

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

ANDRÉ VINÍCIUS PINHO LUIZ

DIFRAÇÃO POR IRREGULARIDADES DO RELEVO

NITERÓI
2012

ANDRÉ VINÍCIUS PINHO LUIZ

DIFRAÇÃO POR IRREGULARIDADES DO RELEVO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Comunicações Móveis.

Orientador: Prof. Dr. EDUARDO RODRIGUES VALE

Co-orientador: Prof M.Sc/Notório Saber. MAURO SOARES ASSIS

Niterói

2012

Luiz, André Vinícius Pinho.

Difração por irregularidades do relevo/ André Vinícius Pinho Luiz.

– Niterói : [s.n.], 2012.

93 f. : Il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) –
Universidade Federal Fluminense, 2012.

1. Introdução. 2. Fundamentos teóricos. 3. Difração sobre múltiplos obstáculos convexos. 4. Resultados numéricos. 5. Conclusão.

ANDRÉ VINÍCIUS PINHO LUIZ

DIFRAÇÃO POR IRREGULARIDADES DO RELEVO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Comunicações Móveis.

Aprovada em 29 de junho de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Vale – Orientador

Universidade Federal Fluminense

Prof. M.Sc /Notório Saber Mauro Soares Assis – Co-orientador

Universidade Federal Fluminense

Profa. Dra Leni Joaquim de Matos

Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Centro de Estudos em Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Niterói

2012

Aos meus pais Franklin e Iolanda, por permitirem e incentivarem o acesso à educação. À minha esposa Thilene, pelo apoio nesta caminhada. Aos meus filhos Gabriel e Isabela, para que este trabalho sirva, quem sabe, de inspiração. Aos meus Professores, pelos sábios conhecimentos adquiridos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Professor Mauro Soares Assis pela dedicação e apoio em todas as fases do trabalho.

À minha esposa Thilene pelo suporte afetivo e pela paciência.

À Marinha do Brasil por permitir essa realização pessoal e profissional.

Aos professores que tive no decorrer de minha vida e que foram pra mim exemplo e sabedoria.

À coordenação do curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da UFF, por toda a ajuda dispensada.

Resumo

A análise rigorosa da difração pelas irregularidades do relevo envolve uma formulação integral complicada e que, normalmente, demanda um considerável tempo computacional. Adicionalmente, a natureza aleatória do relevo impossibilita a definição de um modelo matemático de grande precisão.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar um modelo semiempírico simplificado, aplicável a qualquer perfil de relevo, que resulte em uma solução aproximada do problema da difração de ondas eletromagnéticas sobre terrenos lisos, irregulares, ou com grau de irregularidade intermediário, nas faixas de VHF e UHF, facilitando a obtenção de resultados diretamente aplicáveis aos problemas práticos de engenharia.

Da mesma forma que outras soluções práticas existentes para relevo irregular, a metodologia aqui desenvolvida tem por base a teoria da difração por obstáculos do tipo gume de faca. Nesta dissertação aplicou-se o método proposto por Deygout para definir o obstáculo principal de um trajeto, ou seja, na visada entre o transmissor e o receptor, e nas visadas intermediárias, quando necessário. Contudo, ciente de ter sido verificado anteriormente que negligenciar as dimensões do obstáculo levou a diferenças significativas entre o resultado medido e aquele previsto pelo método utilizado, o modelo de Deygout é aprimorado com uma correção relacionada ao raio de curvatura do obstáculo.

Para os relevos lisos, emprega-se o modelo simplificado da propagação sobre uma terra esférica descrito na Recomendação UIT-R P.526-11. Para relevos com irregularidade intermediária, é proposto o uso de uma interpolação linear. Nesta situação, o parâmetro empírico Δh , denominado rugosidade do terreno, é utilizado para definir o grau de irregularidade do relevo.

Para medir o grau de aderência do modelo proposto à realidade, é usada a ferramenta MATLAB através da qual é feita a leitura a uma base de dados reunida e validada pelo UIT-R, contendo 8934 medições realizadas nos EUA e na Europa. Esta ferramenta é, também, empregada na aplicação do modelo e na medida do erro obtido por comparação com os valores experimentais constantes da citada base de dados. A eficiência do modelo é verificada cotejando-se os resultados numéricos obtidos, com outros provenientes de soluções similares desenvolvidas com a mesma finalidade.

Palavras-chave: radiopropagação, difração, relevo irregular, modelo semiempírico de difração, obstáculo convexo.

Abstract

The rigorous analysis of the diffraction by terrain irregularities is developed through a complicated integral formulation, which usually demands a huge computational time. Additionally, the random nature of relief complicates the definition of an accurate mathematical model.

Therefore, the purpose of this work is to describe a simple semi-empirical model, capable of being implemented in order to cover any kind of terrain profile, facilitating the acquisition of useful results for practical engineering problems in the VHF and UHF bands. This model corresponds to an approximate solution for the electromagnetic wave diffraction problem over a smooth, an irregular terrain or a rolling terrain.

As other solutions for irregular terrain, this model is based on the knife-edge diffraction theory. This work has employed the method developed by Deygout to define the main obstacle of the path, connecting the transmitter and the receiver terminals. When necessary, the same procedure is adopted for other sub-paths. On the other hand, aware that it has already been observed a relevant discrepancy between the measured and the predicted results, if obstacle dimensions are not taken into account, Deygout method is improved with a correction considering the obstacle radius of curvature.

