

CICAD.I.2018

ARTIGO CIENTÍFICO ÁREA DE CONCENTRAÇÃO



ENG. ELÉTRICA TELECOMUNICAÇÕES

USO ESTRATÉGICO DE DADOS DE IONOSSONDAS PARA COMUNICAÇÕES DIGITAIS EM ALTA FREQUÊNCIA (HF)

VÍTOR OSSAMU RODRIGUES OKAMURA¹, PLÍNIO RICARDO GANIME ALVES²
Graduando em Engenharia Elétrica¹, Doutor em Engenharia Elétrica²

RESUMO: ESTE PROJETO APRESENTA UM MÉTODO COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAR TRANSMISSÕES DE RÁDIO DE LONGA DISTÂNCIA EM ALTA FREQUÊNCIA. PARA COMUNICAÇÕES DE ALTA FREQUÊNCIA, GERALMENTE SE FAZ USO DE PREVISÕES IONOSFÉRICAS MENSAS QUE, DEVIDO À ANOMALIA IONOSFÉRICA EQUATORIAL, NÃO POSSUEM EXATIDÃO SATISFATÓRIA EM REGIÕES DE BAIXA LATITUDE, TORNANDO IMPRATICÁVEL SEU USO EM GRANDES PORÇÕES DO SOLO BRASILEIRO. A INICIATIVA VISA APRESENTAR UM PROCEDIMENTO ALTERNATIVO PARA TORNAR ESTAS COMUNICAÇÕES EFICIENTES NESTAS REGIÕES DO GLOBO. AO USAR DADOS EM TEMPO REAL DE IONOSSONDAS, É POSSÍVEL APERFEIÇOAR ESTAS TRANSMISSÕES CALCULANDO E AJUSTANDO INSTANTANEAMENTE SEUS PARÂMETROS CRUCIAIS: A FREQUÊNCIA MÁXIMA E O ÂNGULO DE TAKE-OFF DA ANTENA. O TRABALHO BUSCA OFERECER UM PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL EFICIENTE, FEITO EM C++ E BASEADO EM INTERPOLAÇÕES E ANÁLISE GRÁFICA DE IONOGRAMAS, PARA REALIZAR OS CÁLCULOS DESSAS GRANDEZAS COM ALTA PRECISÃO E UM ALGORITMO PARA LIDAR COM AS INTERRUPÇÕES DE LONGO PRAZO DO FUNCIONAMENTO DAS IONOSSONDAS, SELECIONANDO DADOS ANTERIORES CONGRUENTES COM A HORA E A ÉPOCA DO ANO ATUAIS. COM O APRIMORAMENTO DAS TRANSMISSÕES EM ALTA FREQUÊNCIA POR MEIO DA PROPOSTA DO PROJETO, BUSCA-SE VIABILIZAR O USO DO PADRÃO DIGITAL RADIO MONDIALE (DRM) DE RÁDIO, QUE POSSIBILITARIA COMUNICAÇÕES MULTIMÍDIA ACESSÍVEIS E SEGURAS, DE GRANDE APLICAÇÃO ESTRATÉGICA MILITAR E CIVIL, POR TODO O TERRITÓRIO NACIONAL.

PALAVRAS-CHAVE: DIGITAL RADIO MONDIALE. TRANSMISSÕES DE RÁDIO. ALTA FREQUÊNCIA. IONOSSONDA. C++.

INTRODUÇÃO

Comunicações em alta frequência (HF) são costumeiramente baseadas em previsões ionosféricas mensais. Este método é pouco efetivo e utilizável em regiões de baixa latitude devido à anomalia de ionização equatorial (EIA), que faz com que mesmo previsões em curto prazo da camada ionosférica se tornem imprecisas, por causa da natureza caótica do fenômeno.

O objetivo do projeto é apresentar uma alternativa viável a estas previsões mensais usando dados em tempo real fornecidos por ionossondas para ajustar instantaneamente os parâmetros de transmissão, de forma a tornar comunicações de alta qualidade pelo padrão DRM em alta frequência realizáveis e eficientes para longas distâncias.

Possibilitar o uso eficaz desta tecnologia abre o caminho para diversas aplicações estratégicas. Ela é capaz de prover um canal

seguro de comunicações para as partes mais remotas do território nacional, possibilitando uma forma econômica e confiável de coordenar e transmitir informações a operações militares na fronteira, entre outros usos.

O DRM é um padrão de rádio versátil, eficiente e de alta qualidade, livre de taxas de licenciamento devido à sua natureza livre, o que torna bastante desejável seu uso em várias aplicações civis, tais como prevenção de desastres, educação a distância e jornalismo multimídia, conforme avança a sua acessibilidade.

