

Análise e Verificação Empírica de Modelos de Predição para Comunicação em HF em Regiões de Baixa Latitude

Anderson Silva Marques e Paulo Portela de Carvalho

Resumo—Várias ferramentas visando a possibilitar uma comunicação em HF de elevada SNR vêm sendo desenvolvidas, tais como modelos de predição de frequência e a técnica ALE. Porém, porém ainda não há um método padronizado de alocação de frequências no ALE a partir dos modelos de predição. Observa-se também a necessidade de averiguar o impacto em enlaces HF de fenômenos peculiares que acontecem na ionosfera em território brasileiro, como o *Equatorial Spread F* (ESF). Neste trabalho, foi identificado qual modelo de predição melhor se adapta ao território brasileiro com e sem a presença do ESF em uma região de baixa latitude.

Palavras-chave—*Estabelecimento Automático de Enlace, Espalhamento Equatorial da Camada F, Alta Frequência, Frequência Ótima de Trabalho.*

Abstract—Several tools have been developed to enable high SNR HF communications, such as frequency prediction models and the ALE technique. However, there is still no standardized method of allocating frequencies in ALE based on prediction models. There is also a need to ascertain the impact on HF links of peculiar disturbances that happen in the ionosphere in Brazilian territory, such as the *Equatorial Spread F* (ESF). In this work, it was identified which prediction model best adapts to the Brazilian territory with and without the presence of the ESF in a low latitude region.

Keywords—*Automatic Link Establishment, Equatorial Spread F, High Frequency, Frequency of Optimum Transmission.*

I. INTRODUÇÃO

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 território 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.

O canal HF, especialmente quando são realizadas transmissões via ionosfera, pode ser caracterizado como de baixa Razão Sinal-Ruído (SNR), desvanecimento lento e seletivo em frequência [3]. O tempo de atraso devido a múltiplos percursos pode chegar a até 30 ms em baixas latitudes [4], sendo maior que o tempo de símbolo da maioria absoluta das transmissões de dados atuais, o que implica severa interferência intersimbólica (ISI).

Uma das soluções para redução dos problemas típicos de HF é a técnica de Estabelecimento Automático de Enlace (*Automated Link Establishment* - ALE) [5], 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 [6].

Outras técnicas de DSP têm também apresentado resultados notáveis, como as descritas na MIL-STD-188-110C [6], que padroniza uma série de especificações para modems de rádios de comunicações táticas de longa distância. Embora as técnicas apontadas em [6] representem o estado da arte para transmissões 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.

Uma das contribuições deste trabalho é um método para determinação das frequências de operação do ALE, além da análise, a partir de dados empíricos, da acurácia na determinação da Frequência Ótima de Trabalho (FOT) dos modelos de predição de enlace VOACAP [7], do modelo REC533 [8] e da aplicação GRAFEX [9], do *Space Weather Services* (SWS) australiano. 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 uma performance com SNR insuficiente para a comunicação, dessa forma, surge a necessidade de se desenvolver uma metodologia de como 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.

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 o nível de degradação da SNR que o fenômeno provoca, especialmente por haver poucos trabalhos desenvolvidos no sentido de compreender o ESF afeta as comunicações HF em território brasileiro.

Trabalhos semelhantes realizados em outros países, como na Indonésia [12], Paquistão [15] e Inglaterra [16], demonstraram que as ferramentas de predição de frequência, para a Máxima Frequência Utilizável (MUF), possuem baixo erro médio quadrático (RMSE) frente a medições *in loco*, porém estudos mais amplos, envolvendo várias estações do ano e momentos diferentes do ciclo solar, apresentam grandes diferenças [17, 18], em termos de erro médio, dessas frequências.

Dessa forma, este trabalho visa a confrontar os dados dos modelos de predição com medições reais em território brasileiro, onde há grande presença do ESF [10], de forma que esses resultados sejam utilizados em futuros planejamentos de comunicações estratégicas, para Forças Armadas e Defesa Civil, e por redes de iniciativa privada, como as redes HF indígenas [2].