For smooth terrain it is used the simplified propagation over spherical earth model, described in the Recommendation ITU-R P.526-11. For rolling terrain i.e., with intermediate smoothness degree, the proposed model employs a linear interpolation. In this case, the terrain smoothness degree is quantified through an empirical parameter (Δh) statistically defined as a function of the terrain profile.

In this dissertation the MATLAB tool has been used to fit the proposed model results with the measured data. In order to accomplish this objective, the computational tool has read a database, compiled and validated by ITU-R, with 8934 measurements acquired in USA and Europe. This tool has also been applied to evaluate the discrepancy between predicted and experimental loss. The efficiency of the model is estimated by comparison with numerical results achieved by other models proposed to solve the same problem.

Keywords: radio propagation, diffraction, irregular terrain, semi-empirical model, convex obstacle.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Histórico.....	14
1.2	Objetivo.....	17
1.3	Roteiro.....	17
2	Fundamentos Teóricos.....	19
2.1	Propagação sobre terra plana.....	19
2.1.1	Zona de interferência e zona de difração.....	21
2.2	Propagação sobre terra esférica.....	23
2.2.1	Solução pela série dos resíduos.....	24
2.2.2	Solução pela aproximação geométrica.....	26
2.2.3	Solução para o receptor além do horizonte rádio.....	27
2.2.3.1	Método da Recomendação P.526-11.....	28
2.2.3.2	Dedução do método da Recomendação UIT-R P.526-11 através da TN 101.....	31
2.2.3.3	Dedução do método da Recomendação UIT-R P.526-11 através da série dos resíduos.....	35
2.3	Teoria da difração de Fresnel-Kirchoff.....	39
2.4	Difração sobre obstáculos convexos isolados.....	42
2.4.1	Raio de curvatura do obstáculo.....	48
2.4.2	Fórmulas da Recomendação P.526-11.....	50
2.5	Difração sobre múltiplos obstáculos convexos.....	52
2.5.1	Método Deygout.....	52
2.5.2	Método Assis.....	53
2.6	Ganho de obstáculo.....	54
2.6.1	Conceito de terra lisa.....	56
3	Difração sobre múltiplos obstáculos convexos.....	57
3.1	Definição do obstáculo principal de cada percurso.....	57
3.1.1	Critério complementar ao da distância entre as amostras.....	61
3.2	Cálculo do raio de curvatura de cada obstáculo.....	63
3.3.1	Restrição do número de obstáculos possíveis de serem utilizados.....	64
3.3.2	Restrição da utilização da parcela <i>T</i> relacionada ao número de obstáculos.....	65

3.3.3 Restrição da parcela T relacionada a H/R	65
3.4 Aplicação do modelo de terra esférica lisa	65
3.4.1 Propagação sobre Terra Esférica Lisa	66
4 Resultados numéricos.....	69
4.1 Conjuntos de dados utilizados.....	69
4.2 Critérios de comparação entre os modelos	70
4.3 Comparação de resultados entre os fundamentos teóricos utilizados no modelo	72
4.4 Comparação de resultados com outros modelos	79
4.4.1 Resultados numéricos do modelo.....	80
4.4.2 Modelos utilizados para comparação	82
5 Conclusão	86
Referências Bibliográficas	89
Apêndices	93
APÊNDICE A – Detalhamento do critério complementar para determinação do obstáculo principal, citado na seção 3.1.1	93
APÊNDICE B – Descrição dos modelos utilizados para comparação na seção 4.4.2.....	94
A.1 Modelo sequência de gumes de faca (<i>cascaded knife-edge</i>)	94
A.2 Modelo Bullington com correção C2	95
A.2.1 Correção empírica e correção “taper”	96
A.2.2 Correção C2	96
A.3 Modelo Delta-Bullington.....	100

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Parâmetros da solução de terra plana.

Figura 2.2 – Zona de interferência e zona de difração.

Figura 2.3 – Modelo de dois raios.

Figura 2.4 – Esboço apresentando o comportamento da série dos resíduos nas zonas de interferência e difração.

Figura 2.5 – Solução pela aproximação geométrica para terra esférica.

Figura 2.6 – Admitância normalizada da superfície (K) reproduzida da Rec. UIT-R P.526-11.

Figura 2.7 – Gráfico de $C_I(K,b)$ original da TN 101 para vários valores de b .

Figura 2.8 – Gráfico de $B(K,b)$ original da TN 101 para vários valores de b .

Figura 2.9 – Gráfico de $F_{TN101}(x)$ utilizando as equações da Rec. UIT-R P.526-11.

Figura 2.10 – Gráfico de $F_{TN101}(x)$ original da TN 101 para vários valores de K .

Figura 2.11 – Gráfico de $F_{NT101}(x)$ para os primeiros cinco modos.

Figura 2.12 – Difração por obstáculo do tipo “gume de faca”.

Figura 2.13 – Campo difratado por obstáculo do tipo “gume de faca”.

Figura 2.14 – Contornos Γ_1 e Γ_2 , obtidos da referência [1].

Figura 2.15 – Receptor além do horizonte. Figura reproduzida da referência [1].

Figura 2.16 – Receptor na visibilidade do transmissor. Figura reproduzida da referência [1].

Figura 2.17 – Gráfico relativo à atenuação total $A(v, \rho)$, reproduzido do artigo de Dougherty e Maloney [19].

Figura 2.18 – Gráfico relativo à parcela dependente do raio de curvatura $A(0, \rho)$, reproduzido do artigo de Dougherty e Maloney [19].

Figura 2.19 – Gráfico relativo à parcela dependente do produto $v\rho$, reproduzido do artigo de Dougherty e Maloney [19].

