

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA O CÁLCULO DE DIFRAÇÃO SOBRE MÚLTIPLOS GUMES DE FACA NAS FAIXAS DE VHF E UHF

Lorenço Santos Vasconcelos e Gilberto Arantes Carrijo

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica/Núcleo de pesquisas em Processamento Digital de Sinais, Uberlândia – MG, lorenco.santos@ufu.br, gilberto@ufu.br

Resumo - Neste trabalho, são comparados cinco diferentes métodos alternativos de cálculo de difração sobre múltiplos gumes de faca. Os métodos de Bullington, Epstein-Peterson, Japonês, Deygout e Giovaneli foram implementados no MATLAB® e os seus resultados analisados. Constatou-se que o comportamento desses modelos tem estrita relação apenas com o número de gumes de faca do terreno e com a frequência de operação. Esses resultados fornecem uma base importante na escolha de métodos para se fazer análises de difração em situações práticas de enlaces de rádio em VHF e UHF.

Palavras-Chave – Deygout, Difração, Epstein-Peterson, Giovaneli, Gume de Faca, Japonês.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALTERNATIVE MULTIPLE KNIFE-EDGE DIFFRACTION CALCULATION METHODS IN VHF AND UHF BANDS

Abstract - In this paper, we compared five different alternative methods of multiple knife-edge diffraction calculation. The Bullington, Epstein-Peterson, Japanese, Deygout and Giovaneli models were implemented in MATLAB® and the results analyzed. It is found that the behavior of the tested models is closely related only to the number of knife-edges and operating frequency. These results provide an important guidance in the choice of methods to do diffraction analysis in practical radio links in the VHF and UHF bands.

Keywords – Deygout, Diffraction, Epstein-Peterson, Giovaneli, Japanese, Knife-Edge.

I. INTRODUÇÃO

A propagação de ondas de rádio sobre terrenos irregulares envolve a atenuação causada pela difração nos vários obstáculos do terreno. Embora esses obstáculos sejam de formas e tamanhos muito variados, em frequências como VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*),

eles podem ser representados (com alguma perda de fidelidade) por planos absorvedores semi-infinitos, os chamados gumes de faca.

A atenuação do campo elétrico causada por um gume de faca pode ser calculada analiticamente pelas equações de Fresnel-Kirchhoff ou pelas equações da UTD (Teoria Uniforme da Difração) e da GTD (Teoria Geométrica da Difração). No entanto, quando se deseja calcular a atenuação devida a uma série de gumes de faca (representação de um terreno real de propagação), o cálculo se torna muito mais complicado e de difícil solução. Millington *et al.* [1] desenvolveu soluções analíticas para o caso de dois gumes de faca e Vogler [2], baseado no trabalho de Furutsu [3], desenvolveu uma complexa expressão para o caso de múltiplos gumes de faca.

Devido à alta complexidade dos cálculos analíticos, foram criados vários métodos alternativos, mas que não têm grandes comprovações teóricas do seu funcionamento. Os modelos alternativos mais difundidos são: Bullington [4] Epstein-Peterson [5], Japonês [6], Deygout [7] e Giovaneli [8]. Esses modelos são muito utilizados nas análises de difração em enlaces de rádio com o intuito de se fazer previsões da atenuação do sinal e determinar possíveis regiões de sombra na área de cobertura.

Uma vez que há diferentes métodos de cálculo, é interessante realizar estudos comparativos entre eles e compreender os fatores que influenciam nos seus resultados. Tais estudos são importante ponto de partida para guiar projetistas de sistemas na escolha de quais métodos utilizar nas suas análises.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é comparar os cinco métodos alternativos citados, por meio da sua aplicação em vários percursos reais de propagação em terreno irregular e diferentes frequências de operação nas faixas de VHF e UHF. Para isso, foram realizados cálculos em mais de 57.600 diferentes casos e os resultados obtidos foram analisados no propósito de determinar o comportamento e as vantagens/desvantagens de cada um deles em relação aos outros.

II. DIFRAÇÃO EM MÚLTIPLOS GUMES DE FACA

Quando uma onda eletromagnética encontra uma obstrução em seu percurso, verifica-se que ela não é totalmente bloqueada pelo obstáculo, mas se encurva ao passar por ele. Esse efeito é conhecido como difração e pode ser explicado pelo princípio de Huygens.

Segundo esse princípio, o campo eletromagnético é difratado pelo obstáculo e é o resultado da interferência de



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

um infinito número de ondaletas geradas por todos os pontos da frente de onda incidente no obstáculo. A Figura 1 ilustra tal situação. Para esses casos, o campo difratado por um único obstáculo pode ser facilmente calculado pelas equações de Fresnel-Kirchhoff ou pelas equações da UTD ou da GTD.