Em síntese, os objetivos deste trabalho são:

1. Avaliar, em um enlace HF real, o nível de erro médio entre

as frequências previstas pelas ferramentas supracitadas e as frequências empíricas, que são sujeitas a perturbações na ionosfera;

2. Avaliar o impacto do fenômeno ESF na degradação da SNR, em território brasileiro, em um enlace HF real.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: na seção II serão apontadas as características essenciais da ionosfera para as transmissões de sinais em radiofrequência, onde será descrito o ESF. Na seção III, será detalhado como foi realizada a campanha de medição. Na seção IV, os resultados obtidos serão discutidos, para, finalmente, serem apresentadas as conclusões do trabalho.

II. PROPAGAÇÃO NA IONOSFERA

A. Características da ionosfera e modelos de predição

Composta por várias camadas de densidades elétricas distintas, a ionosfera é um ambiente dinâmico que, embora possibilite comunicações a longas distâncias, provoca vários efeitos de desvanecimento no sinal transmitido [4].

O processo de reflexão do sinal na ionosfera 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. Em épocas de intensa atividade solar, medida pelo *Sunspot Number* (SSN), há maior presença de elétrons e é possível realizar transmissões em frequências maiores. O valor máximo da frequência de operação é geralmente limitado à chamada frequência crítica (f_c) [20]. Quando há menor nível de irradiação, e até mesmo em horários noturnos, exige-se que as frequências sejam reduzidas, caso contrário, os sinais ultrapassarão a ionosfera para fora da Terra [20].

Ao longo dos anos, foram criados diversos modelos para a determinação da melhor frequência possível de acordo com o mês, localização, intensidade da irradiação solar e outros critérios. Entre as contribuições mais relevantes, destacam-se as aplicações hospedadas no *Institute for Telecommunication Sciences* (ITS) [24], subordinado ao Departamento de Comércio dos EUA, e que são recomendadas pela ITU [8]:

- VOACAP: uma adaptação do *Ionospheric Communications Analysis and Prediction Program* (IONCAP). Possui uma extensa base empírica e diversas versões com correções do seu modelo ao longo de aproximadamente 40 anos;

- REC533: Desenvolvida pela ITU, com melhorias de outras agências, é baseada na Recomendação P.533-14. É o modelo oficialmente recomendado para transmissões ponto a ponto [8].

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 do ITS [23].

Porém, tais modelos são mais bem adaptados a certas regiões do planeta, 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.

B. Espalhamento Equatorial da camada F

Um 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 [11, 19, 20]. Durante a ocorrência desse fenômeno, a camada F se torna difusa e provoca espalhamento do sinal. Em um ionograma sem a presença do fenômeno ESF, Fig. 1 (a), uma 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. Por outro lado, quando há a ocorrência do ESF, a camada F se torna difusa

e provoca espalhamento do sinal, conforme ilustra a Fig.1 (b), em que é possível observar diversos pontos de reflexão distintos para a mesma altura da ionosfera. As cores diferentes indicam, em linhas gerais, o ângulo de chegada do raio após a reflexão e a influência do campo magnético terrestre em seu percurso.

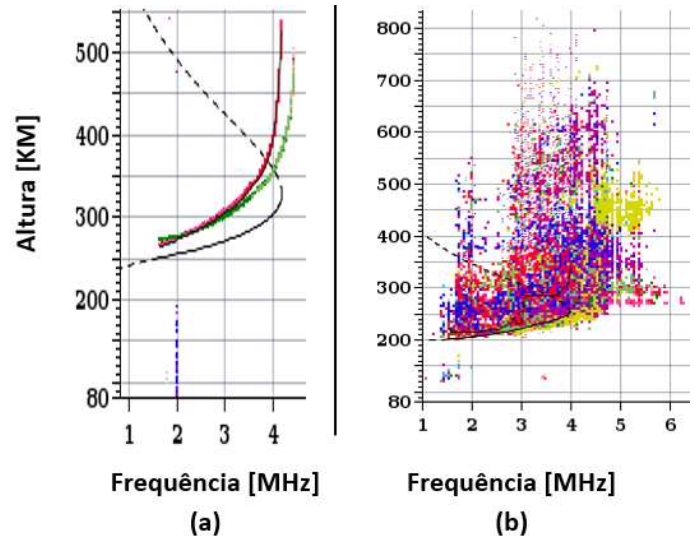


Fig. 1. Ionograma regular (a) comparado a um ionograma onde foi detectado o ESF na ionossonda de São Luís-MA (b) [21].