Figura 2.20 – Modelo parabólico para determinação do raio de curvatura do obstáculo. Figura reproduzida da Rec. UIT-R P.526-11.

Figura 2.21 – Método Deygout para dois obstáculos. Figura reproduzida da referência [1].

Figura 2.22 – Método Deygout para vários obstáculos. Figura reproduzida da referência [1].

Figura 2.23 – Terra lisa esférica com obstáculo tipo gume de faca sobreposto. Figura reproduzida da referência [41].

Figura 2.24 – Ganho de obstáculo: $d = 150$ km; $h_1 = 100$ m; $h_2 = 100$ m. Figura reproduzida da referência [41].

Figura 2.25 – Ganho de obstáculo: $f = 300$ MHz; $h_1 = 50$ m; $h_2 = 50$ m. Figura reproduzida da referência [41].

Figura 2.26 – Ganho de obstáculo: $d = 50$ km; $f = 100$ MHz. Figura obtida na referência [41].

Figura 3.1 – Geometria para um sistema com dois gumes de faca. Figura reproduzida da referência [25].

Figura 3.2 – Atenuação D em dB para dois gumes de faca ($h_1=h_2=0$). Figura obtida na referência [25].

Figura 3.3 – Definição do obstáculo principal no percurso TxRx.

Figura 3.4 – Definição dos obstáculos principais nos percursos TxM₁ e M₁Rx.

Figura 3.5 – Definição do obstáculo principal em um perfil mais complexo.

Figura 3.6 – Correção do critério utilizado na figura 3.5.

Figura 3.7 – Critério utilizado na seção 3.2.

Figura 3.8 – Exemplo de perfil real sem obstáculo principal.

Figura 3.9 – Esboço apresentando a definição dos horizontes-rádio dos terminais.

Figura 4.1 – Comparação entre o desvio padrão do modelo proposto com Deygout puro.

Figura 4.2 – Comparação entre o erro médio do modelo proposto com Deygout puro.

Figura 4.3 – Efeito no desvio padrão da utilização do modelo de terra esférica e da correção T (modelo proposto) para mais de um obstáculo.

Figura 4.4 – Efeito no erro médio da utilização do modelo de terra esférica e da correção T (modelo proposto) para mais de um obstáculo.

Figura 4.5 – Efeito da utilização do modelo de terra plana no desvio padrão.

Figura 4.6 – Efeito da utilização do modelo de terra plana no erro médio.

Figura 4.7 – Desvio padrão do erro para o modelo da dissertação.

Figura 4.8 – Erro médio para o modelo da dissertação.

Figura 4.9 – Desvio padrão do erro para os modelos “Cascaded knife-edge” e Bullington com correção C2, híbrido ou não, com e sem correção ganho de obstáculo. Figuras obtidas do documento UIT-R 3J/75.

Figura 4.10 – Erro médio para os modelos “Cascaded knife-edge” e Bullington com correção C2, híbrido ou não, com e sem correção ganho de obstáculo. Figuras obtidas do documento UIT-R 3J/75.

Figura 4.11 – Desvio padrão do erro e erro médio para os modelos Delta-Bullington, com e sem correção ganho de obstáculo, e Bullington com correção C2. Figuras obtidas do documento UIT-R 3J/75.

Listas de tabelas

Tabela 2.1 – Os cinco primeiros zeros da equação (2.43).

Tabela 4.1 – Conjuntos de dados disponíveis.

Tabela 4.2 – Comparação numérica do modelo proposto com o modelo Deygout.

Tabela 4.3 – Resultado numérico mostrando principalmente a influência da correção T .

Tabela 4.4 – Resultado numérico mostrando a influência do modelo híbrido de terra esférica.

Tabela 4.5 – Resultado numérico mostrando a influência do modelo puro de terra esférica.

Tabela 4.6 – Resultado numérico mostrando a influência do modelo de terra plana.

Tabela 4.7 – Resultados numéricos do modelo proposto.

Tabela 4.8 – Resultados numéricos de todos os modelos.

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

CG	<i>Correspondence Group</i>
NBS	<i>National Bureau of Standards</i>
RMS	<i>Root mean square</i>
Rx	<i>Terminal Receptor</i>
TN	<i>Technical Note</i>
Tx	<i>Terminal transmissor</i>
UIT-R	<i>União Internacional de Telecomunicações – Setor de Radiocomunicações</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>

1 Introdução

A análise da difração das ondas eletromagnéticas em enlaces radioelétricos causada por relevo irregular é um problema bastante complexo. As teorias clássicas de propagação apresentam soluções através de integrais ou séries de convergência extremamente lenta. Esta complexidade está associada ao grande número de variáveis envolvidas. Além disso, a distribuição aleatória do relevo eleva ainda mais a dificuldade do problema. Tais questões impossibilitam a elaboração de um modelo matemático preciso, aplicável a qualquer situação, com cálculos práticos que permitam sua utilização em problemas de engenharia. Torna-se então necessária a utilização de formas geométricas simplificadas para estabelecer soluções que permitam uma estimativa razoável da atenuação nas situações reais. Por exemplo, uma elevação no relevo pode ser vista como um semiplano infinito denominado gume de faca (*knife-edge*), ou ser representada por modelos com geometria cilíndrica ou esférica. No entanto, à medida que o modelo teórico se aproxima da situação real, as soluções se tornam mais complexas, dificultando sua aplicação prática.