1 METODOLOGIA

1.1 CÁLCULO DE PARÂMETROS POR MEIO DE IONOGRAMAS

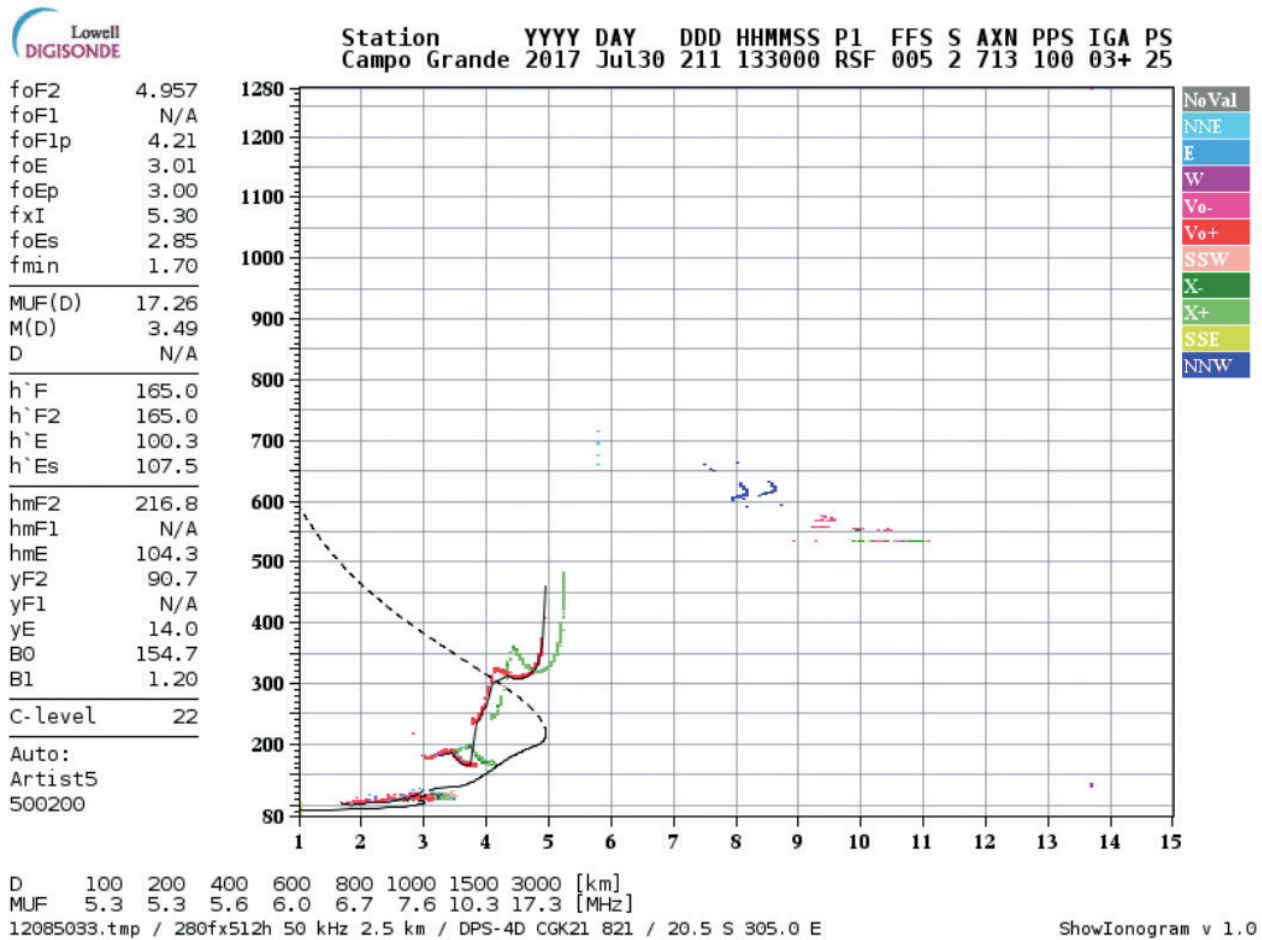
Queremos otimizar uma transmissão, entre dois pontos na superfície, separados por uma distância D , num dado horário, de rádio em alta frequência, rebatendo na camada io-



nosférica da atmosfera. Supomos que dispomos do ionograma (Figura 1) no ponto médio

exato entre a origem do sinal (a antena transmissora) e o destino (a antena receptora).

FIGURA 1 Ionograma registrado pela ionossonda de Campo Grande no dia 30 de julho de 2017 às 13h30 UTC (09h30 no horário local).



