

Comportamento de modelos de difração sobre múltiplos gumes de faca em VHF e UHF

Lorenço Santos Vasconcelos e Gilberto Arantes Carrijo

Resumo—Neste trabalho, são comparados cinco diferentes métodos de cálculo de difração sobre múltiplos gumes de faca em áreas rurais. Os modelos de Bullington, Epstein-Peterson, Japonês, Deygout e Giovaneli foram implementados no MATLAB® e os seus resultados, analisados. Constatou-se que o comportamento relativo dos 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 enlaces de rádio em VHF e UHF.

Palavras-Chave—difração, Giovaneli, gume de faca, terreno irregular.

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

Keywords—diffraction, Giovaneli, irregular terrain, 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 gumes de faca.

A perda por difração em um gume de faca é 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, 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 métodos simples, mas que não têm grandes comprovações teóricas do seu funcionamento. Esses modelos são utilizados em análises de enlaces de rádio com o intuito de se fazer previsões da atenuação do sinal e da área de cobertura. Os modelos mais difundidos são: Bullington [4] Epstein-Peterson [5], Japonês [6], Deygout [7] e Giovaneli [8].

Tendo em vista a existência de vários métodos diferentes, é interessante realizar estudos comparativos para compreender o seu comportamento e os fatores que influenciam os resultados. Tais estudos são ponto de partida para guiar projetistas de sistemas na escolha de quais métodos utilizar. Com isso, o objetivo deste trabalho é comparar os cinco métodos citados, aplicando-os em vários percursos reais de propagação em terreno irregular e utilizando diferentes frequências nas faixas de VHF e UHF.

Portanto, este artigo foi estruturado da seguinte maneira: a seção II trata de aspectos teóricos da difração em múltiplos gumes de faca e traz alguns comentários sobre os métodos estudados. A seção III apresenta a metodologia empregada nos testes e as seções IV e V trazem os resultados obtidos e as conclusões, respectivamente.

II. DIFRAÇÃO POR MÚLTIPLOS GUMES DE FACA

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

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] mostrou que a abordagem de Epstein-Peterson considera corretamente o fator de difração, mas é otimista em relação ao fator de propagação. Esse autor também mostrou que a solução de Deygout considera o fator de propagação correto, mas é pessimista com relação ao fator de difração. 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.

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

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

Nesse sentido, esse trabalho considerou o modelo de Giovanelli como referência para os outros modelos. Assim, os resultados dos quatro primeiros modelos foram comparados com os resultados do modelo de Giovanelli.

III. METODOLOGIA EMPREGADA

Para fazer a comparação entre os modelos, foi implementado um programa, em MATLAB®, capaz de realizar as seguintes tarefas: obter o perfil vertical do terreno; converter o perfil obtido em 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 *Google Elevation API*. O software faz uma requisição HTTP ao servidor cuja resposta é um objeto JSON (*JavaScript Object Notation*) que contém as informações de altitude entre dois pontos escolhidos.

Após a obtenção do perfil, o programa computa os gumes de faca, como é ilustrado na Figura 1.

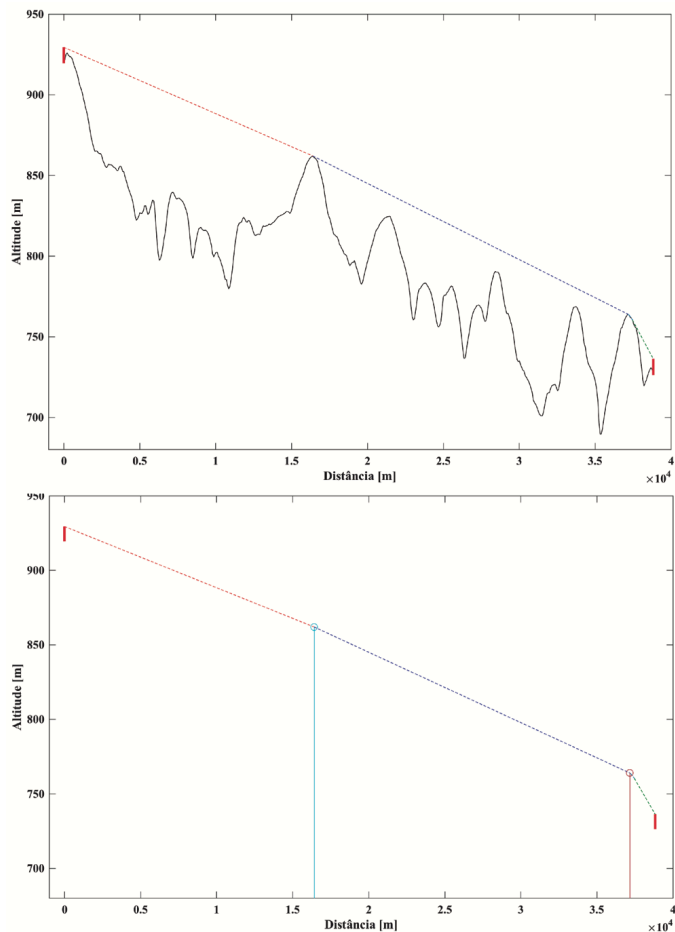


Fig. 1. Conversão do perfil real em gumes de faca.