Modelos idealizados simplificados podem ser obtidos através de aproximações matemáticas aplicáveis em casos particulares. Assim, a partir de soluções gerais rigorosas, pode-se determinar soluções assintóticas de grande interesse prático que, em determinados casos, simplificam substancialmente os cálculos de propagação. O ideal é que essas soluções simplificadas representem um compromisso entre o formalismo matematicamente tratável e a precisão desejável, não comprometendo as estimativas dos cálculos de propagação. Contudo é importante analisar as limitações inerentes a cada caso em particular, pois a extrapolação desses limites pode conduzir a erros excessivos. Entretanto, essas limitações não reduzem o mérito das soluções simplificadas que, quando empregadas corretamente, fornecem resultados numéricos relativamente precisos e diretamente aplicáveis à engenharia.

Nesse contexto, é usual caracterizar o relevo de duas condições distintas: relevo liso e relevo acidentado. Na primeira condição, tem-se a solução pelo modelo de terra plana ou de terra esférica. Na segunda condição, aplica-se a teoria da difração pelas irregularidades do terreno, existindo vários métodos baseados no modelo de Fresnel-Kirchoff [1]. No momento, o Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (UIT-R), ainda busca um modelo simplificado que permita estabelecer a transição entre o relevo liso e o acidentado, com resultados numéricos satisfatórios.

1.1 Histórico

As equações fundamentais da teoria eletromagnética, enunciadas por Maxwell em 1864, demonstraram matematicamente a possibilidade da propagação das ondas. Esta conclusão, confirmada experimentalmente por Hertz (1887) e Marconi (1901) [2], constitui o marco inicial da história da propagação.

Com base nas equações de Maxwell surgiram várias especulações a respeito do mecanismo de propagação de ondas eletromagnéticas. Uma das justificativas encontradas sugeriu que esses mecanismos estariam associados com ondas guiadas ao longo da superfície terrestre. Em 1907, essas ondas foram designadas por Zenneck [3] como “ondas de superfície” e, segundo ele, suas intensidades estariam relacionadas à distância do enlace, ao comprimento de onda e a natureza do solo.

Outras tentativas para explicar os mecanismos de propagação sobre a superfície terrestre apoiaram-se em alguns modelos teóricos. Inicialmente, propuseram o modelo de propagação em espaço livre. No entanto, as condições ideais de espaço livre são impossíveis de ocorrerem, pois na prática haverá uma atmosfera densa, acidentes naturais e artificiais do relevo que provocarão efeitos de reflexão e absorção das ondas em propagação. Portanto, fica clara a necessidade de incorporar os efeitos de não homogeneidade da atmosfera terrestre e a perturbação causada pela presença de terra.

A análise da evolução histórica das soluções existentes demonstra que o problema em questão foi tratado em condições idealizadas, com a complexidade do caso geral gradativamente contornada através da abordagem de casos particulares. As soluções propostas pelas teorias clássicas de propagação enquadram-se em dois segmentos:

- a) Soluções obtidas partindo da suposição de que a propagação se faz em presença de terra plana;
- b) Soluções obtidas supondo que a propagação se faz em presença de terra esférica.

No modelo de terra plana, as pequenas distâncias envolvidas nos enlaces radioelétricos permitiram ignorar os efeitos da curvatura da terra, facilitando o problema. A solução para terra plana e lisa teve sua primeira contribuição nos trabalhos apresentados por Sommerfeld [4] em 1909, cuja formulação integral motivou inúmeros trabalhos nas décadas de 20 e 30, dentre eles destacam-se Weyl [5], Wise [6], van der Pol e Niessen [7]. No entanto, coube a Norton [8] apresentar um método gráfico, resultando em um conjunto de curvas que

permitiram o cálculo imediato da intensidade do campo, com aplicações em problemas práticos de engenharia.

Para enlazes mais longos ganham importância as teorias relacionadas ao modelo da terra esférica. Dentre os diversos trabalhos, destacam-se os estudos de Watson [9], para o caso particular de uma terra esférica lisa condutora perfeita, cujo mérito consistiu em reduzir o problema a uma série de resíduos de rápida convergência. Entretanto, a suposição de uma condutividade infinita restringia o campo de aplicação desta solução. Neste contexto, sobressaíram-se os trabalhos de van der Pol e Bremmer [10] [11] [12], para o caso de uma terra esférica lisa de condutividade finita. Estes autores elaboraram uma solução também baseada na série de resíduos, mas sem restrição quanto a sua aplicação, válida tanto na região de sombra quanto na de visibilidade do transmissor.

A difração por obstáculos do terreno representou durante um longo período um desafio em termos de solução geral. Em 1933 Schelleng et al [13] apresentaram o primeiro modelo matemático para solucionar este problema utilizando a teoria de Fresnel-Kirchoff para um obstáculo tipo gume de faca. Apesar de suas limitações, em certos casos, esta solução em questão conduz a resultados satisfatórios. Entretanto, dependendo da situação, o efeito das dimensões do obstáculo pode gerar um resultado bem diferente do previsto pela teoria de Fresnel-Kirchoff. Consequentemente, ficou evidenciada a necessidade de determinar um fator de correção para esta teoria, de modo a se obter um modelo matemático que fosse mais aderente à situação física dos problemas reais.

Uma das primeiras correções apareceu em 1948, quando Fock [14] aplicou a solução da terra esférica ao problema da difração por obstáculos convexos. Fock demonstrou a existência de duas parcelas no campo difratado. Uma correspondente a que seria obtida pela teoria de Fresnel-Kirchoff ao gume de faca e a outra, função das dimensões do obstáculo, que definiu o desejado fator de correção. Embora formalmente o problema estivesse resolvido, os resultados de Fock foram equacionados ainda de forma muito complexa para uma utilização prática imediata.