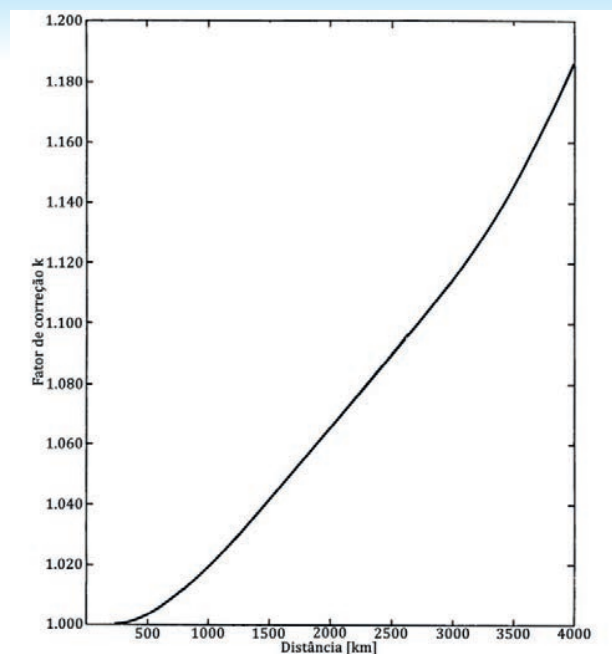
Fonte: GLOBAL IONOSPHERIC RADIO OBSERVATORY. Digital Ionogram DataBase. (2018)^[2]

O ionograma nos fornece a altura virtual h' no ponto analisado em função da frequência f_v de uma onda vertical, aplicada perpendicularmente à ionosfera: esta é a curva $h' \times f$, mostrada em vermelho no ionograma. Para uma propagação oblíqua, a frequência f_{ob} da transmissão é dada por

A constante k é um fator de correção, cujo valor depende da distância D e é obtido empiricamente (Figura 2).

$$f_{ob} = kf_v \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2h'}\right)^2} \quad (1)$$

FIGURA 2 Fator de correção k em função da distância D .



Fonte: DAVIES, K. Ionospheric Radio Propagation. (1965)^[1].



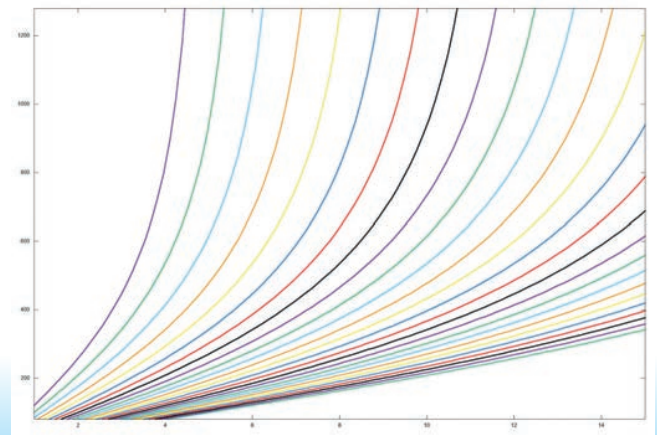
A máxima frequência utilizável, a MUF, é o valor máximo de f_{ob} para a distância D entre os dois pontos de transmissão. Manipulando a equação para deixarmos em evidência h' , teremos

$$h' = \frac{D}{2x\sqrt{\left(\frac{MUF(D)}{kf_v}\right)^2 - 1}} \quad (2)$$

Logo, a partir da distância D e do ionograma fornecido podemos obter a MUF da transmissão e h' para a transmissão de uma forma exata: criamos uma família de curvas (Figura 3) para um dado D variando o valor da MUF e a sobrepomos sobre o ionograma (Figura 4). O valor certo da MUF será o da curva

