso.

O Quadro 1 aponta a lista de especialistas elencados, de acordo com a origem dos operadores.

Origem	Quantidade de especialistas
Rede Rádio Fixa do Exército Brasileiro	53
Concurso Verde Oliva de Comunicações – Escola de Comunicações	40
Total de Especialistas	93

Quadro 1 – Especialistas questionados

Fonte: o autor.

O formulário teve como cerne os questionamentos abaixo, podendo se desdobrar em novos itens de acordo com a experiência do especialista.

- 1) Ao utilizar equipamentos rádio em HF, o Sr já presenciou alguma alteração brusca de qualidade do sinal que impossibilitou a comunicação temporariamente?

2) Essa alteração brusca de qualidade ocorre com frequência em qual horário?

3) Em qual região o Sr está localizado?

4) Quando o Sr teve problemas para comunicação em HF, o software de predição de enlace (VOACAP ou outro) apontava que o enlace era possível?

5) O Sr considera que o Equipamento Rádio (MILITAR) utilizado possui capacidade de se comunicar de forma eficiente? Se não, por favor relatar se há algum problema específico (antena, potência etc).

6) O Sr já teve acesso a alguma Instrução ou literatura militar que tratasse do tema: "perturbações ou anomalias na ionosfera"?

7) Caso seja possível especificar, qual fenômeno mais atrapalha a comunicação em HF na sua região?

1.5 JUSTIFICATIVA

Um canal, para as telecomunicações, é o meio no qual ocorre a propagação de um sinal. O canal típico HF se caracteriza por possuir baixa Relação Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR) e desvanecimento lento (CANNON, 2000), sendo fundamental compreender suas características para a implementação eficaz de sistemas de comunicação. Nos anos recentes, diversas técnicas foram desenvolvidas para aumentar o índice de sucesso desse tipo de sistema, porém, há diversos fenômenos naturais que devem ser observados no planejamento e na condução de comunicações na faixa HF.

Após a conclusão desse estudo, será possível identificar fenômenos e anomalias que incidem sobre o canal HF em transmissões militares, facilitando o emprego de equipamentos já adquiridos pelo EB.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão apresentadas as características mais relevantes da ionosfera, após isso, serão abordadas as anomalias e alterações mais comuns que a acometem, sendo geralmente as responsáveis por comprometer os enlaces nesse tipo de comunicação.

2.1 CARACTERÍSTICAS DA IONOSFERA

A reflexão de ondas eletromagnéticas na ionosfera é muito influenciado pelas particularidades da região onde estão ocorrendo as transmissões. Um dos aspectos mais relevantes é a densidade de elétrons presentes na ionosfera no momento da transmissão, além de sua dispersão espacial, que também pode impactar na eficácia da comunicação entre transceptores rádio (MARQUES, 2020).

Por exemplo, nos locais situados à margem do paralelo do Equador, incluso a Amazônia, há horários de grande densidade de íons na ionosfera (como no horário noturno entre 18h00 e 22h00), mas simultaneamente, também ocorrem grandes bolhas, ou vácuos de íons, que possuem tamanhos variados e podem impedir a reflexão das ondas eletromagnéticas, por simplesmente não haver íons suficientes para interação e reflexão. Ou seja, apesar da ionosfera, vista como um todo, estar bem ionizada, em certos locais relevantes para a transmissão rádio, não há boas condições para que enlaces sejam estabelecidos com eficiência (ZOLESI, 2014).

Quando ocorre maior nível de irradiação de energia solar, mensurado através do Número Suavizado de Manchas Solares (*Smoothed Sunspot Number* – SSN), há maior presença de íons e de elétrons livres, assim aumentando a densidade da ionosfera.

Em geral, durante o dia, a atividade solar aumenta a densidade de íons das camadas, subdividindo-as em D, E e F, alcançando extensões entre 50 km e 2.000 km acima da superfície terrestre. A camada D é a mais próxima da superfície terrestre; a camada F é a mais distante. A expansão da camada D devido ao aumento de irradiação não favorece enlaces 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. 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 permanência de densidade elétrica significativa no período noturno (ZOLESI, 2014 apud MARQUES, 2020).

A Figura 1 representa a densidade de íons de acordo com a altura na ionosfera de modo esquemático.

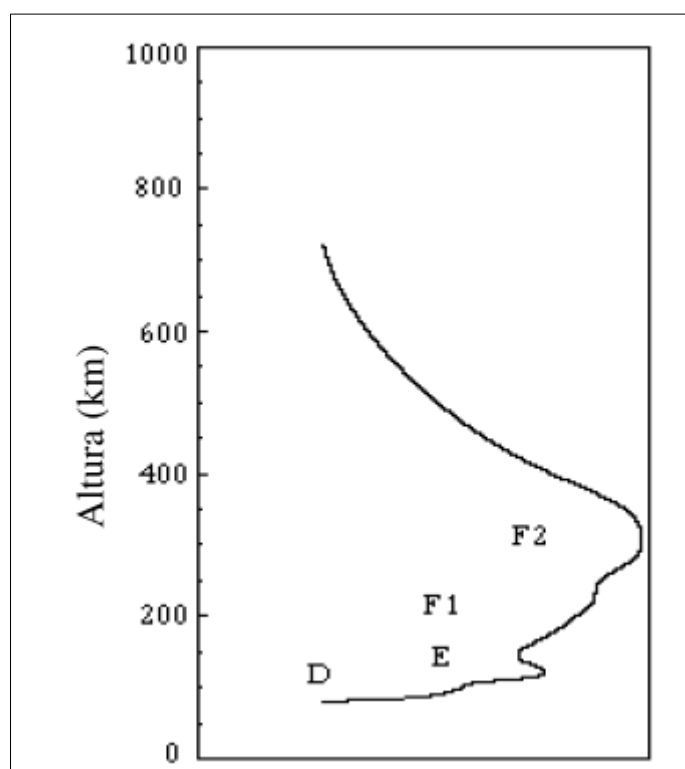


FIGURA 1: Representação esquemática da densidade eletrônica da ionosfera. Fonte: Amendola (2003).

2.1.1 Frequências críticas e máximas de transmissão

O aumento dos níveis de irradiação solar, seja devido ao horário do dia, ou por maior atividade do Sol, provoca o fenômeno da ionização, que é quando átomos neutros perdem ou adquirem elétrons, tornando-se eletricamente reativos a outros átomos. Quanto maior for o nível de ionização na ionosfera,

mais interações haverá com as ondas eletromagnéticas propagadas através de transceptores, assim, permitindo o aumento das frequências para o estabelecimento de enlaces. A frequência máxima em que ainda ocorre reflexão na ionosfera é chamada frequência crítica. Tentativas de propagação acima da frequência crítica da ionosfera simplesmente irão ultrapassá-la e não retornarão ao solo (DAVIES, 1966).

Uma forma simples de verificar as frequências críticas da ionosfera local é através da utilização de ionogramas. A linha de cor vermelha na Figura 2 representa precisamente a frequência crítica para uma altura específica acima da superfície terrestre, em quilômetros. Por exemplo, para a altura de 250 km acima da superfície, a frequência crítica é 4,8 MHz. Esse gráfico de frequências críticas é específico para esse horário, 19h00 do dia 25 de agosto de 2021, e para essa região, Cachoeira Paulista-SP, que é o local onde a ionosonda, que gerou o ionograma, está instalada. Outras ionossondas, em outros locais, no mesmo horário, irão produzir ionogramas com diferentes frequências críticas e diferentes características (MARQUES, 2020).