O fenômeno manifesta-se especialmente em períodos noturnos e pode levar à indisponibilidade de sistemas HF. Sua extensão também é variável, podendo alcançar centenas de quilômetros 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 [22].

III. CAMPANHA DE MEDIÇÃO

Para avaliar a precisão dos resultados fornecidos pelas ferramentas de predição e o impacto do ESF em um enlace HF, em território brasileiro, este trabalho realizará uma campanha de medição seguindo padronizações recomendadas na ITU-R F.1148-1 [24], porém, além da avaliação de cada modelo para comparação das SNR previstas com dados coletados em campanha, foi identificado o modelo de predição que proporciona o menor erro médio quadrático entre as frequências previstas e a melhor frequência de transmissão, obtida empiricamente, embasando-se nos escores das técnica ALE, que permitem identificar a frequência que garante a maior SNR, denominada neste trabalho f_m .

Quanto ao ESF, para que o fenômeno seja averiguado será necessário escolher duas localidades próximas do Equador Magnético, local de maior intensidade da anomalia, e que haja ionossondas em suas proximidades, de forma que seja possível detectar o ESF no momento de sua ocorrência através da observação de ionogramas.

Levando-se em consideração todos os pontos anteriormente discutidos e visando adequar-se à Recomendação ITU-R P.533-14 [24], a campanha foi estruturada observando os passos descritos na Tabela I a seguir.

TABELA I
PARÂMETROS DA CAMPANHA E VALORES OBTIDOS

Parâmetros	Requisitos	Valores obtidos
Localização das estações	a) 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;	- Cidades escolhidas: Brasília-DF e Cristalina-GO, distantes entre si

Parâmetros	Requisitos	Valores obtidos
	b) 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; c) Deve ser em área do território brasileiro em que ocorra o fenômeno do ESF; e d) Deve haver ionossonda disponível próxima à região do enlace para detecção do ESF.	120 km, o que permite somente enlaces via ionosfera; - Ionossonda próxima disponível Cachoeira Paulista-SP.
Dias e horários para execução dos testes	a) Não deve haver tempestades magnéticas ou intensas explosões solares que possam ocasionar perturbações na ionosfera e/ou aumentar o desvio Doppler [25], de forma que o principal fenômeno a ser explorado seja o ESF e não tempestades magnéticas; b) 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.	- Período escolhido sem perturbações geomagnéticas: 17 a 21 de fevereiro de 2020; - Intervalos de 120 minutos.
Modelos sob análise e suas frequências a serem observadas	a) Os softwares 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 b) 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, satisfazer um dos objetivos desta campanha, que é incrementar a taxa de sucesso, e a disponibilidade, de sistemas HF.	- 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 [26], ou seja, é aquela que possui o maior índice de disponibilidade.
Método de avaliação dos modelos de predição	a) A cada horário de teste, deverá ser observado: o RMSE entre as frequências preditas e a melhor frequência em termos de escores da técnica ALE.	- Os RMSE entre as frequências preditas e empíricas de cada modelo estão Tabela III.
ALE	a) O ALE, neste trabalho, deverá ser 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 empíricas.	- As frequências utilizadas no ALE englobaram as frequências preditas de todos os modelos.

A Eq. 1, que é utilizada para calcular o desvio padrão (σ_j), ou o RMSE, entre as frequências preditas e empíricas, citada na Tabela I está descrita a seguir [24],

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - m_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n (p_i - m_i))^2}{n}}{n - 1}} \quad (1)$$

em que p_i são os valores de frequências preditas em cada modelo, m_i é a melhor frequência observada em campo através do ALE, n é o número de amostras de todos os horários. O subíndice i refere-se aos diferentes horários de medição ao longo de toda a campanha. O subíndice j refere-se aos modelos de predição, no total de 3. Todos os resultados estão na Tabela III.

A Tabela II apresenta os dados que foram utilizados nos modelos sob análise para obtenção das frequências preditas, as FOT (conforme definido na Tabela I).