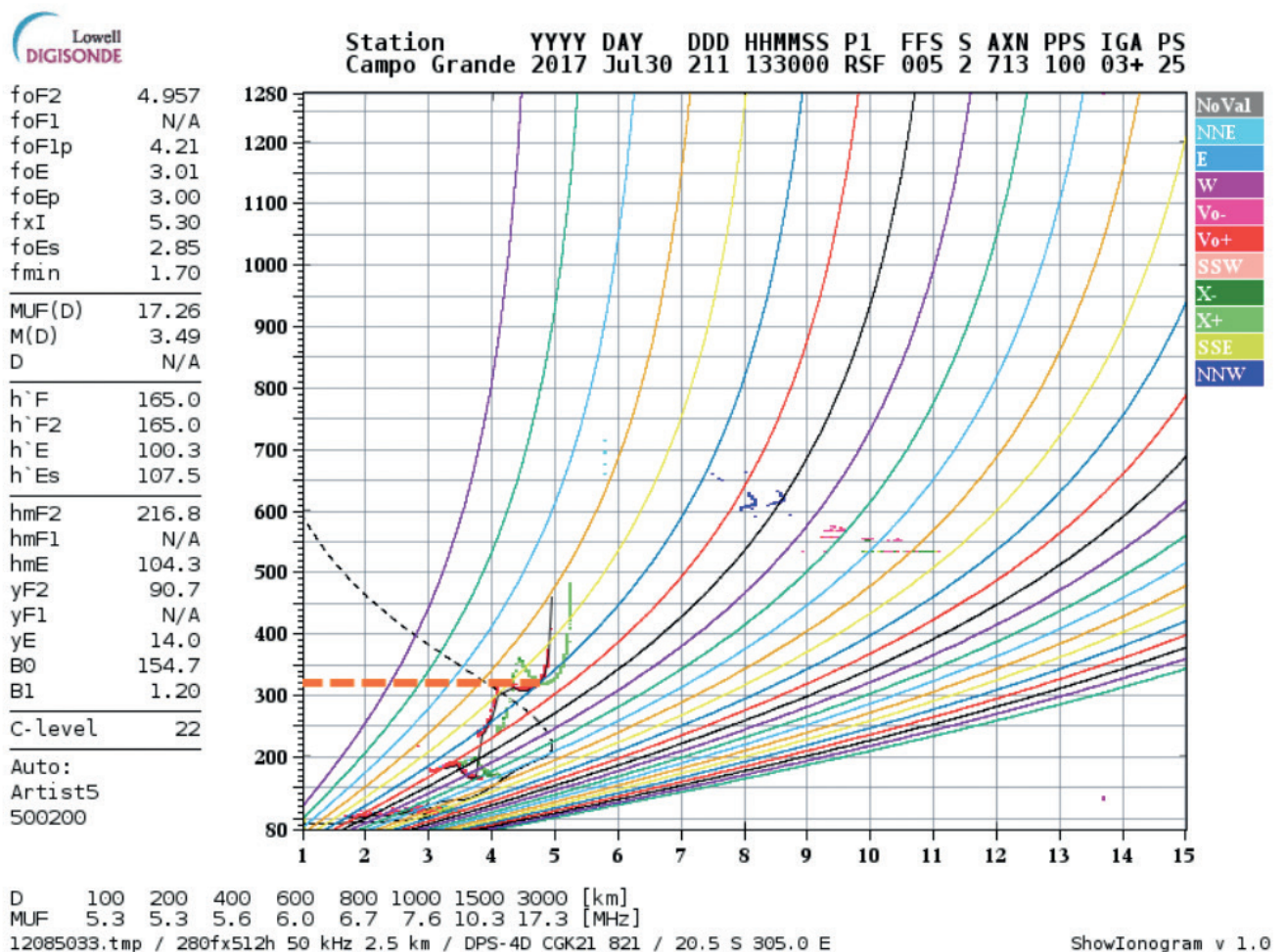
que tangenciar $h' \times f$; o valor de h' para a frequência da MUF será, obviamente, o valor da altura para o ponto encontrado.

FIGURA 3 Família de curvas para uma distância $D=1447.34\text{Km}$.



Fonte: o autor, 2018.

FIGURA 4 A curva para MUF=10Mhz é a que tangencia $h' \times f$, logo $MUF(2000)=10\text{Mhz}$. O ponto de tangência está em $h'=320\text{ Km}$.



Fonte: o autor, 2018.

A partir de análise geométrica simples, conhecendo a altura virtual h' determinamos o ângulo de take-off Δ necessário para configurar a antena por meio de

$$\Delta = \tan^{-1} \left(\frac{h' + r \left(1 - \cos \frac{90D}{\pi r} \right)}{r \sin \frac{90D}{\pi r}} \right) - \frac{90D}{\pi r}, \quad (3)$$