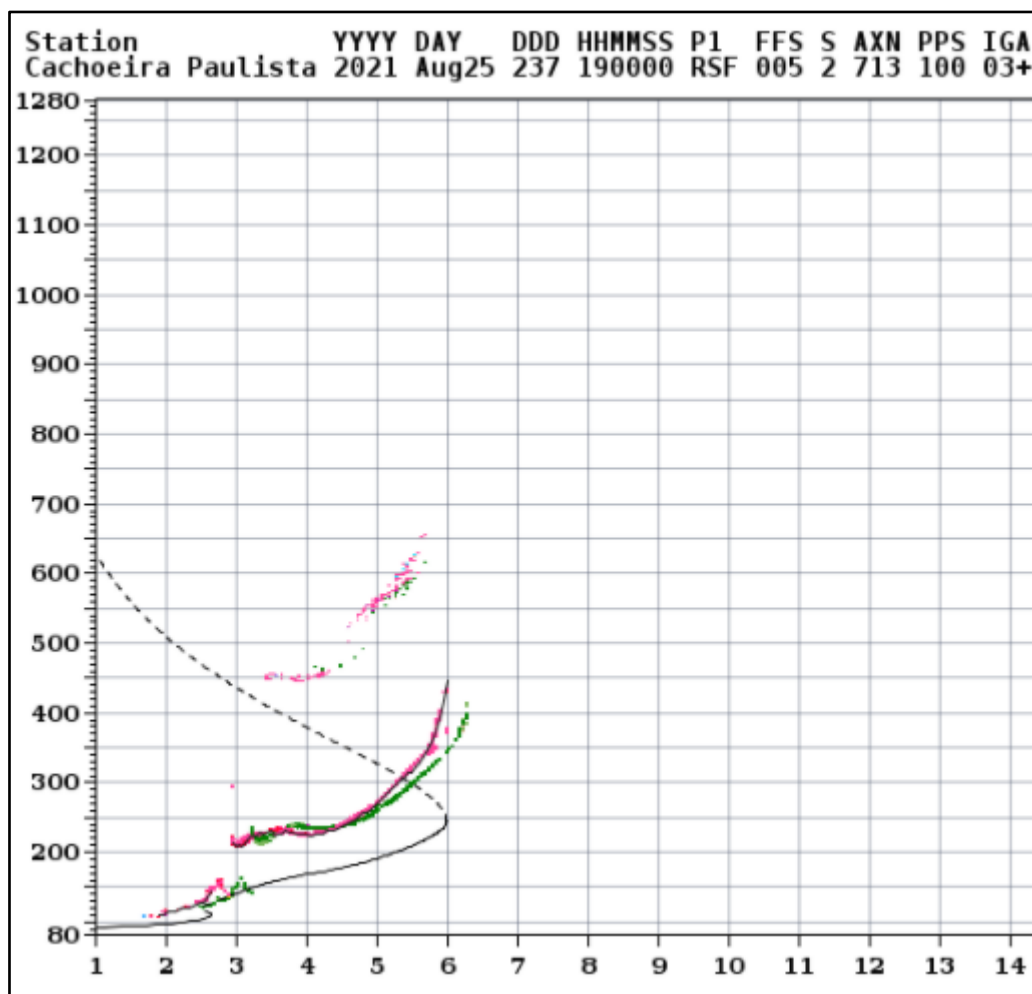


FIGURA 2: Ionograma regular em Cachoeira Paulista-SP.
 Fonte: GIRO (2021).

Partindo do pressuposto que a frequência crítica é aquela frequência de valor máximo para um determinado dia e horário, através de um ionograma local, logo se percebe a natureza dinâmica da ionosfera. Para um mesmo horário, uma propagação que alcance alturas mais elevadas, por exemplo, 200 km acima da superfície, poderá utilizar frequências entre 5 MHz e 6 MHz. Já uma propagação em baixa altura, por exemplo, a 80 km, só terá condições de refletir sinais de baixa frequência, próximos a 1 MHz.

Observando as frequências críticas em um ionograma local, os valores parecem demasiado baixos, entretanto, a sondagem realizada por uma ionosonda contempla apenas sondagens verticais. Se o operador utilizar transmissões oblíquas, de ângulos variados, poderá obter frequências maiores, e mais comuns, de propagação.

Efetivamente, a Máxima Frequência Utilizável (MUF - *Maximum Usable Frequency*) que pode ser alcançada, dada uma determinada frequência crítica e um ângulo θ de incidência na ionosfera, é obtida através da Equação 1 (DAVIES, 1966).

$$MUF = f_c \sec\theta \text{ [MHz]} \quad (1)$$

A partir da Equação 1, observando que a secante é o inverso do cosseno ($\frac{1}{\cos\theta}$), que este diminui à medida que θ é incrementado, e que θ é o ângulo complementar do ângulo de partida (ou ângulo de irradiação) do sinal, quanto menor for o ângulo de partida (propagações próximas do nível do horizonte), maior será a MUF, e como consequência, maior será o alcance obtido para uma determinada transmissão. De fato, todo ionograma traz por padrão uma tabela de MUF de acordo com a distância a ser alcançada, Figura 3.

D	100	200	400	600	800	1000	1500	3000	[km]
MUF	6.3	6.4	6.7	7.2	7.9	8.9	11.9	19.5	[MHz]

FIGURA 3: MUF de acordo com a distância de enlace.
Fonte: GIRO (2021).

Toda esses dados sobre frequências críticas e MUF devem ser observados em um planejamento eficaz de sistemas em HF (MARQUES, 2020). Para dirimir a complexidade da escolha correta da frequência a ser propagada, ao longo do tempo, diversos *softwares* foram desenvolvidos e aprimorados para a escolha correta de frequências

2.1.2 Softwares de predição de enlace

As especificidades da ionosfera implicam que uma simples transmissão entre dois transceptores seja permeada de desafios. Além da alteração da frequência crítica, como visto no tópico anterior, outros fatores precisam ser avaliados conjuntamente, tais como o SSN, a distância entre os transceptores e o ângulo de irradiação. Os *softwares* a seguir visam a determinar adequadamente a frequência a ser utilizada em um enlace específico.

(a) VOACAP

O *Voice of America Coverage Analysis Program* (VOACAP) é uma adaptação do *Ionospheric Communications Analysis and Prediction Program* (IONCAP). O VOACAP teve diversos 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) (MARQUES, 2020).

É o *software* mais comum utilizado pela comunidade HF, com extensa base empírica e melhorias continuadas ao longo de quase 40 anos. Apesar de alguns erros de precisão, estimados em 15% pela própria equipe que o desenvolveu, sua gama de ferramentas e resultados possíveis o torna uma ferramenta valiosa na predição de frequências (VOACAP, 2021).