Em 1950, Matsuo [15] analisou diversos casos práticos e seu trabalho incluiu uma aplicação da série dos resíduos a obstáculos isolados do terreno. Em 1954, Rice [16] publicou um detalhado estudo sobre a difração de uma onda plana por um cilindro parabólico. Em 1955 Norton et al [17] apresentaram resultados obtidos por interpolação entre duas situações extremas, quais sejam, a difração por um obstáculo do tipo gume de faca e a difração por uma esfera de raio muito grande. Uma importante contribuição à solução do problema foi

desenvolvida por Wait e Conda [18] em 1959. O mérito deste trabalho foi resolver por métodos numéricos a formulação integral de Fock, evitando o problema da lenta convergência da série na região de visibilidade comum às demais soluções existentes. Dougherty e Maloney [19] publicaram em 1964 uma extensão ao trabalho de Wait e Conda, diminuindo as limitações daquele trabalho. Entretanto, algumas aproximações incorretas das funções de Airy limitaram a aplicação da função correspondente ao caso do receptor no horizonte do transmissor. Em 1967, um trabalho posterior de Dougherty e Wilkerson [20] corrigiu esta função. Atualmente, estes resultados são adotados na Recomendação UIT-R P.526-11 [21] para o cálculo da difração por obstáculos convexos. Outros estudos realizados nas décadas de 1950 a 1970, dentre eles Crysdale [22], Neugebauer e Bachynsky [23] mostraram claramente a necessidade de levar em conta o raio de curvatura dos obstáculos, particularmente nas faixas de VHF e UHF. Por outro lado, a disponibilidade atual de relevo digitalizado tornou a determinação do raio de curvatura uma tarefa relativamente simples, podendo ser incorporada com um mínimo de dificuldade ao programa de computador utilizado no cálculo da atenuação.

Para o problema da difração por obstáculos múltiplos observou-se que, mais uma vez, a solução rigorosa do problema é extremamente complexa. Utilizando uma formulação baseada na série dos resíduos, Furutsu [24] apresentou em 1963 uma solução geral, infelizmente muito complicada para possibilitar aplicações práticas. Para obstáculos gume de faca é ainda possível utilizar resultados provenientes de modelos matemáticos como os descritos nos trabalhos de Millington et al [25] e Vogler [26]. Entretanto, em problemas de engenharia, é mais simples empregar métodos empíricos, cuja eficiência tenha sido comprovada através da comparação com dados experimentais.

As soluções empíricas desenvolvidas para o cálculo da difração sobre vários obstáculos procuram reduzir o problema a geometrias simples, mantendo a melhor coerência possível com a situação física real. Historicamente, o método de Bullington [27] de 1947 que reduz os obstáculos a um único equivalente, poderia ser o primeiro a ser destacado. Entretanto, este método tende a ser muito otimista, dependendo da situação geográfica. Desta forma, os métodos de Epstein e Peterson [28], de 1953 e Deygout [29], de 1966, têm sido mais frequentemente adotados nas aplicações práticas.

Finalizando estas considerações sobre a difração das ondas eletromagnéticas pelas irregularidades do terreno resta fazer menção às soluções conhecidas por equações integrais. Matematicamente, soluções desta natureza são bastante gerais, uma vez que levam em conta a

condutividade do solo e os acidentes do terreno sem requerer o uso de geometrias específicas para simplificação do problema. Um dos primeiros trabalhos nesta linha foi desenvolvido por Hufford [30]. Aplicações práticas da formulação de Hufford foram elaboradas por Ott [31][32]. Infelizmente, a lenta convergência da solução numérica da integral de Hufford limitou seu emprego para frequências da ordem de 100 MHz. Adicionalmente, devido a existência de uma derivada no integrando, esta solução na forma atual não pode ser utilizada quando o relevo apresenta descontinuidades.

Mais recentemente, soluções do tipo Equação Integral do Campo Elétrico (EFIE – *Electric Field Integral Equation*) e Equação Integral do Campo Magnético (MFIE – *Magnetic Field Integral Equation*) possibilitaram obter soluções de convergência rápida cobrindo as faixas de VHF e UHF. Por exemplo, Hviid e outros [33] obtiveram resultados satisfatórios com relevos irregulares até 1900 MHz. Akorli e Costa [32] desenvolveram um algoritmo que permitiu reduzir significativamente o tempo de computação da solução acima referida.

1.2 Objetivo

Esta dissertação tem por objetivo apresentar um modelo matemático semiempírico para o cálculo do efeito da difração em enlaces sobre relevo liso, sobre múltiplos obstáculos convexos e sobre terrenos com grau de irregularidade intermediário, nas faixas de VHF e UHF.

Neste contexto os parâmetros elétricos do solo serão supostos constantes dentro das distâncias usuais dos enlaces radioelétricos. Em uma análise mais simplificada, para frequências superiores a 30 MHz, é possível introduzir algumas aproximações adicionais e o cálculo da atenuação é feito independente da polarização e das características do solo.

No que diz respeito à atmosfera terrestre, não serão considerados os efeitos da refração ionosférica e da tropodifusão. O estudo ficará restrito à análise das condições de propagação em um meio homogêneo, desde que seja introduzido o conceito de raio equivalente da terra. Em termos práticos, supõe-se uma atmosfera padrão ($k=4/3$), correspondendo a um raio equivalente da Terra de cerca de 8500 km.