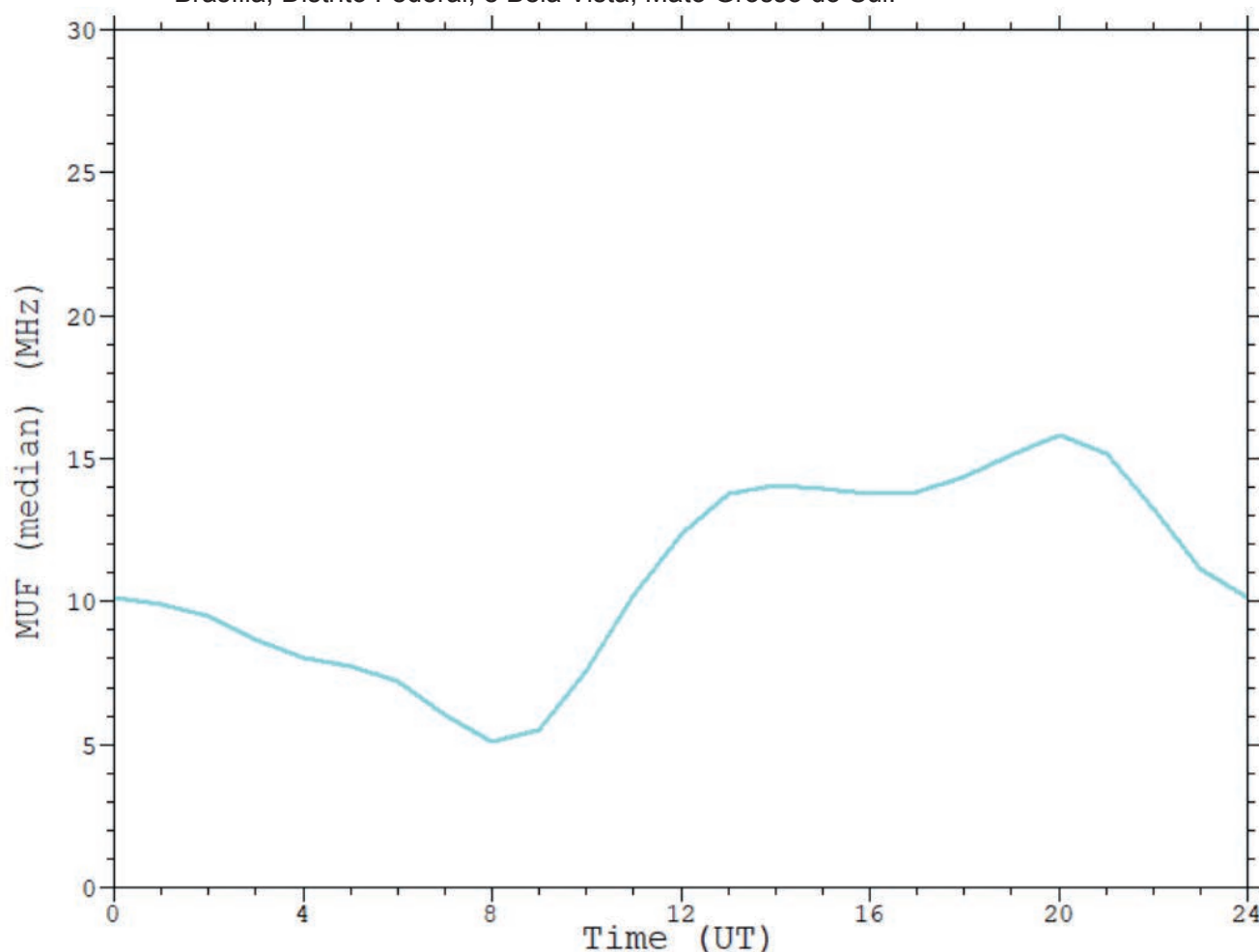
em que D é a distância entre os dois pontos de transmissão e r é o raio da Terra.

1.2 MÉTODO DAS MÉDIAS MENS AIS

É trabalhoso realizar esta análise gráfica dos ionogramas, que são atualizados a cada dez minutos. Em locais onde seu comportamento é mais previsível e periódico ao longo de um grande período de tempo, como em altas latitudes, costuma-se optar por fazer previsões médias mensais, que sob essas condições são capazes de fornecer com exatidão satisfatória os parâmetros desejados.

Por meio de programas específicos para predição das condições na ionosfera, somos capazes de realizar o cálculo de um valor médio de medidas variadas (como a MUF na Figura 5) para um período no tempo longo (de um mês, no mínimo). Eles, no entanto, requerem a inserção de novas variáveis, como o valor médio do número de manchas solares (SSN), uma grandeza que pode apresentar grande variância entre dois dias diferentes. Para os cálculos comparativos, foi utilizado o Voice of America Coverage Analysis Program (VOACAP).

FIGURA 5 Previsão para o mês de julho ($SSN=18$) para o valor da MUF para uma transmissão entre Brasília, Distrito Federal, e Bela Vista, Mato Grosso do Sul.



Fonte: o autor (2018).

Devido à anomalia de ionização equatorial (EIA), no entanto, o valor da MUF possui grande variância entre os dias de um mesmo mês. Devido a isso, a média mensal entregue por esses métodos pode se mostrar inadequada e subótima.

1.3 MÉTODO COMPUTACIONAL PROPOSTO

Analisar manualmente os ionogramas vai resultar na solução certa mas é um método custoso e trabalhoso; fazer uso de médias mensais pode-se provar pouco prático quando se há grande variância entre os dias. Propo-