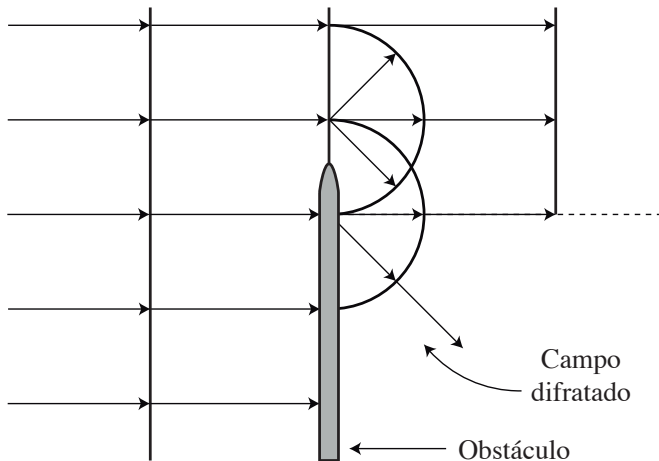


Fig. 1. Difração de onda plana em um gume de faca.

No entanto, estender a teoria da difração sobre um único gume de faca para dois ou mais gumes não é uma tarefa fácil. Soluções analíticas para o caso de dois gumes foram feitas por Millington *et al.* e Furutsu e, mais recentemente, Vogler desenvolveu uma expressão para o cálculo da atenuação de múltiplos gumes de faca.

Além desses métodos de alto rigor físico e matemático, há, também, os modelos computacionais intensivos, que consideram mais detalhadamente as características do perfil vertical do terreno e são de alta complexidade. Entre eles, pode-se citar:

- Modelos de traçado de raios (baseados na ótica geométrica e na UTD);
- Modelos baseados na solução numérica da equação parabólica pelos métodos de diferenças finitas ou split-step; e
- Modelos baseados na solução numérica de equações integrais pelo Método dos Momentos.

Ainda assim, diferentes aproximações para o problema de múltiplos gumes de faca foram sugeridas e esses métodos alternativos são bastante utilizados devido à sua simplicidade, em vista da alta complexidade das soluções exatas. Dentre os vários modelos simplificados existentes, cinco bastante difundidos foram escolhidos para estudo nesse trabalho. A saber, os modelos: Bullington, Epstein-Peterson, Japonês, Deygout e Giovaneli.

A. Discussão preliminar sobre os modelos

A UTD [9], com base na GTD [10], postula que o campo elétrico difratado por um gume de faca é dado por uma expressão do tipo da Equação (1).

$$E^d = E_0 \bar{D}(\cdot) A(\cdot) e^{-j(\cdot)} \quad (1)$$

Em que:

$\bar{D}(\cdot)$ é um coeficiente de difração que é função da geometria do gume e dos ângulos de difração;

$A(\cdot)$ representa a variação em amplitude do campo difratado em função da geometria da difração e da onda incidente;

$e^{-j(\cdot)}$ representa a variação em fase do campo difratado;

E^d é o campo difratado no ponto de observação; e

E_0 é o valor inicial do campo elétrico na fonte.

Dessa maneira, pode-se dizer que a atenuação total é o produto de um fator de difração, \bar{D} , e um fator de propagação, A .

Pogorzelski [11], baseado na GTD, mostrou que a abordagem de Epstein-Peterson considera corretamente o fator \bar{D} de cada difração, mas é otimista em relação ao fator A . Esse autor também mostrou que a solução de Deygout considera o fator de propagação (A) correto, mas é pessimista com relação ao fator de difração (\bar{D}). Já o método Japonês, de maneira semelhante ao de Epstein-Peterson, considera corretamente o fator de difração, porém corrige, parcialmente, o fator de propagação. Com isso, é natural que os resultados mais exatos estejam em algum ponto intermediário entre as soluções do método Japonês e do método de Deygout.

A alternativa sugerida por Giovaneli corrige o fator de difração incorreto do modelo de Deygout. Assim, essa nova abordagem considera corretamente os dois fatores e isso faz com que ela produza resultados mais consistentes com a UTD e GTD e com os resultados obtidos por Vogler.

Giovaneli comprovou a eficácia de sua abordagem ao encontrar erros menores que 0,9 dB entre as suas previsões e valores medidos experimentalmente. Bibb *et al.* [12] também mostraram que o modelo de Giovaneli se mantém mais próximo dos resultados de Vogler em várias situações.