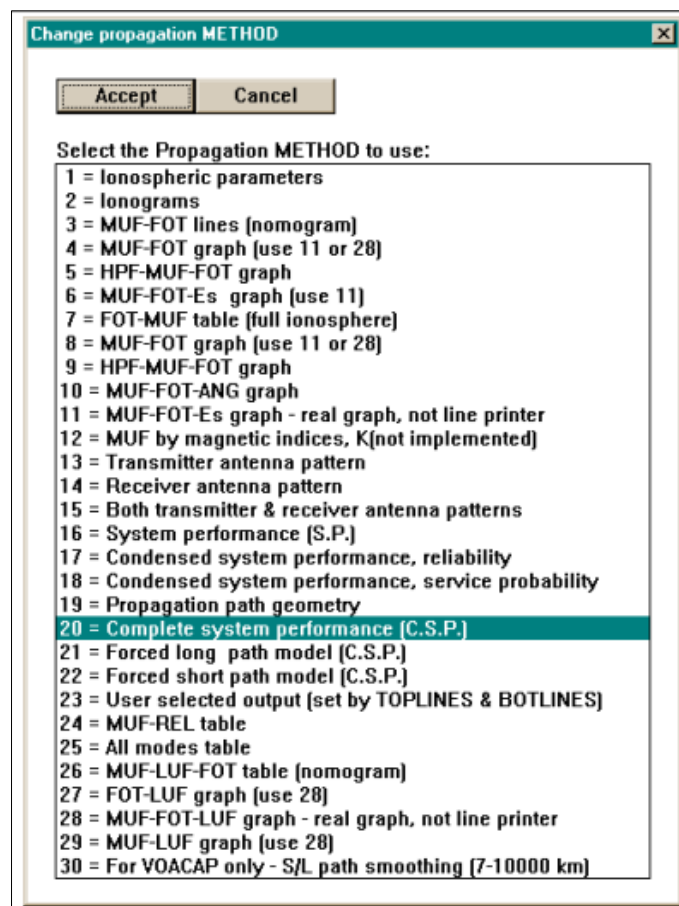


FIGURA 4: Modelos e resultados possíveis do VOACAP.
Fonte: VOACAP (2021).

Há nada menos que 30 resultados selecionáveis disponíveis no *software*, fornecendo desde diagrama de irradiação de antenas a gráficos de confiabilidade para escolha de frequências, entre outros, Figura 4.

O VOACAP também possui uma versão on-line, gratuita, que disponibiliza menos recursos que a sua versão original, mas que fornece as informações básicas para o planejamento de enlaces, Figura 5, em que é possível observar as frequências previstas para um enlace entre Cristalina-GO e Brasília-DF. De acordo com a previsão do VOACAP para esse enlace, se um operador deseja realizar, por exemplo, uma transmissão às 01h00, no horário UTC (3 horas a mais em relação ao horário de Brasília), terá uma gama de frequências limitada entre 2,5 MHz e 4,5 MHz com quase 100% de probabilidade de sucesso (cor vermelha). De outra forma, se desejar realizar uma transmissão às 20h00 UTC, terá muito mais possibilidades, entre 2,5 MHz e 8 MHz, com também quase 100% de probabilidade de sucesso.

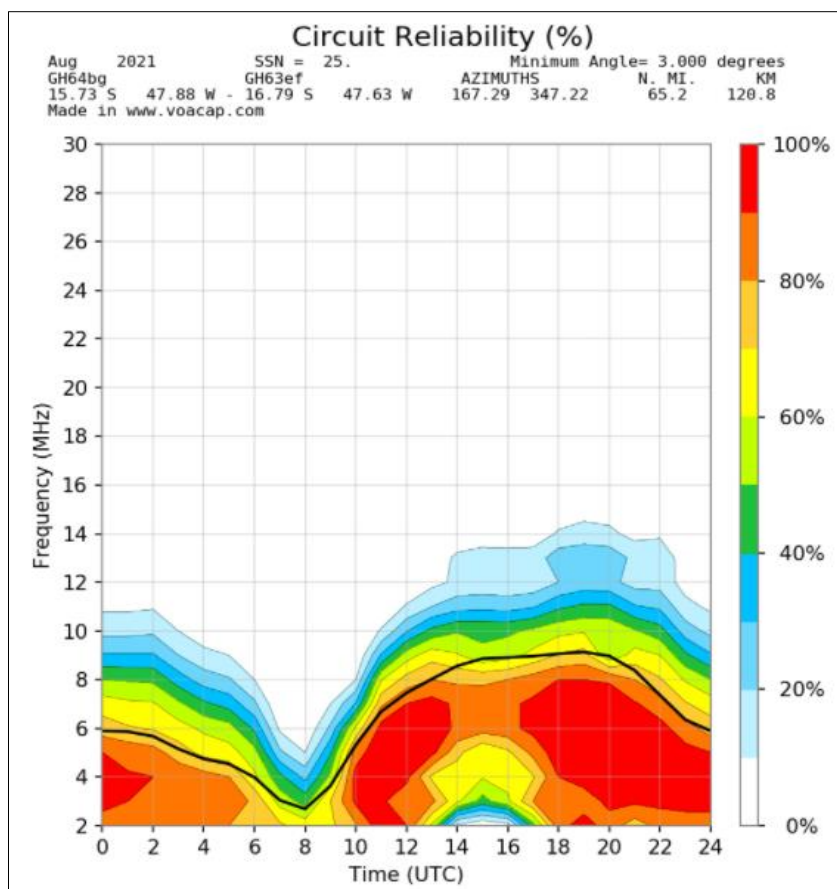


FIGURA 5: Confiabilidade de frequências utilizando o VOACAP on-line.
 Fonte: Perkiömäki et al. (2021).

(b) GRAFEX

Outro *software* de predição de frequências é o GRAFEX, do serviço de meteorologia australiano SWS (*Space Weather Services*). Sua principal distinção, quanto ao VOACAP, é levar em conta, em tempo real, as perturbações geomagnéticas na ionosfera (SWS, 2021).