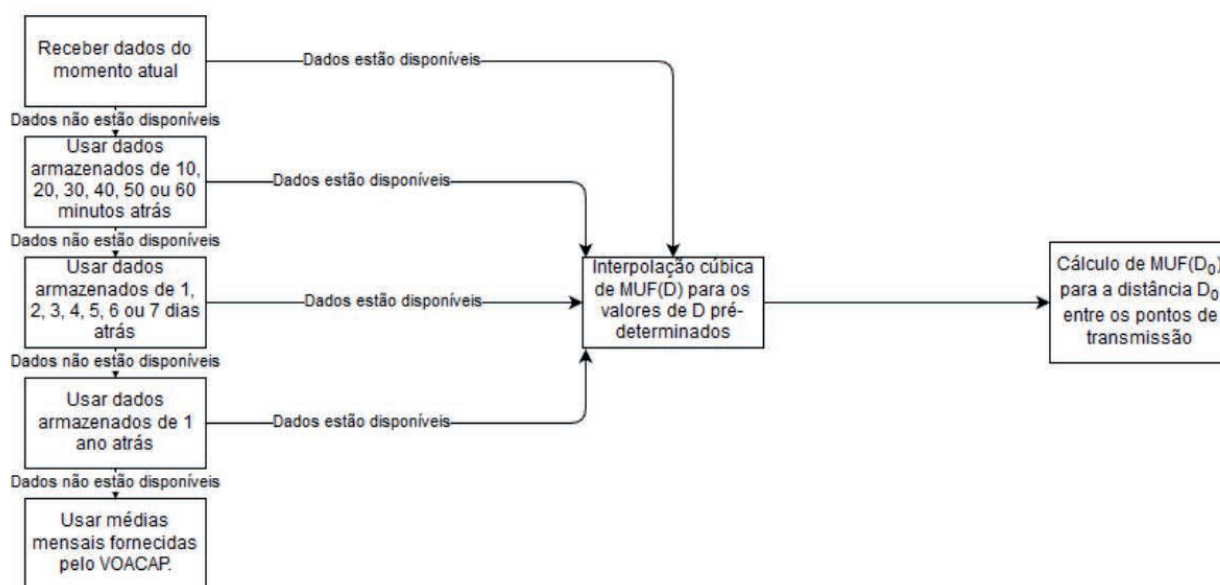
mos, portanto, um método computacional semiautomático que se encarregue de obter automaticamente o valor da *MUF* por meio dos dados fornecidos pelas ionossondas.

O método proposto, como se verifica, é facilmente usado em qualquer ocasião sem os parâmetros adicionais exigidos pelo método das médias mensais. No entanto, assim como a análise manual, exige que haja dados satisfatórios sobre a posição do ponto médio entre as duas pontas da transmissão — certamente, nem sempre vai haver uma ionossonda exatamente neste ponto médio, mas havendo uma perto o suficiente, podemos usar seus dados e

aproximá-los como sendo do tal ponto médio.

A ionossonda fornece o valor aproximado de *MUF(D)* para um conjunto pré-determinado de distâncias *D*. A partir de uma interpolação por spline cúbica, podemos obter uma medição razoável para o valor de *MUF(D₀)*, em que *D₀*=1.147,34 km é a distância entre Brasília e Bela Vista. Não é raro, entretanto, que a ionossonda se encontre inoperante durante períodos extensos de tempo. Neste caso, o algoritmo toma como base os dados de momentos anteriores no tempo, de acordo com a validade da aproximação destes dados com os atuais (Figura 6).

FIGURA 6 Diagrama de ações do algoritmo proposto.



Fonte: o autor, 2017.

1.4 COMPARAÇÃO

Pretendemos comparar a eficiência do algoritmo computacional elaborado com as médias mensais, usando como parâmetro de referência a análise manual dos ionogramas. Para isso, aplicamos as três técnicas anteriormente mencionadas para calcular a *MUF* de uma comunicação entre Brasília e Bela Vista, na região de fronteira do Mato Grosso do Sul com o Paraguai, de forma a simular uma situação real de comunicação do Exército. Disparamos de uma ionossonda de Campo Grande, Mato Grosso do Sul — a cidade se encontra

perto o suficiente do ponto médio do caminho entre o ponto de transmissão e o de recepção para considerar que a aproximação é relevante.

Usamos, como amostras, as medições de 9h30 às 19h30, em intervalos de duas horas, de quatro dias diferentes, espaçados por três meses entre si para representarem as quatro estações. Dessa forma, desejamos mostrar o efeito da EIA, cuja intensidade depende da incidência solar e, portanto, do momento do ano, no método das médias mensais.



2 RESULTADOS

Para caráter ilustrativo, tabelamos os valores da *MUF* para uma transmissão entre Brasília, Distrito Federal e Bela Vista, Mato Grosso do Sul ($D=1.147,34$ Km) encontrados por meio da análise manual do ionograma, do

cálculo da média mensal por meio do VOACAP e da interpolação dos valores padronizados de *MUF* fornecidos pela ionossondas, junto com as variações relativas Δ dos dois últimos métodos em relação ao primeiro método, o de referência. Além disso, calculamos o parâmetro h' pelo primeiro e segundo método.

2.1 VERÃO

TABELA 1 Amostras recolhidas para o dia 31 de janeiro de 2017

Hora Local	Ionograma		VOACAP (SSN=26)			Interpolação	
	h' [Km]	MUF(D) [Mhz]	h' [Km]	MUF(D) [Mhz]	Δ (%)	MUF(D) [Mhz]	Δ (%)
9h30	400	10.0	423	11.6	16.0	9.22	7.8
11h30	600	8.3	492	10.7	28.9	9.70	16.9
13h30	500	12.4	489	11.8	4.8	12.17	1.9
15h30	420	17.8	443	13.7	23.0	16.40	7.9
17h30	390	28.0	400	16.1	42.5	21.90	21.7
19h30	280	16.5	388	15.2	7.9	13.12	20.5

Fonte: o autor, 2018.