Baseado nisso, esse trabalho considera o modelo de Giovaneli como referência para os outros modelos. Assim, os resultados dos quatro primeiros modelos são comparados com os resultados do modelo de Giovaneli.

III. METODOLOGIA EMPREGADA

Para fazer a comparação entre os modelos, foi implementado um programa, em MATLAB® R2016a, capaz de realizar as seguintes tarefas básicas:

- obter o perfil vertical do terreno entre dois pontos dados;
- corrigir o perfil do terreno obtido considerando a curvatura real da Terra e a refração em uma atmosfera padrão;
- converter o perfil corrigido para uma representação de gumes de faca; e
- realizar o cálculo da atenuação por difração utilizando os cinco métodos escolhidos;

A obtenção do perfil do terreno é feita, automaticamente, pelo programa utilizando-se o serviço gratuito de dados de elevação *Google Elevation API*. O software faz uma requisição HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) do tipo

“<http://maps.googleapis.com/maps/api/elevation/json?path=lat1,lon1|lat2,lon2&samples=n>”, em que *lat* e *lon* são latitude e longitude dos pontos e *n* é o número de amostras desejado. A resposta dessa requisição HTTP é um objeto JSON (JavaScript Object Notation) que contém as *n* informações de altitude entre os dois pontos escolhidos. O programa desenvolvido interpreta o objeto JSON e converte as informações recebidas do servidor do *Google Elevation API* para um formato familiar ao MATLAB®.

Conhecidas as alturas das antenas de transmissão e recepção, o programa procura por pontos que obstruem a visada direta, como mostra a Figura 2. Encontrados esses pontos, o perfil real é convertido em uma série de gumes de faca, o que está ilustrado na Figura 3. A partir da representação dos gumes de faca, os métodos são aplicados e calculadas as perdas de percurso por difração.

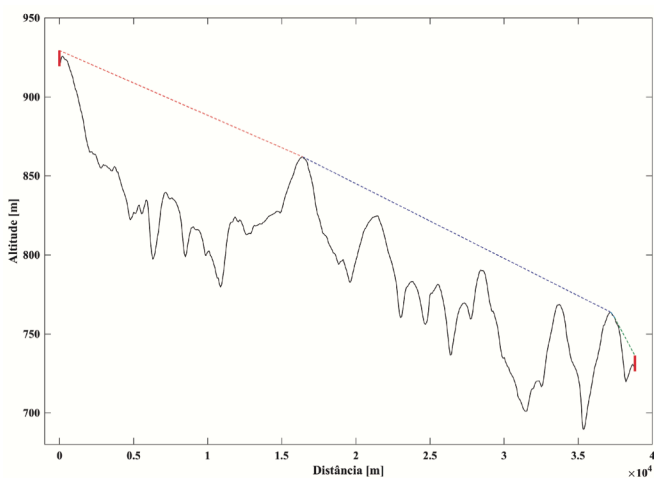


Fig. 2. Procura por obstruções da visada direta.

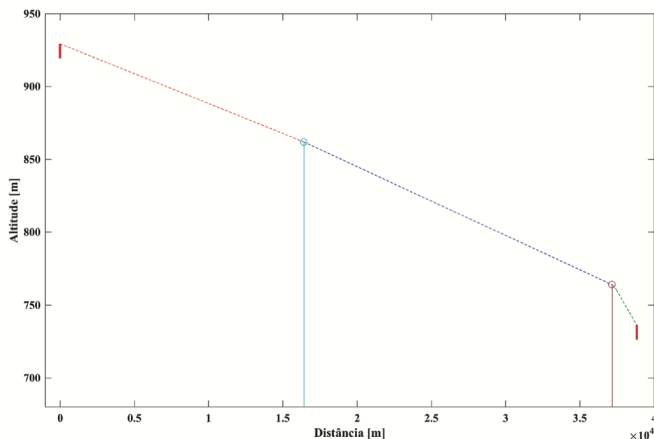


Fig. 3. Conversão do terreno real em gumes de faca.

IV. PROCEDIMENTO DE APLICAÇÃO

Os resultados desse trabalho foram gerados a partir de dois procedimentos principais. O primeiro consistiu em avaliar os diferentes modelos em função do terreno de propagação. Para isso, os cálculos foram realizados várias vezes, variando-se o terreno de propagação e a altura da antena transmissora.

A Figura 4 mostra uma das regiões de teste analisadas no primeiro procedimento. Trata-se de uma área na região rural

da cidade de Uberlândia-MG. O ponto de transmissão está dentro da cidade (vermelho), simulando uma emissora de TVD (televisão digital). Os pontos azuis são os pontos em que os cálculos serão realizados.