A. Procedimento de aplicação

As análises feitas nesse trabalho seguiram, basicamente, dois procedimentos. O primeiro consistiu em avaliar os modelos apenas em função do terreno de propagação. Para isso, os cálculos foram realizados em diferentes regiões.

Definiu-se 6 áreas de teste distintas, compostas por 2401 pontos de recepção diferentes. Para cada uma das 6 áreas, os cálculos foram feitos com 4 alturas diferentes de antena transmissora (10, 20, 50 e 100 m) e mesma frequência. 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	

A Figura 2 mostra uma das regiões de teste analisadas. Nela, o ponto vermelho é o transmissor e os pontos azuis são os pontos de recepção.

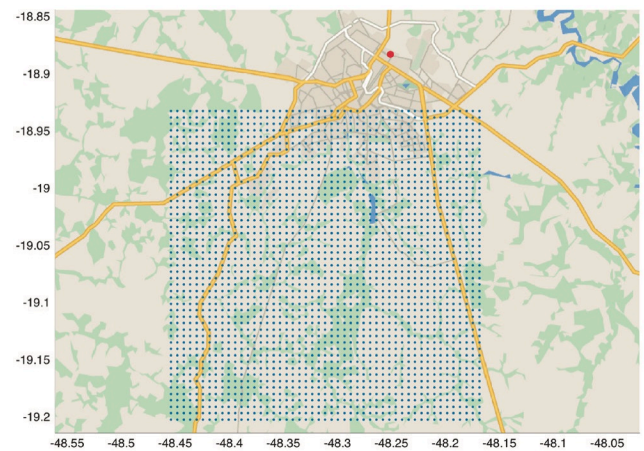


Fig. 2. Área de teste 1 da Tabela 1.

O segundo procedimento consistiu em analisar o comportamento dos modelos selecionados em relação à frequência de operação. Para isso, os mesmos cálculos do primeiro procedimento foram realizados, mas para todos os 68 canais VHF e UHF (54 – 800 MHz).

IV. RESULTADOS

A primeira análise verificou o desvio de cada método em relação ao modelo de Giovanelli em função do terreno de propagação. Os Gráficos 1 a 4, a seguir, mostram os desvios para cada caso testado na área de teste 1 (a mesma da Figura 1).

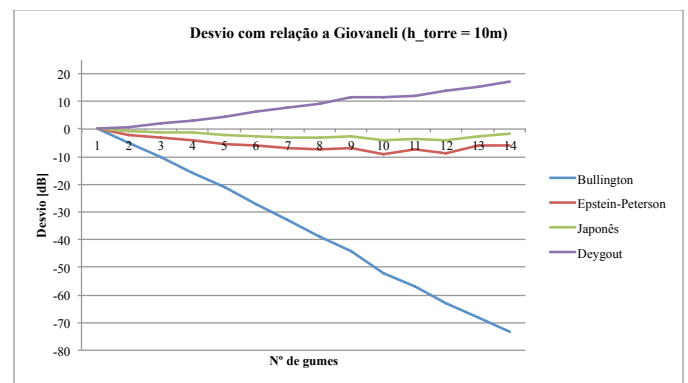


Gráfico. 1. Desvio com relação a Giovanelli na área de teste 1 e para altura da antena transmissora = 10 m.

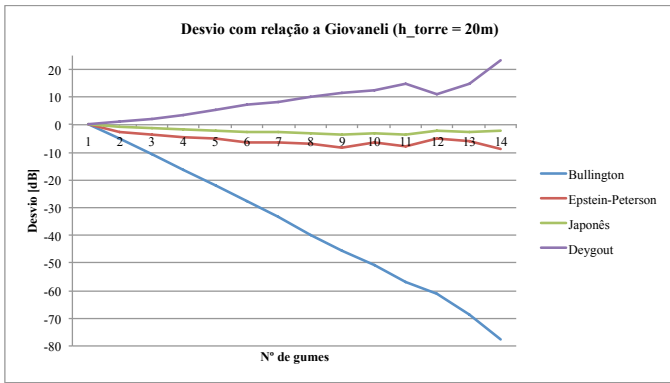


Gráfico 2. Desvio com relação a Giovaneli na área de teste 1 e para altura da antena transmissora = 20 m.