1.3 Roteiro

Tendo em vista o objetivo estabelecido, esta dissertação é estruturada em cinco capítulos, segundo o roteiro apresentado a seguir.

Este primeiro capítulo, de caráter introdutório, apresenta a motivação do tema proposto e os principais objetivos deste trabalho.

O capítulo dois introduz os principais conceitos da teoria da difração relacionados ao modelo proposto, seguindo uma sequência de complexidade iniciada pelo modelo de terra plana, até cálculo da difração sobre obstáculos múltiplos convexos, definindo o parâmetro que será usado para caracterizar a irregularidade do terreno.

O capítulo três descreve o modelo objeto desta dissertação, tratando da definição dos obstáculos principais de cada trecho, da correção relacionada às dimensões do obstáculo principal, e dos critérios de utilização do modelo de terra esférica lisa.

O capítulo quatro mostra os resultados numéricos para os diversos conjuntos de dados disponíveis, comprovando a influência dos fundamentos teóricos na precisão do modelo, e comparando-o com os resultados de outros modelos utilizados para a mesma finalidade.

O capítulo cinco destaca as principais conclusões do trabalho e comenta uma linha de investigação que poderá ser adotada em um trabalho futuro.

2 Fundamentos Teóricos

Este capítulo apresenta um resumo das teorias que fundamentaram o modelo proposto neste trabalho. Na medida do possível, os tópicos teóricos foram desenvolvidos em uma sequência lógica, baseada na complexidade física das situações práticas onde poderiam ser empregados. A maioria destas situações está presente nos conjuntos de dados utilizados para testar o método aqui descrito.

Neste contexto, a seção 2.1 trata da propagação sobre terra plana e introduz os conceitos de zonas de interferência e difração. A seção 2.2 aborda a propagação sobre terra esférica lisa, apresentando a tradicional e complexa solução pela série dos resíduos e, em seguida, a aproximação da óptica geométrica. A seção é finalizada com a formulação simplificada correspondente ao receptor localizado além do horizonte do transmissor, que consta na Recomendação P.526-11 da União Internacional de Telecomunicações – Setor de Radiocomunicações (UIT-R), e que também será utilizada no modelo a ser apresentado.

A seção 2.3 descreve a teoria da difração de Fresnel-Kirchoff, a fim de apresentar a fórmula da difração para obstáculos do tipo gume de faca, básica para o modelo proposto neste trabalho. A seção 2.4 comenta o efeito da difração sobre obstáculos convexos isolados. Através deste efeito destaca-se a importância das dimensões do obstáculo no cálculo da difração, introduzindo-se um valor de correção à fórmula de difração para obstáculos do tipo gume de faca. Complementando a teoria da difração por obstáculos convexos, a seção 2.5 reúne uma série de informações sobre métodos práticos para o cálculo do efeito da difração sobre múltiplos obstáculos convexos, objetivo principal desta dissertação. Concluindo o capítulo, a seção 2.6 define o parâmetro empírico Δh , utilizado para quantificar a irregularidade do terreno, e que será empregado no estabelecimento de critérios para aplicação do modelo a proposto.

2.1 Propagação sobre terra plana

A primeira solução para o problema da propagação sobre terra plana foi formulada em 1909 por Sommerfeld [4], para o caso da terra perfeitamente lisa. Esse problema continuou sendo investigado por diversos autores até ter sua síntese final apresentada por Norton [8], em 1936 e 1937. O modelo de Norton possui interpretação física relativamente simples, mostrando que o campo total devido a uma antena situada a uma determinada altura do solo é dado pela composição de uma onda espacial com uma onda de superfície. A onda espacial

consiste da composição de uma onda direta e outra refletida conforme a figura 2.1, ou seja, é a solução obtida da aplicação da óptica geométrica. A onda de superfície é de natureza mais complexa, sendo consequência da condutividade finita do solo. Esta onda é guiada sobre o solo e está diretamente ligada ao fator de atenuação da onda de superfície, que depende da distância, da frequência e dos parâmetros elétricos do terreno.

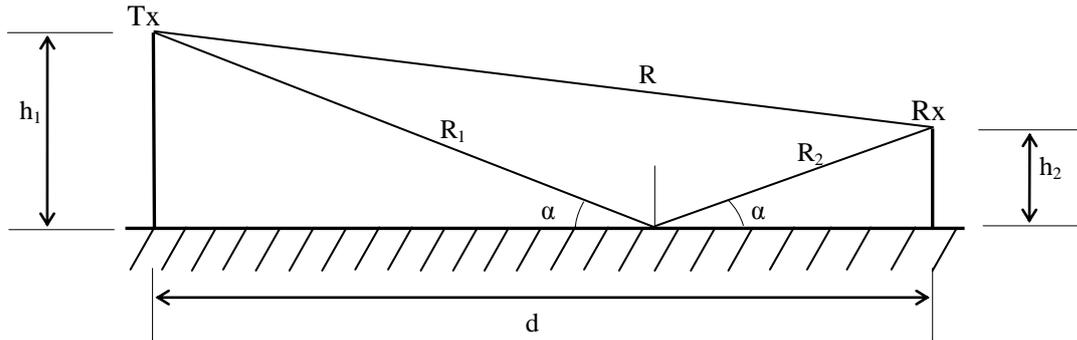


Figura 2.1 – Parâmetros da solução de terra plana.