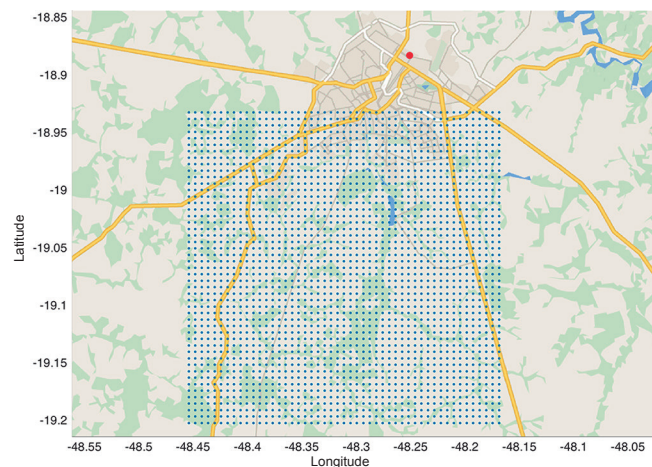


Fig. 4. Exemplo de área de teste ao sul de Uberlândia-MG.

A malha de teste mostrada na Figura 4 possui 2401 pontos, então o programa deverá obter 2401 perfis de terreno entre o transmissor e cada um desses pontos. Ele também realizará 12005 (2401 x 5 métodos) cálculos para essa malha de teste. Ao todo, foram utilizadas 6 regiões de teste distintas: duas na área rural de Uberlândia-MG, duas na área rural de Patos de Minas-MG e mais duas na área rural de Frutal-MG.

Para cada uma das 6 regiões, os cálculos foram feitos com 4 alturas diferentes de antena transmissora (10, 20, 50 e 100 m), altura de antena receptora de 10 m e mesma frequência. A frequência utilizada foi a do canal 31 UHF. A Tabela 1 sumariza as características das áreas de teste.

Tabela I - Áreas de teste deste trabalho.

Área	Região/Cidade	Frequência [MHz]
1	Sul de Uberlândia	575,1428 (canal 31)
2	Noroeste de Uberlândia	
3	Nordeste de Frutal	
4	Sudoeste de Frutal	
5	Oeste de Patos de Minas	
6	Norte de Patos de Minas	

O segundo procedimento consistiu em analisar o comportamento dos modelos selecionados em relação à frequência de operação. Para isso, os cálculos foram realizados nas 6 áreas de teste, mas varrendo todos os 68 canais VHF e UHF (56 – 800 MHz) utilizados para TVD no Brasil. Assim, é possível analisar o comportamento dos métodos também em função da frequência de operação.

V. RESULTADOS

A primeira análise verificou o desvio de cada método com relação ao método de Giovaneli em função do número de gumes de faca do terreno. Isso foi feito nas 6 áreas de teste e para as quatro alturas de antena transmissora diferentes (10, 20, 50 e 100 m). Os Gráficos 1 a 4, a seguir, mostram os desvios para cada caso testado na área de teste 1 (a mesma da Figura 4).

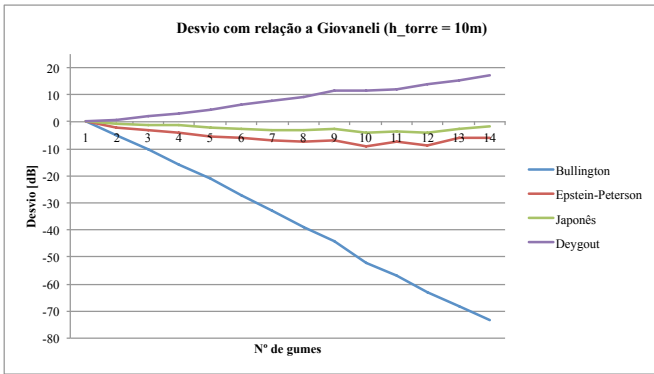


Gráfico 1. Desvio com relação a Giovaneli na área de teste 1 e para altura da antena transmissora = 10 m.