Apesar de possuir uma apresentação de resultados peculiar, na forma de letras e de tabelas, o GRAFEX fornece uma Frequência Ótima de Trabalho (*Optimum Working Frequency – OWF*) e uma estimativa da qualidade do enlace, Figura 6.

```

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  FFFF%%.                    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  AFF%..                    16
17  6.6  3.5  2.7  AFF%..                    17
18  7.1  3.4  2.6  AFF%..                    18
19  7.2  3.1  2.4  BFFF%..                    19
20  7.1  2.7  2.2  FFFF%..                    20
21  6.7  1.9  1.6  AFF%..                    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 6: Predição de frequências para enlace entre Cristalina-GO e Brasília-DF no software GRAFEX.
Fonte: SWS (2021).

Os três modelos, VOACAP, VOACAP on-line e GRAFEX, são gratuitos e possuem suas peculiaridades e deficiências, inclusive com melhores adaptações

a determinadas regiões. Mas todos fornecem frequências adequadas de trabalho e uma estimativa da qualidade do sinal com boa eficiência para diversos tipos de enlaces, sendo ferramentas úteis para qualquer operador em HF (MARQUES, 2020).

2.2 ALTERAÇÕES E ANOMALIAS NA IONOSFERA

2.2.1 Irradiações Solares

Eventos na superfície do Sol com elevadas irradiações de energia podem ocasionar grandes alterações no campo geomagnético terrestre. Essa energia, ao chegar à Terra, altera e influencia diretamente o fluxo de partículas ionizadas livres. Tais alterações podem ocasionar aumento repentino do nível de ruído ou desvanecimentos aleatórios (MATSUOKA, 2013), muito comuns em enlaces em HF.

Dois fenômenos comuns que podem provocar alterações geomagnéticas na Terra — e consequentemente, interferir no sinal HF — são Explosões Solares e Ventos Solares de Alta Velocidade. Um Explosão Solar pode durar desde alguns minutos até várias horas, irradiando alta carga de energia na forma de raios X e UV, o que provocará oscilações repentinas de intensidade do sinal, também chamados de desvanecimentos (GUYER; SAN, 2013).

2.2.2 Anomalias Ionosféricas

Um fenômeno bastante comum na ionosfera brasileira, em especial, na faixa de latitude tropical, é o Espalhamento Equatorial da camada F (*Equatorial Spread-F* – ESF), que pode, de acordo com a sua intensidade, provocar alterações profundas na principal camada utilizada para propagação eletromagnética da ionosfera, a camada F (ZOLESI, 2014).

Em uma ionosfera sem a presença do fenômeno, uma transmissão rádio irá sofrer refrações sucessivas na ionosfera até o ponto de reflexão total, retornando ao solo, porém, quando há o ESF, a camada F se torna difusa, instável e com densidade de elétrons irresoluta, resultado em espalhamento do sinal, e consequentemente, em maior dificuldade de se alcançar o rádio receptor.

A anomalia se manifesta especialmente em períodos noturnos, e pode levar à completa indisponibilidade de sistemas de comunicação HF nesse horário.

Outro fenômeno que pode provocar alterações na ionosfera brasileira é a Anomalia Equatorial da Ionosfera (*Equatorial Ionization Anomaly – EIA*). A anomalia provoca variações verticais e horizontais das camadas de elétrons, aumentando a sua altitude e latitude, em um chamado efeito fonte, que concentra a maior densidade de elétrons na região entre $\pm 15^\circ$ e $\pm 20^\circ$ (PILLAT, 2006).

A principal implicação do EIA para as transmissões militares é o alcance inadequado de transmissões rádio muito além do rádio receptor, devido a uma maior altura da ionosfera, o que pode vir a ferir diretrizes de Medidas de Proteção Eletrônica (MPE) estabelecidos em determinada operação militar.

2.2.3 ESF

Uma forma de visualizar o Espalhamento Equatorial da camada F é através de ionogramas. Na Figura 7 (a), à esquerda, é possível visualizar um ionograma de uma ionosfera típica, sem anomalias relevantes. A ionossonda, ao enviar um pulso eletromagnético, obtém uma única resposta, e pelo tempo de “voo” do pulso, estima em que altura esse pulso sofreu reflexão, dando origem à linha de cor vermelha (MARQUES, 2020).

De outra forma, conforme pode ser verificado na Figura 7 (b), em uma ionosfera conturbada, com plena manifestação do ESF, a ionossonda, ao enviar o pulso, obtém múltiplas respostas, dando origem a imprecisões e manchas coloridas, de forma que é impossível, em um ionograma, observar com precisão a altura de reflexão do pulso.

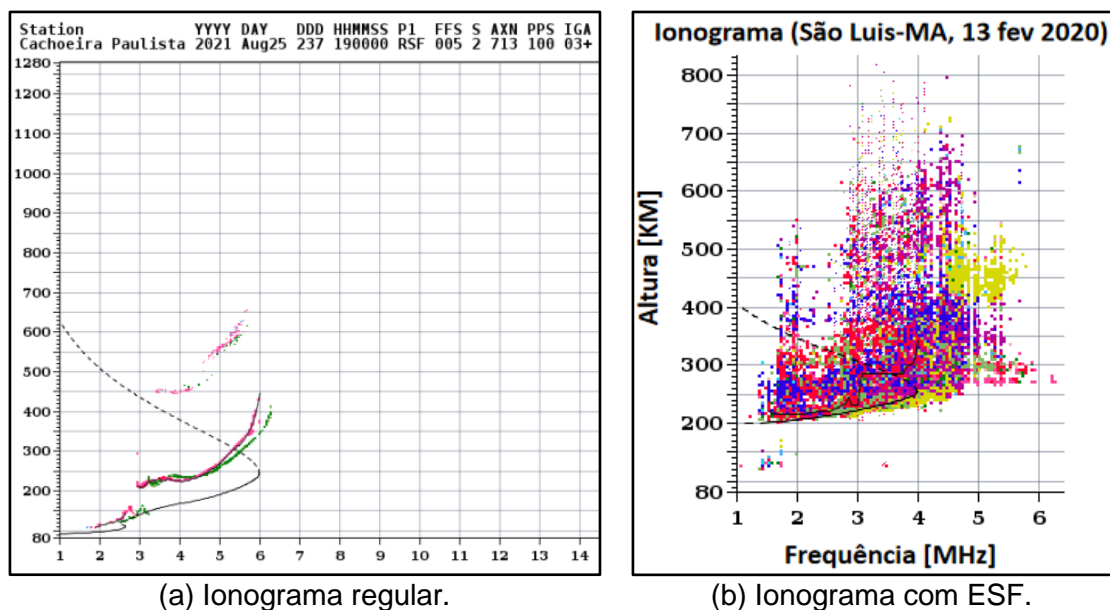


FIGURA 7: Ionograma sem ESF em Cachoeira Paulista-SP (a) vs. Ionograma com ESF em São Luís-MA (b).
Fonte: GIRO (2021).

O ESF manifesta-se especialmente nos horários noturnos, entre 20 e 24 horas, do horário local. Sua presença pode inclusive inviabilizar completamente a reflexão eficaz do sinal, inviabilizando sistemas de comunicações nesses horários (BERTONI, 2011).

2.3 O CANAL HF EM REPOSITÓRIOS MILITARES

Embora seja utilizado em situações táticas e estratégicas, e enquadrado em 4 grupos de equipamentos rádio militares (2, 3, 4 e 5) (BRASIL, 2019), a utilização de equipamentos na faixa do HF e seus fenômenos associados não possui uma vasta literatura técnica disponível para consulta proveniente de fontes militares no âmbito do EB e das FA.

Um dos principais manuais que aborda tal assunto, o C 24-18: Emprego do Rádio em Campanha (Brasil, 1997), no tópico “Propagação por Onda Ionosférica” apenas cita as características gerais desse tipo de propagação, informando que:

O comportamento da ionosfera é basicamente controlado pela atividade solar. Assim, as condições de propagação via onda ionosférica dependem da hora do dia e época do ano, podendo

apresentar variações profundas em curto espaço de tempo (Brasil, 1997, p. 4-11).

Além disso, o manual informa que “durante a noite, os enlaces ionosféricos podem alcançar milhares de km. Durante o dia, existe uma absorção maior da onda ionosférica” (Brasil, 1997, p. 4-14).

Apesar do manual possuir aspectos elucidativos quanto ao uso da propagação em HF, não são fornecidas fontes de consulta ou a base de dados que possam identificar como lidar com as “variações profundas” da ionosfera ou como contornar os problemas a serem vivenciados.

Outros trabalhos encontrados em repositórios militares brasileiros citam os fenômenos de forma genérica, como apontado em:

As pesquisas realizadas acerca da utilização da Alta Frequência em equipamentos mostram a volatilidade dessa faixa de frequência, com grande probabilidade de mudanças não previstas, em decorrência de mudanças no clima solar astronômico (BARBOSA, 2020, p. 12).

Barbosa (2020) também aborda a influência dos ventos solares na ionosfera, que provocam alterações do campo magnético terrestre.

Outros autores de instituições militares, como Albuquerque (2011, p.153), cita “que sistemas rádio em HF apresentam algumas limitações que impõem certos inconvenientes à sua utilização”. O autor aponta a possibilidade constante de desvanecimentos e de oscilações da taxa de transmissão, mas não especifica como os inconvenientes podem ser mensurados e ter seus dados assimilados em planejamentos de sistemas HF.

Já Amendola (2003, p.33) reforça o aspecto que “a propagação em regiões equatoriais, aurorais e polares são mais problemáticas do que em latitudes médias”, onde subdivide as anomalias ionosféricas em quatro tópicos: a EIA, o ESF, as depleções do plasma ionosférico e a cintilação ionosférica.

A EIA, como já citado na seção 2.2.2 deste trabalho, modifica a densidade eletrônica de acordo com a latitude e, acrescenta o autor, “começa a se desenvolver por volta de 09:00 – 10:00 (hora local), alcança seu máximo às 14:00 – 15:00 (hora local) e pode persistir até após o pôr do sol” (AMENDOLA,

2003, p. 34). O ESF é abordado de forma genérica, sem maiores adições do que já feitas por Zolesi (2014). As depleções do plasma ionosférico estão vinculadas a forte desvanecimento do sinal, ocorrendo geralmente entre 20h00 e 00h00 (horário local), na forma de bolhas de redução da densidade de elétrons. Por fim, a cintilação ionosférica “refere-se às flutuações rápidas de amplitude e fase observadas no sinal recebido após atravessar regiões de não-homogeneidades em pequena escala da ionosfera” e também está associado a bolhas ionosféricas.

Nos Estados Unidos da América, o manual militar SC:25C – *Principles of Radio Wave Propagation* (EUA, 2005) aborda os óbices à propagação via ionosfera com foco nos tópicos ruído e variações da ionosfera. Tais variações são classificadas como regulares e irregulares. As regulares podem ser mais facilmente previstas através de ferramentas de predição de enlace. Já as irregulares são imprevisíveis e necessitam de maior análise, como as perturbações ionosféricas e as tempestades magnéticas. As perturbações ionosféricas são associadas a eventos solares, descritos apenas como “erupção solar”, provocando o efeito de “apagão” do sinal. Já as tempestades magnéticas são associadas a perturbações no campo magnético terrestre, reduzindo a intensidade do sinal e provocando desvanecimentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da Referência Bibliográfica citada e dos formulários respondidos por especialistas, foi possível determinar quais fenômenos são mais recorrentes em território brasileiro, identificando-se os desvanecimentos aleatórios em ambiente urbano em primeiro lugar nas ocorrências, seguido por interferências de outros operadores e por fim, o ESF.

3.1 RESULTADOS DOS FORMULÁRIOS

As respostas aos formulários com os especialistas constataam que os fenômenos elencados neste trabalho, identificados através de pesquisa bibliográfica, estiverem presentes em suas transmissões e adicionalmente outros problemas foram listados como muito relevantes.

Embora os especialistas em HF consultados tenham experimentado uma vasta gama de falhas nas comunicações, houve consenso entre os mesmos que estas falhas poderiam ser dirimidas com mais tempo de planejamento ou substituição de determinadas características do enlace, como antena direcional ou menor Relação Sinal-Ruído (SNR) requerida.

Por ser o maior grupo, e que está lidando diariamente com transmissões em HF, serão analisados detalhadamente os resultados dos formulários dos operadores da Rede Rádio Fixa do Exército.

(a) Resultados da RRF

As falhas nas comunicações relatadas foram principalmente vinculadas ao nível de ruído aleatório e ao horário de propagação escolhidos. Para contornar problemas desse tipo, os especialistas consultados utilizaram *softwares* de predição de enlace, como o VOACAP e sua versão disponibilizada on-line, realizando trocas de frequências até o ponto em que houvesse reflexão na ionosfera. Na RRF, essas observações de qualidade de propagação são realizadas por um posto específico, que é a estação central da rede.