Segundo a notação de Norton, o campo elétrico sobre terra plana é dado por:

$$|E_Z| = E_0 |(1 + R_F e^{-jk_0 \Delta} + (1 - R_F) F_A e^{-jk_0 \Delta})| \quad (2.1)$$

onde:

E_0 - campo elétrico em condição de espaço livre;

$$\Delta = R_1 + R_2 - R \approx \frac{2h_1 h_2}{d} \quad (d \gg h_{1,2}); \quad (2.2)$$

R_F - coeficiente de reflexão de Fresnel para ondas planas;

$$R_F = \begin{cases} \frac{k_1^2 \operatorname{sen} \alpha - k_0 \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \cos^2 \alpha}}{k_1^2 \operatorname{sen} \alpha + k_0 \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \cos^2 \alpha}} & (\text{pol. vertical}) \\ \frac{k_0 \operatorname{sen} \alpha - \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \cos^2 \alpha}}{k_0 \operatorname{sen} \alpha + \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \cos^2 \alpha}} & (\text{pol. horizontal}) \end{cases}; \quad (2.3)$$

$$F_A = [1 - j\sqrt{\pi v} e^{-v} \operatorname{erfc}(j\sqrt{v})] - \text{fator de atenuação}; \quad (2.4)$$

$$v = \frac{4p}{(1 - R_F)^2}; \quad (2.5)$$

$$p = \begin{cases} -j \frac{k_0^3 d}{2k_1^2} \left[1 - \frac{k_0^2}{k_1^2} \cos^2 \alpha \right] & (\text{pol. vertical}) \\ -j \frac{k_1^2 d}{2k_0^2} \left[1 - \frac{k_0^2}{k_1^2} \cos^2 \alpha \right] & (\text{pol. horizontal}) \end{cases}; \quad (2.6)$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}; \quad (2.7)$$

$$k_1 = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon'}; \quad (2.8)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_0(\varepsilon_r - j60\sigma\lambda); \quad (2.9)$$

ω – frequência angular;

λ – comprimento de onda;

μ_0 - permeabilidade magnética do vácuo;

ε_0 - permissividade elétrica do vácuo;

$\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ - constante dielétrica relativa do solo;

σ – condutividade elétrica do solo.

2.1.1 Zona de interferência e zona de difração

A zona de interferência é a região onde a superposição da onda direta e da onda refletida provoca a oscilação do campo elétrico resultante em torno do seu valor de espaço livre. A zona de difração é a região onde o campo elétrico está sempre abaixo do seu valor no espaço livre, decrescendo monotonicamente à medida que o receptor se afasta do transmissor. Para facilitar a análise da variação do campo, não será considerado inicialmente o efeito da onda de superfície. Desta forma pode-se escrever:

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = \left| \left(1 + R_F e^{-j\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d}} \right) \right| \quad (2.10)$$

Supondo h_1 e h_2 fixos, observa-se que o campo elétrico nas zonas de difração e interferência apresenta o comportamento mostrado na figura 2.2:

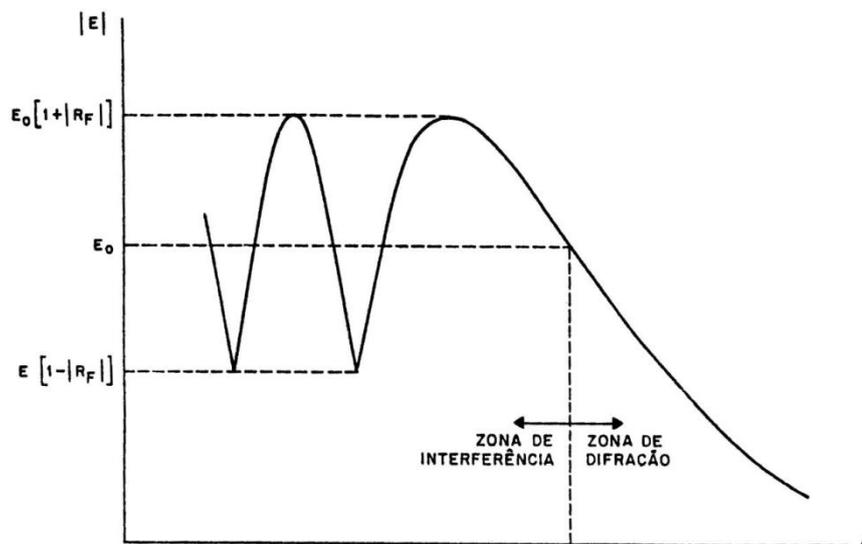


Figura 2.2 – Zona de interferência e zona de difração.

Nos enlaces reais, o ângulo de incidência normalmente é muito pequeno. No caso da terra perfeitamente lisa pode-se considerar $R_F \approx -1$. Esta suposição facilita a definição de um critério de separação das zonas de interferência e de difração. Em função de tais considerações a equação (2.10) pode ser reescrita:

$$E = 2E_0 \operatorname{sen} \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad (2.11)$$

Por outro lado, de acordo com a figura 2.3,

$$H = \sqrt{\frac{4h_1 h_2 d_1 d_2}{d^2}}; \quad (2.12)$$

e pela definição do primeiro raio de Fresnel,

$$R = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}} \quad (2.13)$$

chega-se a,

$$\frac{E}{E_0} = 2 \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} \left(\frac{H}{R} \right)^2 \quad (2.14)$$