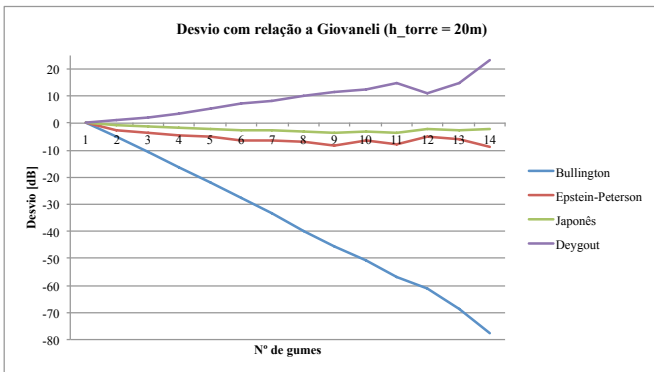


Gráfico 2. Desvio com relação a Giovaneli na área de teste 1 e para altura da antena transmissora = 20 m.

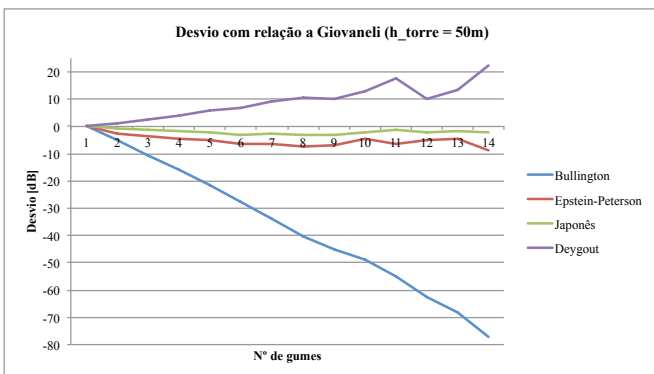


Gráfico 3. Desvio com relação a Giovaneli na área de teste 1 e para altura da antena transmissora = 50 m.

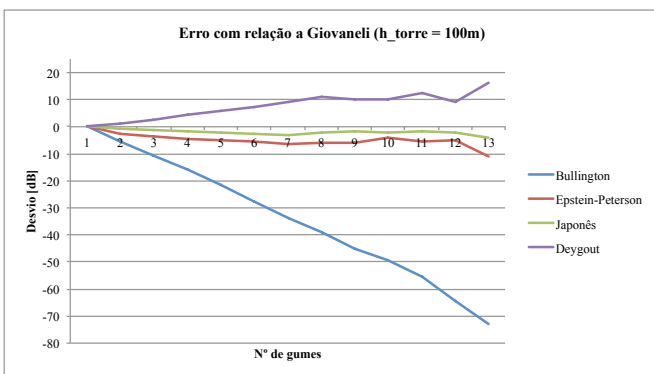


Gráfico 4. Desvio com relação a Giovaneli na área de teste 1 e para altura da antena transmissora = 100 m.

A partir desses resultados, pode-se verificar que, independentemente da altura da antena transmissora, a diferença entre os resultados segue um padrão.

O método de Bullington é o mais otimista e provê bons resultados para apenas um, ou, no máximo, dois gumes de faca. O modelo de Deygout se torna pessimista e se desvia bastante do modelo de Giovaneli à medida que o número de gumes de faca aumenta. Já os modelos de Epstein-Peterson e Japonês se mostram praticamente uniformes com relação ao número de gumes, mas o modelo Japonês se mantém mais próximo do modelo de Giovaneli.

Pode-se verificar, também, que, em todos os quatro casos, o modelo de Giovaneli (reta $y = 0$) ficou intermediário em relação aos modelos de Deygout (limite superior) e o Japonês (limite inferior). Isso comprova o que foi observado na seção II.A deste trabalho.

Ao realizar as análises para as outras 5 áreas de teste restantes (Uberlândia, Patos de Minas e Frutal), verificou-se que o mesmo padrão se repetiu, embora os terrenos sejam completamente diferentes. Então, partiu-se para uma análise conjunta de todos os pontos, apenas em função do número de gumes de faca, independentemente da região analisada ou das alturas da antena transmissora.

O Gráfico 5 ilustra os resultados dessa análise.

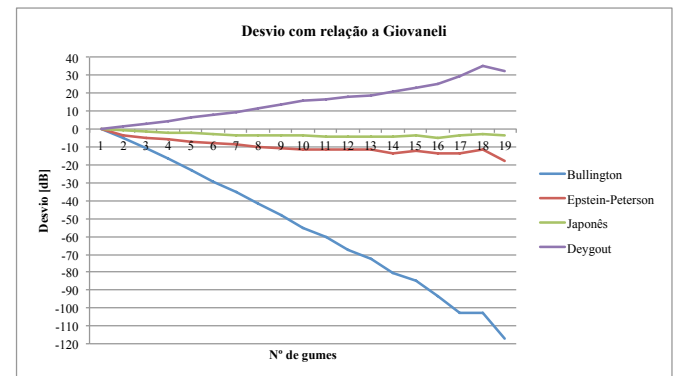


Gráfico 5. Desvio geral com relação a Giovaneli.