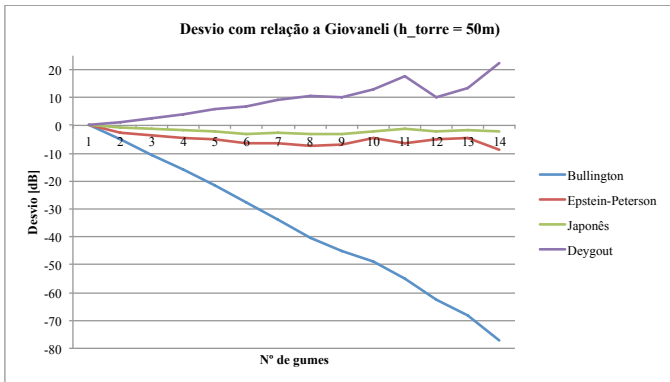


Gráfico 3. Desvio com relação a Giovaneli na área de teste 1 e para altura da antena transmissora = 50 m.

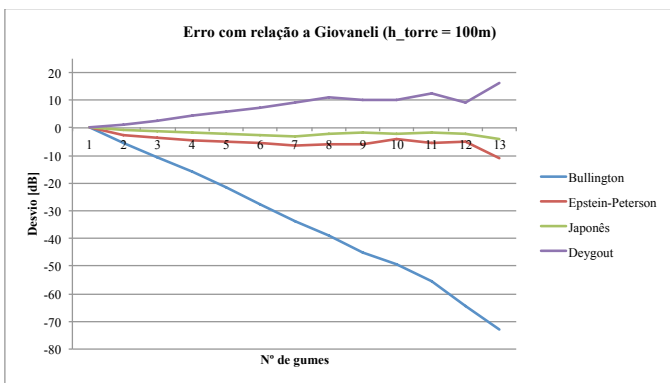


Gráfico 4. Desvio com relação a Giovaneli na área de teste 1 e para altura da antena transmissora = 100 m.

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

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), comprovando o que foi observado na seção II desse 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. Isso é mostrado no Gráfico 5.

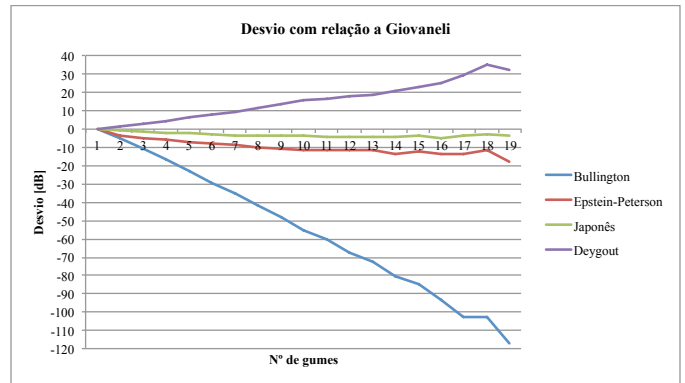


Gráfico 5. Desvio geral com relação a Giovaneli.

Observando o Gráfico 5, pode-se verificar que o mesmo padrão dos outros gráficos se repetiu. Então, 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.

O método de Bullington é o mais otimista e prevê bons resultados apenas para um, ou, no máximo, dois gumes de faca. Quanto mais gumes há no terreno, mais ele se torna otimista, enquanto o modelo de Deygout se torna pessimista, desviando-se bastante do modelo de Giovaneli.

Já o comportamento dos modelos de Epstein-Peterson e o Japonês é muito parecido. Eles se mantêm praticamente uniformes com relação ao número de gumes, mas o modelo Japonês é mais próximo do modelo de Giovaneli. Isso também pode ser observado na Figura 3, que traz as perdas por difração, em [dB], de todos os métodos.