Quanto ao horário do dia, esse parâmetro é notavelmente mais previsível, segundo os especialistas, favorecendo enlaces em horários noturnos.

Para os operadores da RRF, é interessante notar que quase 80% deles já vivenciaram anomalias que interromperam o sinal subitamente, mesmo possuindo equipamentos fixos e de acentuada qualidade técnica, conforma apresentado na Figura 8.

Ao utilizar equipamentos rádio em HF, o Sr já presenciou alguma alteração brusca de qualidade do sinal que impossibilitou a comunicação temporariamente?

53 respostas

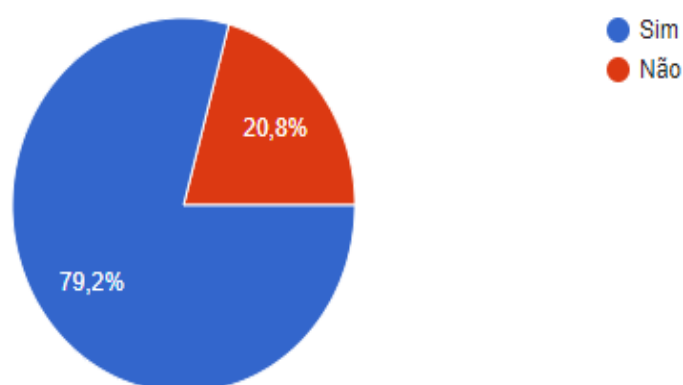


FIGURA 8: Percentual de operadores que já vivenciaram anomalias bruscas de sinal com equipamentos da RRF.

Fonte: O autor.

Entre aqueles que vivenciaram essas anomalias, destacam-se dois horários:

- eventos ocorridos entre 12h00 e 17h00, tendo como causa possível a expansão da camada D, que incrementa a absorção de radiofrequência e reduz a eficácia dos enlaces; e

- eventos entre 17h00 e 22h00, momento em que há um aumento repentino do uso de equipamentos eletrônicos (lâmpadas, geradores etc.) e melhores condições de propagação, o que favorece simultaneamente o ruído aleatório e a interferência de outros operadores nos canais HF, Figura 9.

Essa alteração brusca de qualidade ocorre com frequência em qual horário?

53 respostas

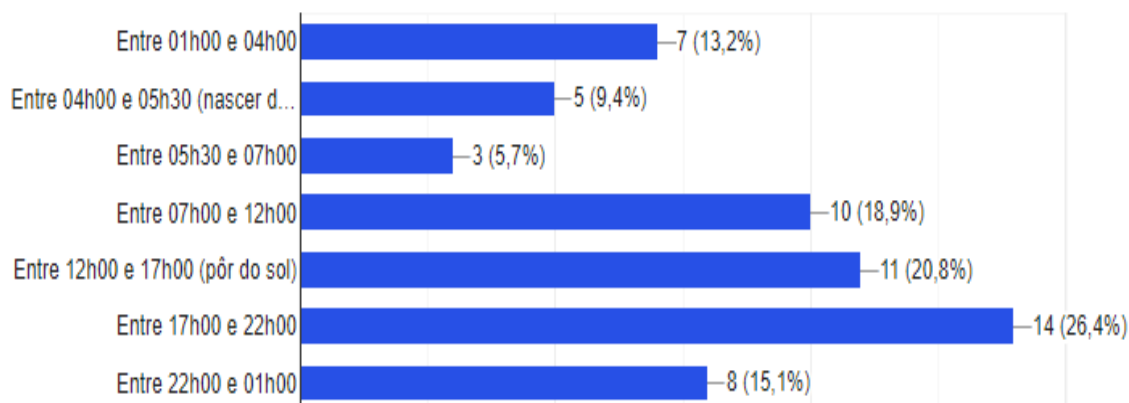


FIGURA 9: Influência dos horários de transmissão em anomalias na ionosfera.
Fonte: O autor.

Entretanto, segregando os especialistas da RRF somente para a Região Norte, é possível notar que 50% deles atribuem as maiores anomalias somente ao horário entre 17h00 e 22h00, que é o horário típico de manifestação do ESF na região, corroborando a influência dessa anomalia.

Em outras regiões, houve também forte influência do horário entre 12h00 e 17h00, que é um horário tipicamente ruim para transmissões, como já citado anteriormente.

Quando o Sr teve problemas para comunicação em HF, o software de predição de enlace (VOACAP ou outro) apontava que o enlace era possível?

54 respostas

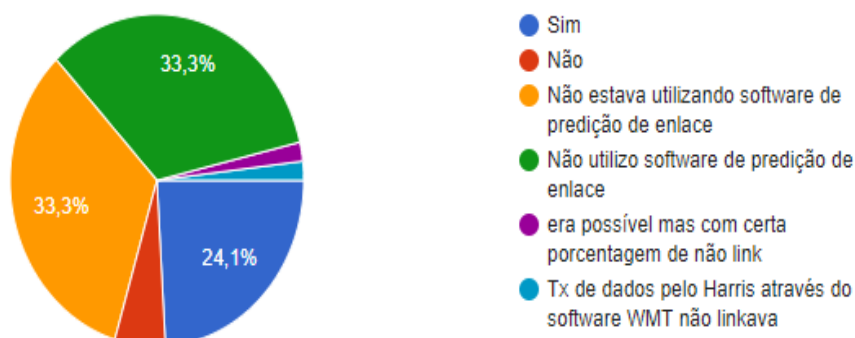


FIGURA 10: Utilização de *software* de predição de enlace.
Fonte: O autor.

Na Figura 10, é possível observar que 33,3% dos operadores responderam que “Não utilizo software de previsão de enlace” e 33,3% “Não estava utilizando (...)”. Devido ao fato que as frequências de operação na RRF são determinadas por sua chefia, a maioria dos operadores não verifica as condições de propagação antes de enviar as suas mensagens.

O Sr considera que o Equipamento Rádio (MILITAR) utilizado possui capacidade de se comunicar de forma eficiente? Se não, por favor relatar se há algum problema específico (antena, potência etc).

54 respostas

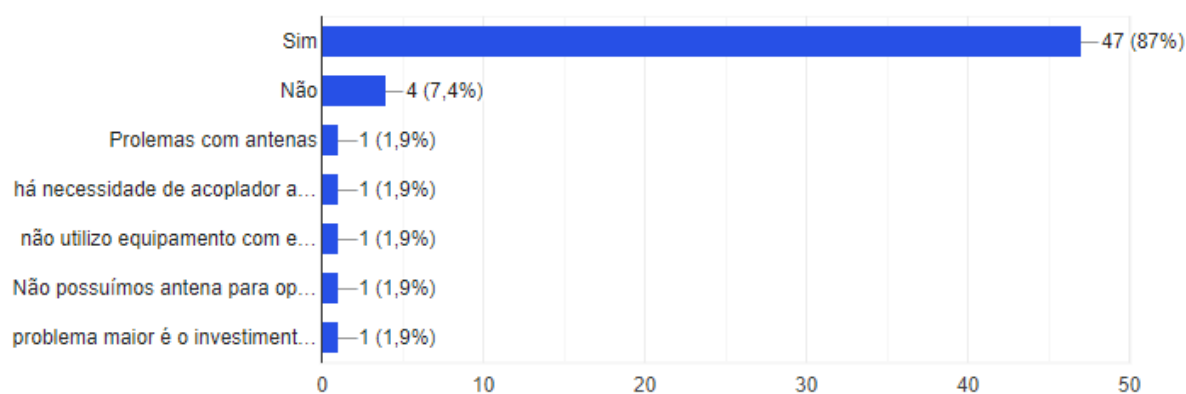


FIGURA 11: avaliação da eficiência do equipamento utilizado.

Fonte: O autor.

Quanto ao equipamento utilizado, a vasta maioria dos operadores concorda que o equipamento utilizado é eficiente, com poucos senões apontados, Figura 11. Os problemas relatados foram em sua maioria referentes à antena do equipamento em uso, modelo Harris Falcon III. Esse problema também foi relatado por operadores do outro grupo pesquisado (CVO).

Apesar da complexidade das transmissões em sistemas HF, os operadores relataram que somente 25,9% deles teve contato com algum conteúdo que tratasse de anomalias e perturbações ionosféricas, Figura 12. Como visto no capítulo 2 desse manuscrito, as alterações da ionosfera, com seus desvanecimentos, ruídos aleatórios, depleções de íons e alterações de densidade, são a regra, e não a exceção.

O fato de apenas 25,9% dos operadores terem tido acesso a conteúdo que tratasse desse tema revela uma lacuna na forma como esses sistemas são utilizados, em especial, quando forem serem empregados em situações dinâmicas, que exigem mobilidade e horários variados de transmissões.

O Sr já teve acesso a alguma Instrução ou literatura militar que tratasse do tema: "perturbações ou anomalias na ionosfera"?

54 respostas

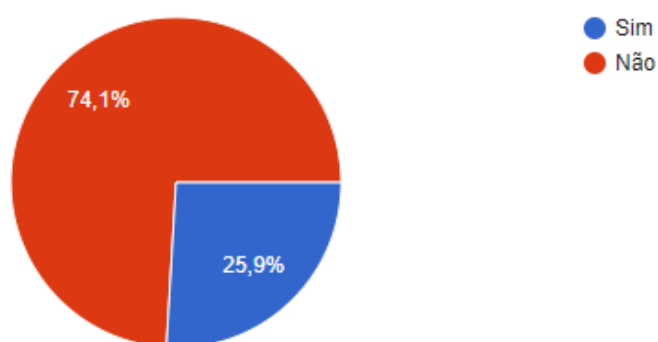


FIGURA 12: Acesso dos operadores a literatura técnica sobre transmissões em HF.
Fonte: o autor.

Na Figura 13, encontra-se a avaliação dos operadores quanto aos fenômenos ocorridos. O ruído aleatório, ou desvanecimento, foi mencionado por 63% dos operadores, relevando a necessidade da correta escolha de frequências ao serem realizadas as transmissões, já que, como visto no tópico 2.1.2., Figura 5, em certos horários, diferenças de apenas 2 MHz podem indicar o sucesso ou a falha numa comunicação rádio.

Caso seja possível especificar, qual fenômeno mais atrapalha a comunicação em HF na sua região?

54 respostas

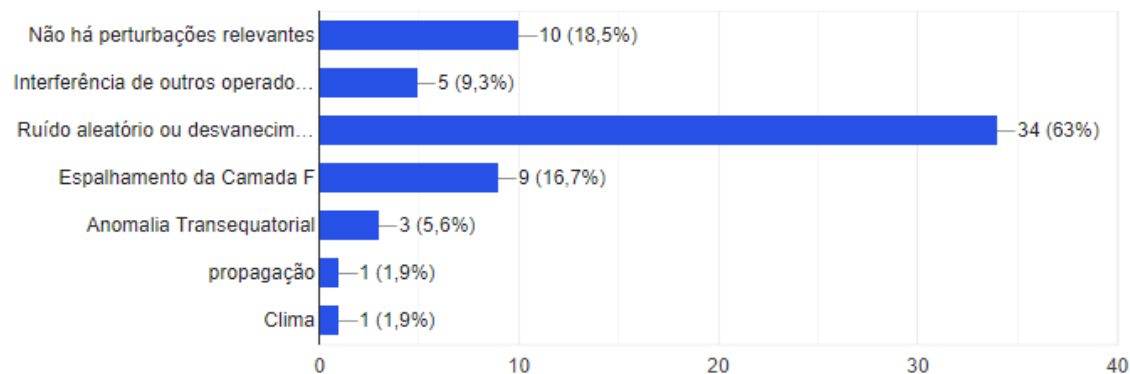


FIGURA 13: Fenômenos identificados por operadores em HF.

Fonte: o autor.

Outro aspecto relevante é que o ESF foi relatado como o segundo fenômeno que mais atrapalhou os enlaces pelos operadores, com 16,7% das ocorrências, destacando a presença relevante dessa anomalia na ionosfera brasileira. Também se observa a presença de outros operadores na mesma largura de banda do espectro eletromagnético, com 9,3% das ocorrências, inclusive com interferências em outros idiomas (espanhol) na região da Amazônia, o que suscita a possibilidade de haver mais frequências reservas para enlaces militares.

Nas questões discursivas dos formulários, os operadores reforçaram os problemas com antenas (necessidade de maior ganho) e interferências novamente.