TABELA II
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
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 (Smoothed Sunspot Number)	4	Intensidade de radiação solar.
SNR requerida (dB-Hz)	45	SNR em dB-Hz, equivalente a 10 dB para um canal de 3 kHz.
Potência (W)	20	Máxima possível do equipamento.
Antena	Harris 1940	Os dados de potência por ângulo de radiação foram levados em conta no enlace de acordo com a antena do fabricante.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

A. RMSE dos conjuntos de frequências

Utilizando os dados da Tabela II, foram obtidas todas as frequências preditas de cada modelo, variáveis A, B e C. Já a média das f_m (variável D) foi obtida através da campanha de medições empíricas, onde, a cada 2 horas, foram observadas as melhores frequências avaliadas através dos escores da técnica ALE, em todos os dias da campanha. A seção “B” apresenta o intervalo de confiança dessa média calculado a partir da distribuição t-Student.

Observa-se, a partir da Tabela III, 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 D). As FOT obtidas por meio do VOACAP apresentaram RMSE menor do que as FOT obtidas por meio do REC533 e do GRAFEX. A aplicação de fato recomendada pela ITS para predições ponto a ponto, REC533, obteve 1,53 MHz de desvio padrão (B vs D).

TABELA III
RMSE ENTRE OS MODELOS DE PREDIÇÃO E A MÉDIA DAS f_m

Hora Local (h)	A (MHz) VOACAP	B (MHz) REC533	C (MHz) GRAFEX	D (MHz) f_m	RMSE A vs D (MHz)	RMSE B vs D (MHz)	RMSE C vs D (MHz)
1	3,90	5,17	3,70	4,95	1,10	0,05	1,56
3	3,10	4,01	2,70	3,93	0,68	0,01	1,51
5	2,40	2,85	1,70	2,14	0,07	0,51	0,19
7	4,00	5,02	3,80	4,60	0,36	0,18	0,64
9	5,40	6,77	5,10	5,23	0,03	2,36	0,02
11	5,50	6,97	5,30	5,50	0,00	2,16	0,04
13	6,10	7,80	5,80	6,41	0,09	1,95	0,37
15	6,50	8,21	6,90	7,15	0,42	1,12	0,06
17	7,30	9,06	7,00	9,86	6,53	0,63	8,15
19	6,60	7,96	6,00	5,40	1,45	6,57	0,36
21	5,80	7,54	5,10	4,74	1,12	7,84	0,13
23	5,00	6,59	4,60	4,41	0,35	4,75	0,04
					1,01	1,53	1,04

A, B e C: FOT obtidas no VOACAP, REC533 e GRAFEX, respectivamente, com dados da Tabela II; D: média das f_m .

B. Comparações entre FOT do VOACAP e média das f_m

Na Fig. 2, 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 operação do enlace. Às 17h00, por exemplo, a diferença entre FOT e média das f_m estava acima de 2 MHz, o que reduziu sensivelmente os escores da técnica ALE no enlace.

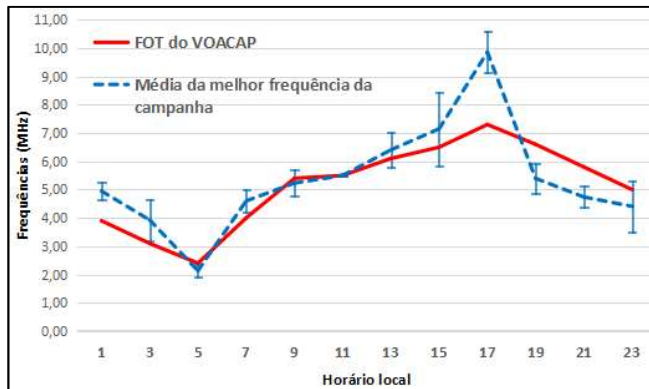


Fig. 2. FOT do VOACAP e a média das f_m por horário.

Conforme Fig. 3, 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 no 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 baixo *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. Ou seja, somente entre 01h00 e 09h00, foi possível obter uma SNR satisfatória (acima de 3 dB) utilizando a FOT predita pelo VOACAP.