2.2 OUTONO

TABELA 2 Amostras recolhidas para o dia 30 de abril de 2017

Hora Local	Ionograma		VOACAP (SSN=32)			Interpolação	
	h' [Km]	MUF(D) [Mhz]	h' [Km]	MUF(D) [Mhz]	Δ (%)	MUF(D) [Mhz]	Δ (%)
9h30	330	14.0	469	11.3	19.2	11.81	15.6
11h30	310	21.3	505	11.2	47.4	17.47	18.0
13h30	380	17.5	471	12.9	26.3	15.70	10.3
15h30	310	23.3	425	15.2	34.8	19.14	17.9
17h30	300	16.0	395	16.3	1.9	11.65	27.2
19h30	290	8.2	404	14.2	73.2	5.98	27.1

Fonte: o autor, 2018.

2.3 INVERNO

TABELA 3 Amostras recolhidas para o dia 30 de julho de 2017

Hora Local	Ionograma		VOACAP (SSN=18)			Interpolação	
	h' [Km]	MUF(D) [Mhz]	h' [Km]	MUF(D) [Mhz]	Δ (%)	MUF(D) [Mhz]	Δ (%)
9h30	320	10.0	327	13.8	38	8.36	16.4
11h30	280	12.0	357	13.9	15.8	9.29	22.6
13h30	330	11.0	364	13.8	25.5	9.31	15.4
15h30	290	10.5	351	15.1	43.8	8.37	20.3
17h30	260	11.0	323	15.2	38.2	8.27	24.2
19h30	270	6.3	314	11.1	76.2	4.83	23.3

Fonte: o autor, 2018.



2.4 PRIMAVERA

TABELA 4 Amostras recolhidas para o dia 30 de outubro de 2017

Hora Local	Ionograma		VOACAP (SSN=13)			Interpolação	
	h'[Km]	MUF(D) [Mhz]	h'[Km]	MUF(D) [Mhz]	Δ (%)	MUF(D) [Mhz]	Δ (%)
9h30	340	13.0	362	13.8	6.15	11.13	14.4
11h30	480	12.3	427	13.0	5.7	11.88	3.4
13h30	410	16.6	417	15.0	9.6	15.29	7.9
15h30	340	22.0	390	17.0	22.7	18.73	14.8
17h30	350	20.0	378	19.6	2.0	17.15	14.2
19h30	290	26.0	356	19.6	24.6	20.66	20.5

Fonte: o autor, 2018.

3 DISCUSSÕES

Notamos nos quatro conjuntos de dados que o erro cometido pelo terceiro método é mais estável, poucas vezes ultrapassando a marca de 20% e nunca passando de 30%. Enquanto isso, o do segundo método flutua em demasia — sendo um parâmetro adequado somente para uma análise mensal sem consideração pela grande variância dos valores entre os dias, sua eficácia varia muito. Por vezes, ele é mais certo que o método proposto, mas muito frequentemente o erro cometido é demasiado grande, passando várias vezes de 20%.

A *MUF* denota a máxima frequência utilizável — isto é, transmissões realizadas acima dessa frequência não são refletidas pela ionosfera de volta à superfície, e a informação não chega ao seu destino. Somente em uma ocasião o terceiro método retorna uma frequência maior que a de referência, enquanto isto ocorre bastante com o segundo método, revelando um problema crítico deste.

Notamos uma estabilidade do valor da *MUF* no período do inverno, ou seja, quando a incidência solar é menos intensa e a EIA não interfere tanto na transmissão. O terceiro método não é tão eficiente neste período, mas atinge sua maior estabilidade em relação ao erro cometido. O contrário acontece no verão, onde o valor da *MUF* flutua mais — e o erro também.

CONCLUSÕES

Otimizar a frequência de transmissão

de forma regular e eficiente é um passo importante na melhoria das comunicações de rádio em alta frequência para a popularização do padrão DRM, que demanda transmissões de alta qualidade, em território nacional. Por ser um padrão digital, ele exige uma taxa de transmissão de dados relativamente grande; saber aumentar essa taxa sem introduzir dano ao sinal é um avanço notável.

O método computacional proposto constitui uma melhoria palpável em relação ao das médias mensais, que, como notamos, é incapaz de lidar com as grandes variâncias entre os dias devido à EIA. Por utilizar dados em tempo real, os resultados do método proposto são pouco afetados pela variância entre os dias; por ser um método automatizado, ele é prático, eficiente e confiável.

É preciso realçar a facilidade proporcionada pela linguagem de programação C++ para implementar o algoritmo proposto. Sua ampla aceitação no meio acadêmico e profissional não só permite a avaliação de pares mas também proporciona, junto ao grande controle que a linguagem dá aos seus usuários, uma enorme gama de livrarias públicas existentes para ela, permitindo mais possibilidades de executar o programa envisioned.