(b) Resultados do CVO

Os resultados do CVO diferem ligeiramente dos resultados da RRF pois os operadores das OM não estavam em estações fixas. Os transceptores foram instalados somente para a ocasião do concurso e nem sempre com testes de eficiência mais prolongados.

De imediato, percebe-se que o grau de dificuldade vivenciado pelos operadores do CVO foi muito maior, com apenas 7,5% deles relatando que não vivenciaram alterações bruscas de qualidade do sinal, Figura 14.

Ao utilizar equipamentos rádio em HF, o Sr já presenciou alguma alteração brusca de qualidade do sinal que impossibilitou a comunicação temporariamente?

40 respostas

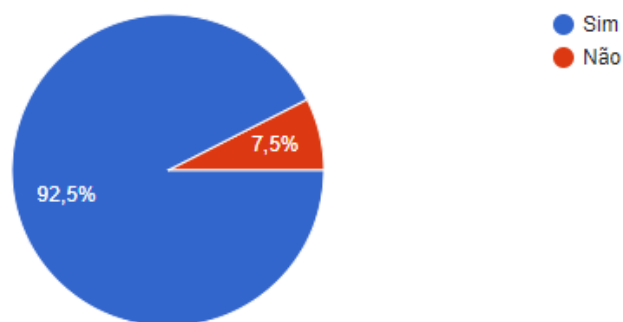


FIGURA 14: Percentual de operadores do CVO que vivenciaram anomalias bruscas de sinal.

Fonte: O autor.

O horário mais desafiador também sofreu alterações, o grupo de operadores do CVO elencou o período vespertino, entre 12h00 e 17h00, como o mais difícil, Figura 15. Ressalta-se que o incremento da camada D da ionosfera em conjunto com a baixa potência dos equipamentos utilizados no CVO em muito contribuiu para a falha no estabelecimento de enlaces nesse horário.

Essa alteração brusca de qualidade ocorre com frequência em qual horário?

40 respostas

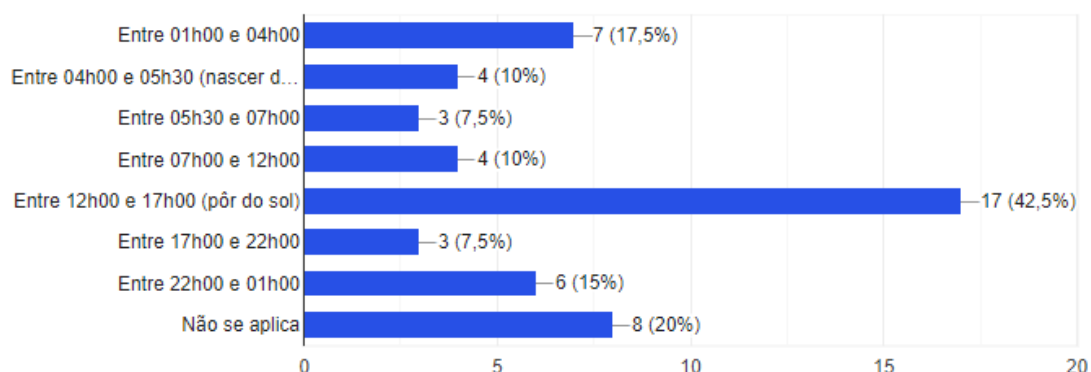


FIGURA 15: Influência dos horários de transmissão em anomalias na ionosfera.
Fonte: O autor.

Ao mesmo tempo, contata-se também que muitos operadores não estavam utilizando nenhuma ferramenta de predição de enlaces: 60% deles não estava utilizando ou não utiliza esse tipo de *software*, Figura 16. Esse resultado possivelmente repercutiu na confiabilidade dos operadores nos equipamentos utilizados, onde apenas 65% demonstraram confiar nos equipamentos, Figura 17.

Quando o Sr teve problemas para comunicação em HF, o software de predição de enlace (VOACAP ou outro) apontava que o enlace era possível?

40 respostas

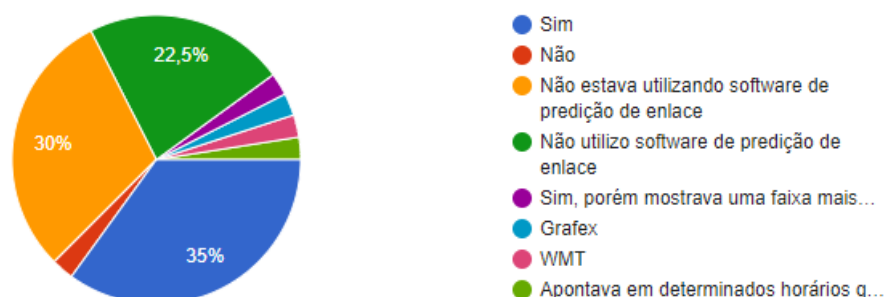


FIGURA 16: Utilização de *softwares* de predição de enlace.
Fonte: O autor.

O Sr considera que o Equipamento Rádio (MILITAR) utilizado possui capacidade de se comunicar de forma eficiente? Se não, por favor relatar se há algum problema específico (antena, potência etc).

40 respostas

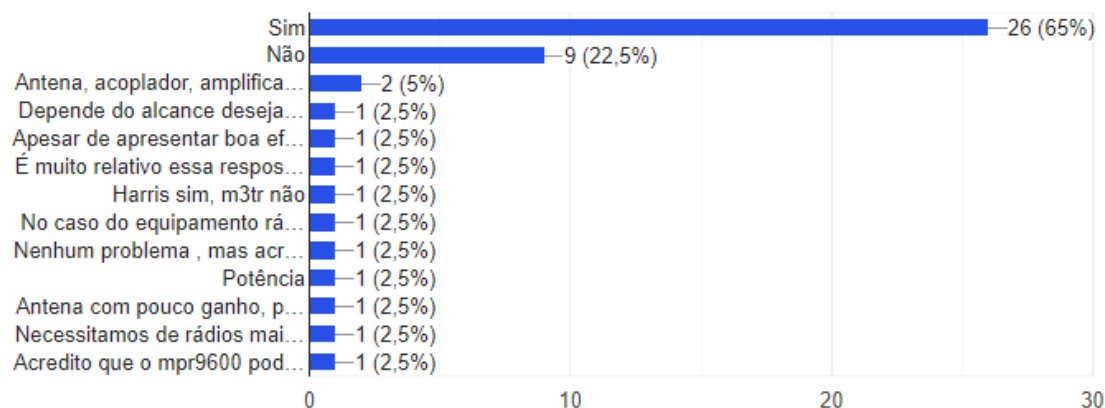


FIGURA 17: Confiabilidade nos equipamentos utilizados.

Fonte: O autor.

Ao comparar os dados da Figura 16 e 17, de imediato percebe-se o vínculo entre a falta de confiança dos operadores e o baixo percentual de utilização de ferramentas de predição. Conforme relatado no referencial teórico deste trabalho, utilizar frequências a esmo no ambiente da ionosfera certamente levará a um elevado índice de falhas.

Os demais resultados dos operadores do CVO são equivalentes aos da RRF: 60% dos operadores do CVO citam que nunca tiveram contato com alguma instrução ou literatura militar que tratasse do tema perturbações ou anomalias na ionosfera e 50% deles relataram o ruído aleatório como a maior fonte de perturbações (sendo aplicáveis as mesmas observações feitas quanto a esse problema para operadores da RRF).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Este trabalho teve como objetivo principal identificar anomalias e a recorrência de fenômenos que afetam enlaces em HF, em especial, no contexto de transmissões militares. Teve ainda como objetivos secundários observar o impacto desses fenômenos e identificar se a literatura disponível (manuais militares, cadernos de instrução, notas de aula de estabelecimentos de ensino de comunicações etc.) no âmbito do EB aborda os fenômenos que impactarão no sucesso nesse tipo de sistema.

Para a consecução desses objetivos, foram consultadas referências bibliográficas consagradas do tema, assim como, artigos recentes em repositórios nacionais e estrangeiros. Além disso, foram aplicados formulários, com questões objetivos e discursivas para quase 100 especialistas, de modo a obter uma amostra bem representativa das condições dos operadores de sistemas em HF do Exército Brasileiro.

Ao longo da pesquisa, foi possível observar que muitos operadores têm ciência das anomalias em HF, mas poucos, menos de 50%, utilizam ferramentas adequadas para lidar com o problema. Como observado através da referência bibliográfica, a ionosfera é um ambiente dinâmico, com diversas alterações ao longo de poucas horas, que podem influenciar de modo determinante um enlace. O operador que tenta utilizar o seu equipamento sem ferramentas de predição certamente incorrerá em diversos problemas de propagação e reduzirá muito a eficiência dos sistemas de comunicações.

Em especial para os operadores da RRF, esse problema é dirimido pois a rede possui uma estação central que monitora a qualidade dos enlaces, realizando trocas de frequências quando necessário. Porém, para os operadores militares isolados, fora de estações fixas, no contexto tático, a iniciativa de planejar adequadamente os enlaces torna-se fundamental.

Foi possível observar que a baixa utilização de ferramentas de predição repercute diretamente na confiabilidade no equipamento. Quanto menos conhecimento sobre as características e anomalias da ionosfera, mais os operadores demonstraram não confiar no equipamento utilizado. Esse dado é determinante para responder à questão de estudo “c”: “Os sistemas em HF