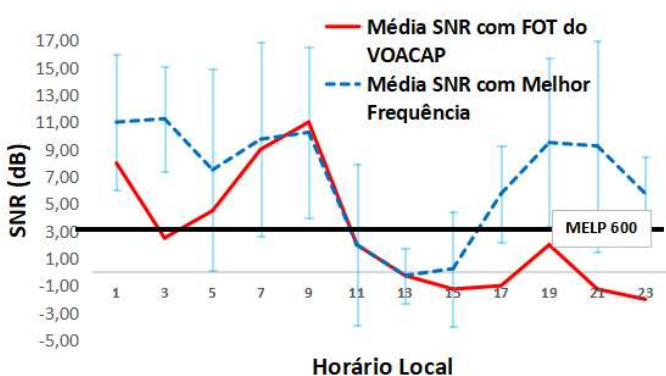


Fig. 3. SNR com a FOT do VOACAP e a SNR com a média das f_m .

D. 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 título de exemplo, a Fig. 4 apresenta os ionogramas dos dias 18 e 21 de fev. de 2020, às 05h00 AM, onde é possível visualizar a perturbação nas camadas da ionosfera, semelhante à Fig. 1, devido ao ESF.

Na Fig. 5, é possível observar a média da SNR dos horários em que não houve o fenômeno (variável A) e a média da SNR dos horários em que houve (variável B), juntamente com o

intervalo de confiança dessas médias, medido pela distribuição t-Student e com nível de confiança de 90% para cada medida. Houve uma queda de 34,04% de A para B, o que demonstra o impacto da anomalia ESF nos enlaces.

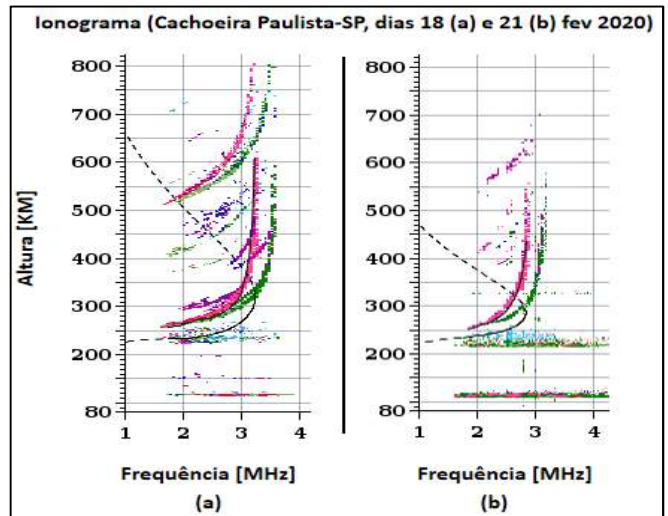


Fig. 4. ESF às 05h00 AM (local), nos dias 18 (a) e 21 (b) de fev. de 2020 [21].

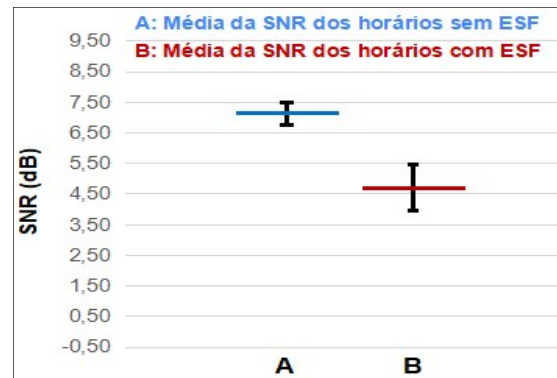


Fig. 5. Queda de 34,04% na média da SNR na presença de ESF.

Observou-se também que a média da SNR nesse tipo de enlace, 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.

Os horários em que o fenômeno foi detectado, 23h00; 01h00; 03h00 e 05h00, estão de acordo com o seu comportamento noturno descrito na literatura [17, 18]. Esse comportamento deve ser levado em consideração no planejamento de um sistema HF, pois esses sistemas já possuem, costumeiramente, uma SNR próxima de 0 [3]. 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. Através da campanha de medições, percebeu-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.

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 (fev. 2020), só havia 6 ionossondas disponíveis para consulta em todo o território nacional: Boa Vista, Belém, Fortaleza, São Luiz, Cachoeira Paulista e Santa Maria [21].

V. 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 desses enlaces.

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.

Com relação ao fenômeno ESF, verificou-se na prática o seu efeito na degradação da SNR, tendo sido observado 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 [19]. Esse trabalho demonstrou ainda a importância da existência de ionossondas na região em que se instala um enlace em HF, que permitam a identificação com maior precisão do fenômeno ESF, de forma a apoiar o operador do enlace em suas tomadas de decisão.