É um desafio, para o futuro, implementar um algoritmo para calcular a altura virtual da atmosfera, algo ainda não atingido pelo método proposto, sendo necessário ainda confiar no método das médias mensais, com todas as



suas falhas, para isto. O ângulo de take-off da antena transmissora é um parâmetro importante para aprimorar a eficiência de potência das transmissões, e é um passo interessante que se desenvolvam soluções nesta direção.

Acreditamos que a viabilização do padrão DRM representa uma nova geração do rádio, com diversas e interessantes aplicações civis e militares, e que a pesquisa contribui de forma fundamental para que estas possibilidades materializem-se em território nacional.

STRATEGIC USE OF IONOSSOND DATA FOR HIGH FREQUENCY (HF) DIGITAL COMMUNICATIONS

ABSTRACT. THIS PROJECT AIMS TO INTRODUCE A COMPUTATIONAL METHOD IN ORDER TO OPTIMISE LONG-RANGE HIGH FREQUENCY RADIO TRANSMISSIONS. HIGH FREQUENCY COMMUNICATION DESIGN OFTEN EMPLOYS MONTHLY MEDIAN IONOSPHERIC FORECASTS THAT, DUE TO THE DAYTIME EQUATORIAL IONIZATION ANOMALY, DO NOT OFFER GREAT PRECISION AT LOW LATITUDES, RENDERING ITS USE IN LARGE PARTS OF BRAZILIAN TERRITORY UNPRODUCTIVE. THIS INITIATIVE SEEKS TO PRESENT AN ALTERNATIVE PROCEDURE SO THAT SUCH A CLASS OF COMMUNICATIONS IS MADE VIABLE IN THIS PART OF THE GLOBE. BY USING REAL-TIME IONOSONDE DATA, IT IS POSSIBLE TO IMPROVE THE QUALITY OF RADIO TRANSMISSIONS BY INSTANTLY COMPUTING AND ADJUSTING ITS FUNDAMENTAL PARAMETERS: ITS MAXIMUM FREQUENCY AND THE ANTENNA'S TAKE-OFF ANGLE. OUR WORK IS INTENDED TO PROVIDE AN EFFICIENT COMPUTATIONAL APPROACH, BUILT USING C++ AND MAKING USE OF INTERPOLATIONS AND GRAPHIC ANALYSIS OF IONOGRAMS, IN ORDER TO ESTIMATE THESE QUANTITIES WITH HIGH ACCURACY AND AN ALGORITHM TO DEAL WITH THE IONOSONDE'S LONG INOPERATIVE PERIODS, SELECTING PAST DATA IN ACCORDANCE WITH THE CURRENT TIME OF THE DAY AND YEAR. BY ENHANCING HIGH FREQUENCY RADIO TRANSMISSIONS, THIS PAPER ENDEAVORS TO DEVELOP THE VIABILITY OF THE DIGITAL RADIO MONDIALE (DRM) STANDARD, ALLOWING FOR SECURE AND INEXPENSIVE COMMUNICATION MULTIMEDIA CHANNELS WITH MANY STRATEGIC MILITARY AND CIVILIAN APPLICATIONS.

KEYWORD. DIGITAL RADIO MONDIALE. RADIO TRANSMISSIONS. HIGH FREQUENCY. IONOSONDE. C++.

REFERÊNCIAS

DAVIES, Kenneth. **Ionospheric Radio Propagation**. Washington: US Government Printing Office, 1965.

ESTUDO E MONITORAMENTO BRASILEIRO DO CLIMA ESPACIAL. **Ionossondas**. Disponível em: <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/ionossondas-inicio/>>. Acesso em: 31 de maio de 2018.

GLOBAL IONOSPHERIC RADIO OBSERVATORY. **Digital Ionogram DataBase**. Disponível em: <<http://umlcar.uml.edu/DIDBase/>>. Acesso em: 31 de maio de 2018.

Description of the C++ language. Disponível em: <<http://www.cplusplus.com/info/description/>>. Acesso em: 31 de maio de 2018.

DEITEL, Paul; DEITEL, Harvey. **C++: How to Program**. New Jersey: Pearson Education, 2010.

Vítor Ossamu Rodrigues Okamura é aluno do sétimo semestre de graduação da Universidade de Brasília (UnB) no curso de Engenharia Elétrica. Cursou o ensino médio no Colégio Militar de Brasília (CMB), se formando como 1º Tenente-Aluno. Participou de diversas olimpíadas de conhecimento, conquistando duas medalhas de ouro e duas de bronze na Olimpíada Brasileira de Matemática das Escolas Públicas (OBMEP). É fluente em inglês. Pode ser contatado pelo e-mail vitor.ossamu@gmail.com.

Plínio Ricardo Ganime Alves é professor associado 4 do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB). Possui formação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), mestrado pela Universidade de Brasília (UnB) e doutorado pela Universidade de Limoges. É fluente em inglês e francês. Pode ser contatado pelo e-mail plinio@ene.unb.br.