utilizados pelo EB possuem condições de se sobrepor a essas anomalias da ionosfera, superando-as ou se adaptando a condições dinâmicas de propagação?”. Com exceção de problemas pontuais com antenas (diretividade e ganho), a resposta para essa questão é sim, pois quando os equipamentos estão bem instalados e são utilizados em conjunto com ferramentas de predição adequadas, o índice de sucesso nos enlaces é elevado, como ocorre diariamente nas transmissões da RRF. Entretanto, sem planejamento, parecerá de imediato que o equipamento não está transmitindo adequadamente ou possui outros problemas.

A questão de estudo “d” (literatura em manuais e notas de aula militares) indicou que o conteúdo disponível realmente é pouco acessível ou insuficiente, visto que menos de 40% dos operadores tiveram contato com algum conteúdo que abordasse esse tema. O elevado percentual encontrado indica a necessidade de revisão de materiais didáticos militares para maior abarcamento das peculiaridades da ionosfera. Inclusive, ressalta-se que as ferramentas de predição a serem utilizadas são gratuitas e já foram testadas exaustivamente por operadores em todo o mundo (VOACAP e GRAFEX), não sendo necessário desenvolver novos *softwares*. As ferramentas ainda contam com versões *off-line*, não sendo necessário exposição à internet para o seu uso.

Por fim, ressalta-se que as transmissões em HF, mesmo com sua inerente complexidade, compõe um sistema eficaz de comunicações militares. A falta de necessidade de visada direta, de apontamentos precisos, e o baixo custo dos equipamentos tornam esse tipo de transmissão especialmente vocacionado para o meio militar, que exige rapidez e capacidade de adaptação a qualquer tipo de terreno.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, R. F. **Paradigma Tecnológico para o Emprego das Comunicações da Navegação Fluvial Militar na Amazônia**. Tese (Doutorado em Ciências Militares) – Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, 2011.

ALEM, R. M. **Análise e Projeto de Antenas para Sistemas de Comunicações Táticas Pessoais em Florestas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2011.

AMENDOLA, G. V. **Análise do Comportamento da Ionosfera a Partir de Medidas em HF**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2003.

ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT (AGARD). AGARD-AG-326 - **Radio Wave Propagation Modeling, Prediction and Assessment**. North Atlantic Treaty Organization. San Diego, 1990.

BARBOSA, R. G. J. **Sistema Tático de Comunicações de Bda e/ou DE: Estudo para Melhoria das Comunicações Táticas na Faixa HF em Apoio às Operações de Brigada de Infantaria de Selva**. Trabalho de Conclusão de Curso (Aperfeiçoamento em Operações Militares) - Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, Rio de Janeiro, 2000.

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.

BRASIL. Ministério da Defesa. Estado-Maior do Exército. **C 24-18: Emprego do Rádio em Campanha**. 4. ed. Brasília, 1997.

_____. **Portaria nº 302**. Ministério da Integração Nacional. Outubro, 2001.

_____. Exército. Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais. **Pub 11-0-1: Nota de Aula do Curso de Comunicações**. Rio de Janeiro, 2019.

CANNON, P. S. et al. **Damson HF channel characterization – 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.

DAVIES, K. **Ionospheric Radio Propagation**. Washigton: U.S. Government Printing Office, 1966.

DOLUKHANOV, M. **Propagation of Radio Waves**. Moscou: Mir Publishers, 1971.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. United States Army Signal Center and Fort Gordon. **SC:25C – Principles of Radio Wave Propagation**. Ed. B. Georgia, 2005

GIRO (Global Ionosphere Radio Observatory). **DIDBase Fast Station list**. Disponível no site: <<http://giro.uml.edu>>. Acesso em 20/03/2021.

GUYER, S.; CAN Z. **Solar Flare Effects on the Ionosphere**. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Istanbul, 2013.

GLOSSÁRIO de termos. Disponível em: <<https://silo.tips/download/anexo-glossario-de-termos>>. Acesso em 20 maio 2021.

VOACAP: Point to Point. Versão 08.0121W. Greg Hand. U.S.A., 2021.

MAYOR, R. M. **ANT – Antenas e Propagação**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus São José – Santa Catarina. 2016.

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.

MARQUES, A. A. S. **Análise e Verificação Empírica de Modelos de Predição de Frequências para Comunicação em HF em Regiões de Baixa Latitude**. Dissertação de Mestrado Profissional, Universidade de Brasília. Brasília, 2020.

PERKIÖMÄKI, Jari et al. **VOACAP Online for Ham Radio**. Disponível em: <<https://www.voacap.com/hf/>>. Acesso em 20 jun. 2021.

PILLAT, V. G. **Estudo da Ionosfera em Baixas Latitudes através do Modelo Computacional Lion**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do Paraíba. São José do Campos, 2006.

PILLAT, V.; FAGUNDES, P.; GUIMARÃES, L. **Automatically identification of Equatorial Spread-F occurrence on ionograms**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Outubro, 2015.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ITU). **Recommendation ITU-R P. 533-14 – HF Propagation Prediction Method**. Geneva: ITU, 2019.

SWS (Space Weather Services). **Prediction Tools** [Online]. Disponível em: <http://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems/7/1>. Acesso em 10 jun. 2021.

ZOLESI B.; CANDLER L. R. **Ionospheric Prediction and Forecasting**. Roma: Springer Geophysics, 2014.