Observando o Gráfico 5, pode-se verificar que o mesmo padrão dos outros gráficos se repetiu, com poucas alterações. Isso sugere que a diferença entre os métodos de Bullington, Epstein-Peterson, Japonês e Deygout, com relação ao método de Giovaneli, depende apenas da quantidade de gumes de faca no terreno.

Quanto mais gumes há no terreno, mais o modelo de Bullington se torna otimista, enquanto o modelo de Deygout se torna pessimista. Já o comportamento dos modelos de Epstein-Peterson e o Japonês é muito parecido. Eles se desviam lentamente do modelo de Giovaneli conforme o número de gumes aumenta, porém o modelo de Epstein-Peterson é um pouco mais otimista do que o Japonês.

Adicionalmente, o programa foi feito para plotar, geograficamente, os dados calculados e isso é mostrado em seguida. Como o método de Bullington é muito divergente dos outros, ele foi excluído dessa análise, com o intuito de se ter uma melhor escala de cores nas imagens.

A Figura 5 mostra, geograficamente, o número de gumes de faca entre o transmissor e cada ponto da área de teste 1 (sul de Uberlândia-MG) e para altura de antena transmissora de 100 m.

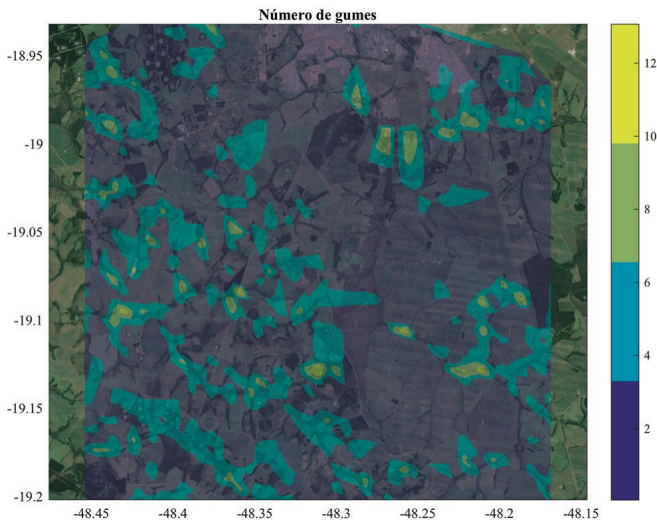


Fig. 5. Número de gumes de faca entre Tx e cada ponto.

A Figura 6 ilustra o desvio padrão da diferença entre os modelos de Epstein-Peterson, Japonês e Deygout e o modelo de Giovaneli nas mesmas condições da Figura 5.

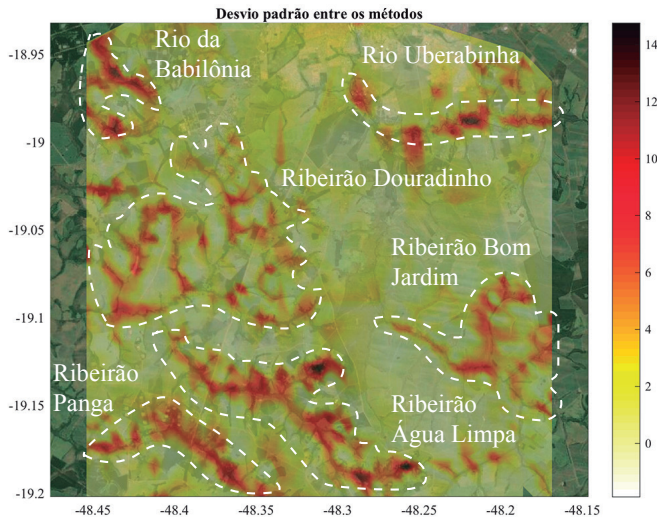


Fig. 6. Desvio padrão dos métodos com relação a Giovaneli.

Analisando as Figuras 5 e 6, é possível confirmar o que está mostrado nos Gráficos 1 a 5 (que a diferença entre os métodos e Giovaneli aumenta com o número de gumes). Nas mesmas regiões em que, na Figura 5, o percurso contém mais gumes, o desvio padrão entre os métodos é grande na Figura 6.

Curiosamente, se for feita uma análise hidrográfica, percebe-se que a maioria desses pontos são margens de pequenos rios e córregos, como foi identificado na Figura 6. Isso ocorre, pois, em geral, as margens desses componentes hidrográficos são formadas por vales e depressões. Assim, essas regiões de margens são sombreadas por vários gumes de faca.