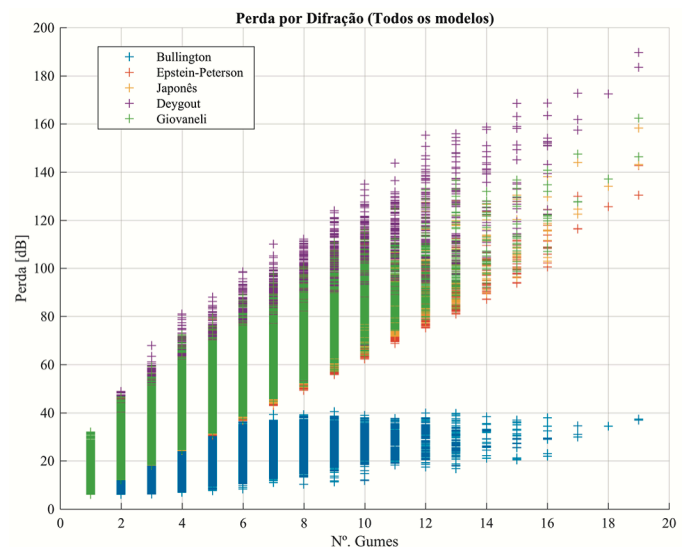


Fig. 3. Perdas por difração de todos os métodos.

O programa também foi feito para plotar, geograficamente, os dados calculados e isso é mostrado em seguida.

A Figura 4 mostra o número de gumes de faca entre o transmissor e cada ponto da área de teste 1 para altura de antena transmissora de 100 m.

A Figura 5 ilustra o desvio padrão entre os modelos de Epstein-Peterson, Japonês e Deygout com relação ao modelo de Giovaneli nas mesmas condições da Figura 4. O modelo de Bullington foi omitido dessa análise para se ter uma boa escala de cores nas figuras, pois ele é muito divergente dos outros métodos.

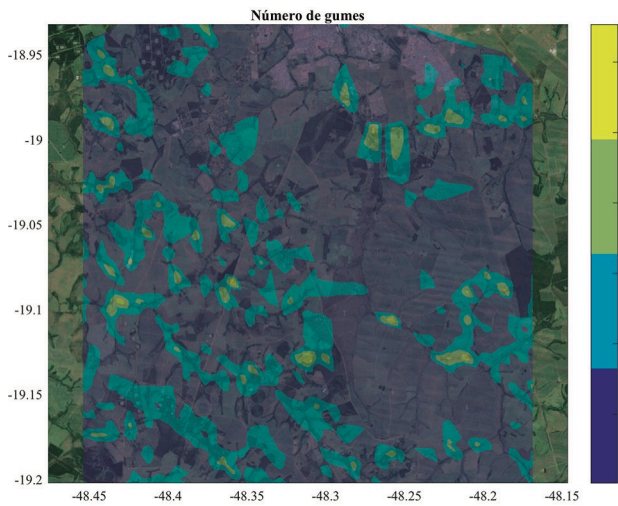


Fig. 4. Número de gumes de faca entre Tx e cada ponto.

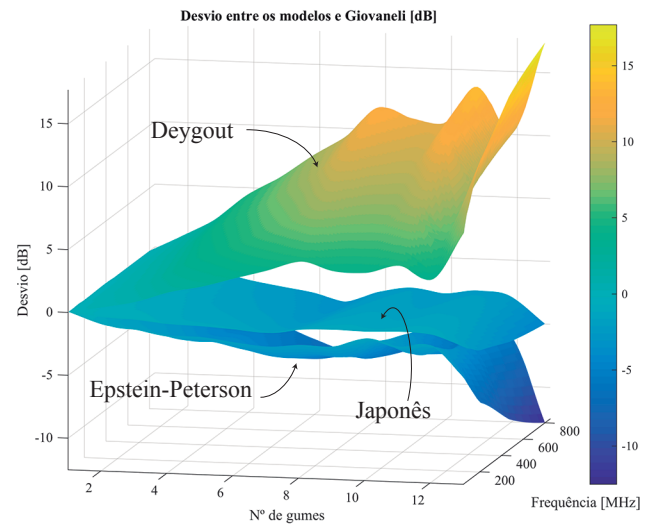


Fig. 6. Comportamento dos modelos com relação a Giovaneli.

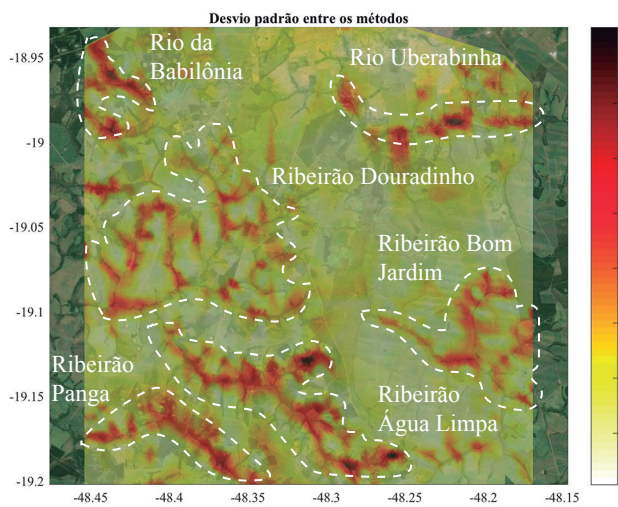


Fig. 5. Desvio padrão entre os métodos com relação a Giovaneli.