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 [14, 27].

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Exército Brasileiro pelas contribuições, por intermédio da Escola de Comunicações, para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Obreja. "Radioworld. Does Shortwave Have a Future?" [Online]. Disponível em: <https://www.radioworld.com/>. Acesso em 25 de fevereiro de 2020.
- [2] 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] P. S., Cannon 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.
- [4] 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, Genebra, Suíça, maio 2000.
- [5] P. Eliardsson, E. Axell, P. Stenumgaard, K. Wiklundh, B. Johansson and B. Asp, "Military HF communications considering unintentional platform-generated electromagnetic interference", 2015 International C. on Military C. and Information Systems (ICMCIS), Cracow, 2015, pp.1-6.
- [6] Department of D. Interface Standard. MIL-STD-188-110C. "Interoperability and Performance Standards for Data Modems." Oklahoma, 2011.
- [7] T. Lombry. "Review of HF propagation analysis e prediction programs". [Online]. Disponível em: <http://www.astrosurf.com/luxorion/qs-l-review-propagation-software.htm>. Acesso em 20 de fevereiro de 2020.
- [8] ITU (International Telecommunication Union). "Recommendation ITU-R P.533-14." ITU R. Study Group, Genebra, Suíça, agosto 2019.
- [9] Space Weather Services, "Prediction Tools" [Online]. Disponível em: http://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems/7/1. Acesso em 05 de fev. de 2020.
- [10] Pillat, V. & Fagundes, P. & Guimarães, Lamartine. "Automatically identification of Equatorial Spread-F occurrence on ionograms." Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Outubro 2015.
- [11] 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.
- [12] T. Dutono 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.
- [13] M. Ahmad, I. Rashid and N. Ahmad, "Validation of MUF and FOT parameters for plain, mountainous and sea region," 2015 International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT), Karachi, 2015, pp.1-6.
- [14] J. Stocker, M. Muriuki and 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.
- [15] R. Athieno, P. T. Jayachandran, D. R. Themens and 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, June 2015.
- [16] L. F. McNamara, R. J. Barton and T. W. Bullett, "Analysis of HF signal power observations on two North American circuits," in Radio Science, vol. 41, no. 05, pp. 1-17, Oct. 2006.
- [17] Woodman, R. "Spread F—An old equatorial aeronomy problem finally resolved?" *Annales Geophysicae*. 27. 10.5194/angeo-27-1915-2009.
- [18] Pillat, P. Fagundes, L. Frutuoso "Automatically identification of Equatorial Spread-F occurrence on ionograms", Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 135, 2015, Pages 118-125.
- [19] Zolesi, L. R. Cander. "Ionospheric Prediction and Forecasting." Springer Geophysics. Roma, 2014.
- [20] Davies, K. "Ionospheric Radio Propagation". U.S. Department of Commerce. U.S. Government. Dover Publications, 1966.
- [21] GIRO. "Global Ionosphere Radio Observatory" [Online]. Disponível em: <http://giro.uml.edu>. Acesso em 05 de janeiro de 2020.
- [22] ITS, "High Frequency Propagation Models." [Online]. Disponível em: <https://www.its.bldrdoc.gov/resources/radio-propagation-software/high-frequency/hig-h-frequency-propagation-models.aspx>. Acesso em 21 jan. 2020.
- [23] Space Weather Services, "T Index FAQ." [Online]. Disponível em: <https://www.sws.bom.gov.au/Educational/5/2/1>. Acesso em 05 de fev. de 2020.
- [24] ITU (International Telecommunication Union). "Recommendation ITU-R F.1148-1." ITU Radiocommunication Study Group, Genebra, maio 1997.
- [25] Space Weather Prediction Center. "Planetary K-Index". [Online]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov>. Acesso em 17 de fevereiro de 2020.
- [26] VOACAP. "Running HPF-MUF-FOT graph." [Online]. Disponível em: <https://www.voacap.com/mufdays.html>. Acesso em 17 de fevereiro de 2020.
- [27] J. S. Naylor, E. M. Warrington, N. Y. Zaalov and A. J. Stocker, "HF propagation modelling within the polar ionosphere," 12th IET International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques (IRST 2012), York, 2012, pp. 1-5.