A segunda abordagem foi analisar o comportamento dos modelos de propagação em função da frequência de operação. Para isso, os cálculos foram realizados nas frequências de todos os 68 canais VHF e UHF de TVD no Brasil.

A Figura 7 mostra o comportamento dos modelos de Epstein-Peterson, Japonês e Deygout em relação ao modelo de Giovaneli em função da frequência e do número de gumes. A Figura 8 mostra o desvio padrão entre esses métodos e o de Giovaneli.

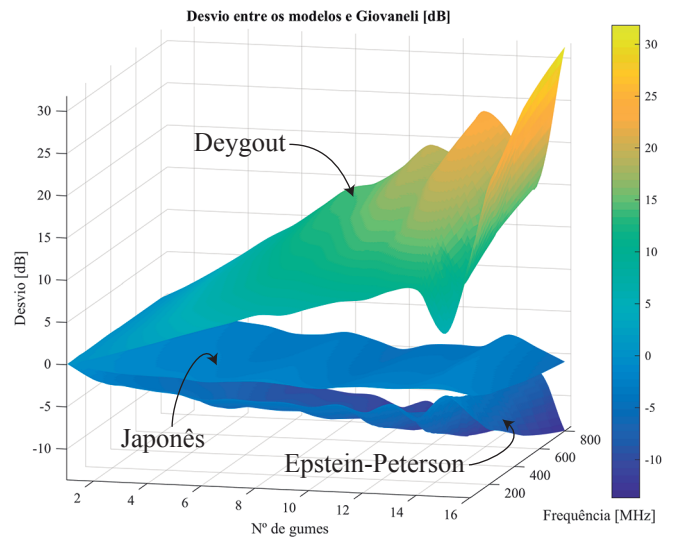


Fig. 7. Comportamento dos modelos com relação a Giovaneli em função do número de gumes e da frequência.

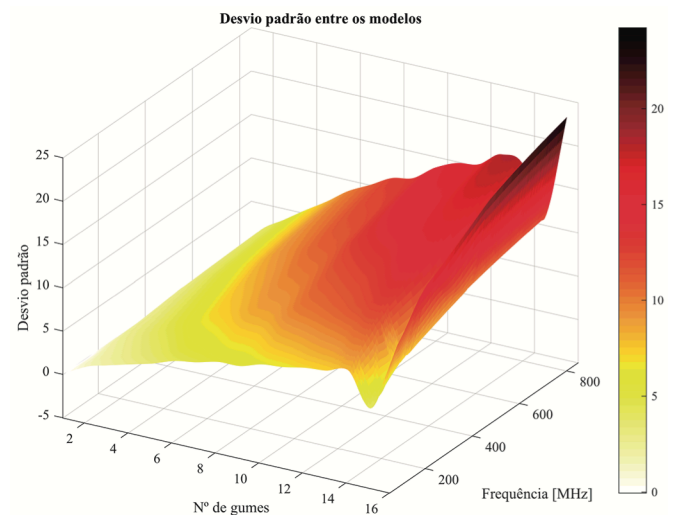


Fig. 8. Desvio padrão dos métodos com relação a Giovaneli em função do número de gumes e da frequência.

Em concordância com os resultados anteriores, as Figuras 7 e 8 também mostram que os métodos passam a divergir mais com o aumento do número de gumes de faca. Os Gráficos 1 a 5 representam cortes XZ (ou $y = 575,1428$.) da Figura 7. Adicionalmente, as Figuras 7 e 8, ao introduzirem o eixo das frequências, mostram que as diferenças entre os métodos são acentuadas com o aumento da frequência, com exceção do modelo Japonês, que se mantém praticamente constante em relação ao modelo de Giovaneli.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho procurou realizar um estudo comparativo entre cinco diferentes métodos de cálculo de difração sobre múltiplos gumes de faca. Uma vez que o método de

Giovaneli é considerado, por vários autores, como o mais exato na maioria das vezes (seção II.A desse trabalho), então esse método foi considerado como referência para os outros quatro métodos analisados.

Os resultados apresentados nos Gráficos 1 a 5 e nas Figuras 5 e 6 mostraram que a diferença entre os modelos de Bullington, Epstein-Peterson, Japonês e Deygout com relação ao modelo de Giovaneli são independentes da região analisada e da altura da antena transmissora, mas dependem apenas do número de gumes de faca. Ou seja, em geral, características como: distância entre gumes, altura média dos gumes, altura efetiva da antena transmissora, distância do enlace, entre outras, não interferem no comportamento dos modelos (com relação a Giovaneli, consequentemente com relação à UTD, GTD e Vogler).