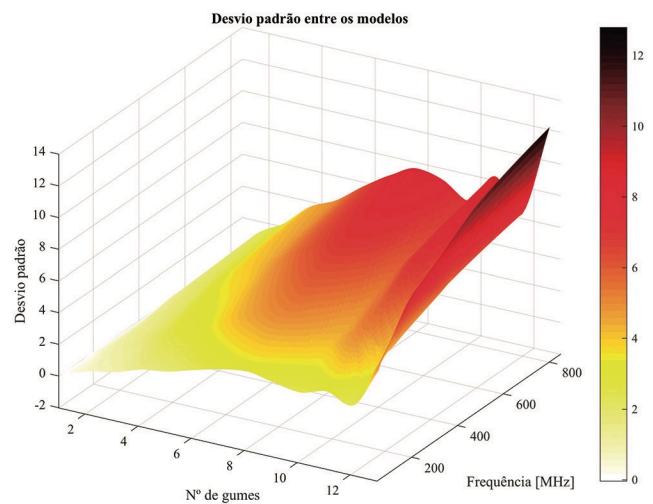


Fig. 7. Desvio padrão entre os métodos e o método de Giovaneli.

Analisando as Figuras 4 e 5, é possível confirmar o que está mostrado nos Gráficos 1 a 5 e na Figura 3 (que a diferença entre os métodos e Giovaneli aumenta com o número de gumes). Nas mesmas regiões em que, na Figura 4, o percurso contém mais gumes, o desvio padrão entre os métodos é grande na Figura 5.

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 5. 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 para todos os 68 canais VHF e UHF.

A Figura 6 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 7 mostra o desvio padrão entre esses métodos e o de Giovaneli.

Em concordância com os resultados anteriores, as Figuras 6 e 7 mostram que os métodos passam a divergir mais com o aumento do número de gumes de faca. Mas, ao introduzirem o eixo das frequências, elas também mostram que as diferenças entre os métodos são acentuadas com o aumento da frequência, com exceção do modelo Japonês, que se manteve praticamente constante em relação ao modelo de Giovaneli.

Finalmente, foi avaliado o tempo de processamento dos cinco modelos estudados, como mostra o Gráfico 6.

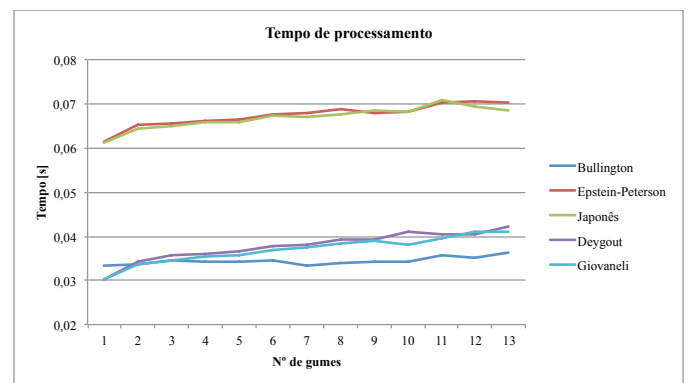


Gráfico. 6. Tempo de processamento dos modelos.

Percebe-se que o modelo mais rápido é o de Bullington, o que era esperado devido à sua simplicidade. Observa-se, também que o seu tempo de processamento é independente do número de gumes, pois esse modelo sempre utiliza, no máximo, dois gumes para realizar os cálculos.

Em seguida, aparecem o modelo de Giovaneli e o modelo de Deygout. Também era esperado que os tempos de processamento desses modelos fossem próximos, pois sua metodologia é bem parecida e isso realmente ocorreu.

Os modelos mais demorados foram os de Epstein-Peterson e o Japonês, o que também era esperado, pois eles realizam operações intensivas em todos os gumes de faca do terreno. Em geral, esses dois modelos são 1,8 vezes mais demorados do que o de Giovaneli.

V. 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 da vezes (seção II 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 3, 4 e 5 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 em relação a Giovaneli, conseqüentemente 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 4 e 5 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 e Epstein-Peterson.

A segunda análise levou em consideração a frequência de operação. As Figuras 6 e 7 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, 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] 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.