Ficou claro que o método de Bullington é o menos preciso e o que mais se desvia do modelo de Giovaneli. O método de Deygout fornece bons resultados quando são considerados dois ou três gumes, mas, a partir daí, se desvia bastante de Giovaneli e passa a ser muito pessimista. O método de Epstein-Peterson forneceu resultados razoáveis e se manteve próximo do modelo de Giovaneli para toda a faixa de gumes testados. Isso mostra que, em geral, é um método confiável para ser utilizado em diversas situações, mas otimista. Já o modelo Japonês foi o que forneceu os melhores resultados. Ele se manteve muito próximo do modelo de Giovaneli em todos os casos e é ligeiramente otimista.

Além disso, as Figuras 5 e 6 mostraram que regiões de margens de pequenos rios e córregos devem ser cuidadosamente analisadas, pois os vales que podem estar presentes ali aumentam, consideravelmente, o número de gumes, elevando a divergência entre os métodos e o desvio com relação à realidade. Por isso, nessas áreas, é mais indicado utilizar os modelos de Giovaneli, Japonês ou Epstein-Peterson.

A segunda análise levou em consideração a frequência de operação. As Figuras 7 e 8 mostraram que o comportamento dos modelos (em relação a Giovaneli) também depende da frequência de operação. Em todos os casos, o aumento da frequência de operação acentuou o desvio dos modelos com relação ao modelo de Giovaneli, com exceção do modelo Japonês. O comportamento desse método se manteve aproximadamente constante para todas as quantidades de gumes de faca e para toda a faixa VHF e UHF.

Foi possível concluir, então, que, dentre os modelos analisados, o melhor é o Japonês. Uma vez que ele é mais próximo de Giovaneli, então ele também é mais próximo dos resultados de Vogler e da UTD e da GTD.

Como resultado geral deste trabalho, pode-se dizer que:

- para perfis de terreno com até três gumes de faca e frequências no começo da faixa de VHF, praticamente todos os cinco modelos podem ser utilizados;

- à medida que o número de gumes de faca aumenta, os modelos de Giovaneli, Epstein-Peterson e Japonês ainda podem ser utilizados, mas, a partir de, aproximadamente, 400 MHz, o modelo de Epstein-Peterson passa a prover piores resultados; e
- basicamente, os modelos de Giovaneli e Japonês podem ser utilizados para uma grande gama de gumes de faca e toda a banda de VHF e UHF.

REFERÊNCIAS

- [1] C. G. Millington; R. Hewitt e F. S. Immirzi, *Double knife-edge diffraction in field-strength prediction*. IEE Monograph 507E, pp. 419–29, 1963.
- [2] L. E. Vogler, *The attenuation of electromagnetic waves by multiple knife-edge diffraction*. NTIA Report 81–86. Available as PB82-139239, National Technical Information Service, Springfield VA, 1981.
- [3] K. Furutsu, *On the theory of radiowave propagation over inhomogeneous earth*. J. Res. NBS, 67D, pp. 39–62, 1963.
- [4] K. Bullington, *Radio propagation at frequencies above 30 Mc*. Proc IRE, 35(10), pp. 1122–36, 1947.
- [5] J. Epstein e D. W. Peterson, *An experimental study of wave propagation at 850 MC*. Proc. IRE, 41(5), pp. 595–611, 1953.
- [6] *Atlas of radio wave propagation curves for frequencies between 30 and 10,000 Mc/s*. Radio Research Lab, Ministry of Postal Services, Tokyo, Japan, pp. 172–9, 1957.
- [7] J. Deygout, *Multiple knife-edge diffraction of microwaves*. IEEE Trans., AP14(4), pp. 480–9, 1966.
- [8] C. L. Giovaneli, *An analysis of simplified solutions for multiple knife-edge diffraction*. IEEE Trans., AP32(3), pp. 297–301, 1984.
- [9] R. G. Kouyoumjian e P. H. Pathak, *A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface*. Proc. IEEE, 62(11), pp. 1448–61, 1974.
- [10] J. B. Keller, *Geometrical theory of diffraction*. J. Opt. Soc. Am., 52, pp. 116–30, 1962.
- [11] R. J. Pogorzelski, *A note on some common diffraction link loss models*. Radio Science, 17, pp. 1536–40, 1983.
- [12] D. A. Bibb; J. Dang; Z. Yun e M. F. Iskander, *Computational accuracy and speed of some knife-edge diffraction models*. Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), IEEE, pp. 705–706, 2014.