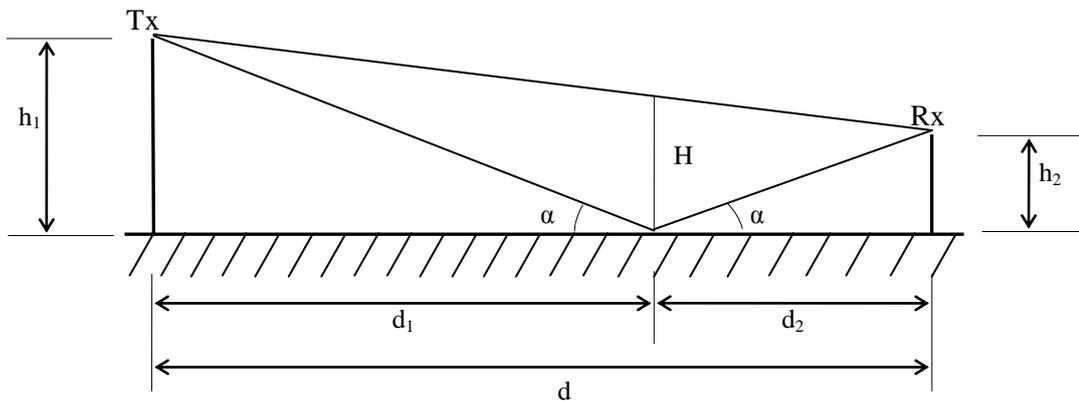


Figura 2.3 – Modelo de dois raios.

Pode-se considerar como o início da zona de difração a situação em que $E = E_0$, para o maior valor possível de d . Aplicando este conceito na equação (2.14) obtém-se:

$$2 \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} \left(\frac{H}{R} \right)^2 = 1,$$

ou seja,

$$\frac{\pi}{2} \left(\frac{H}{R} \right)^2 = \frac{\pi}{6}$$

portanto,

$$H = 0,58R \quad (2.15)$$

A relação encontrada entre H e R estabelece o critério de separação entre a zona de interferência e a zona de difração, que pode ser enunciado da seguinte forma: “Quando existe uma folga maior ou igual a 0,6 da primeira zona de Fresnel em todo percurso, diz-se que o receptor encontra-se na zona de interferência, caso contrário, diz-se que o receptor encontra-se na zona de difração”.

O parâmetro H da figura 2.3, que caracteriza a folga do percurso, foi determinado sobre o ponto de reflexão. Este procedimento é justificado da seguinte maneira: suponha-se que a distância entre Tx e Rx seja mantida constante. Diminuindo-se as alturas h_1 e h_2 reduz-se, conseqüentemente, a suposta folga do percurso, até que seja alcançada uma situação onde a elipse que limita o valor de 0,6 da primeira zona de Fresnel, tangenciará a superfície do solo. Como a tangente a uma elipse faz, no ponto de tangência, ângulos iguais com os raios vetores que ligam este ponto aos focos, conclui-se que este é o ponto de reflexão, o que justifica o procedimento acima.

2.2 Propagação sobre terra esférica

Foi estudada inicialmente por Watson [9], para o caso particular do solo com condutividade perfeita. Em 1918, esse autor demonstrou os procedimentos necessários para converter a solução, então conhecida como “série dos harmônicos zonais”, em uma série de convergência mais rápida, que assim poderia ter aplicações práticas em problemas de engenharia. Esse procedimento ficou conhecido como “transformação de Watson” e a solução resultante como “série dos resíduos”. Contudo, a solução geral encontrada era ainda de forma analítica muito complicada e de aplicabilidade restrita.

Baseados na solução de Watson, diversos autores investigaram o problema, sobressaindo-se os diversos trabalhos de Van der Pol e Bremmer [9] [10] [11], para o caso específico de uma terra esférica lisa e homogênea de condutividade finita. Segundo a teoria formulada por esses autores, a aplicação da “transformação de Watson” resultaria em uma integral (integral de Watson) que apresenta duas soluções de interesse prático.

2.2.1 Solução pela série dos resíduos

A solução mais rigorosa leva à série dos resíduos, válida tanto na região de visibilidade quanto na de sombra do transmissor. Essa solução permite que a intensidade do campo elétrico seja calculada como a soma da contribuição de vários “modos” discretos. Esses modos formam uma série, e cada modo tem uma taxa de atenuação com a distância maior que a anterior. Desta forma, para distâncias além do horizonte, somente os modos de menor ordem contribuem de forma significativa para a soma. A uma determinada distância do horizonte, é possível aproximar o campo pela contribuição de um modo: o menos atenuado (o primeiro termo da série dos resíduos). Nesse caso, é possível dividir a expressão da intensidade do campo em três fatores: um dependente da distância e outros dois dependentes da altura das antenas. Será mostrado que, em termos práticos, o primeiro modo pode ser uma aproximação razoável para o somatório total, mesmo para distâncias muito próximas do horizonte rádio. A solução rigorosa do problema da propagação sobre terra esférica não é prática para utilização na região de visibilidade do transmissor. Nesse caso, a solução pela óptica geométrica é mais adequada. Contudo, de forma análoga ao problema da terra plana, esta só tem validade na região de interferência do transmissor, isto é, quando existe uma folga de pelo menos 0,6 da primeira zona de Fresnel.

Conforme citado anteriormente, na região de difração, para distâncias maiores que o horizonte do transmissor, a solução pela série dos resíduos fica extremamente simplificada, pois são necessários no máximo dois termos para a convergência da mesma. No entanto, para região localizada entre o limite de utilização da solução óptica e o horizonte do transmissor o número de termos necessários aumenta significativamente, dificultando o cálculo e limitando seu emprego na solução de problemas práticos. A figura 2.4 mostra o número de termos da série dos resíduos necessário para o cálculo do campo. É interessante notar que esse gráfico demonstra a generalização da utilização da série dos resíduos para o cálculo do campo em qualquer distância.

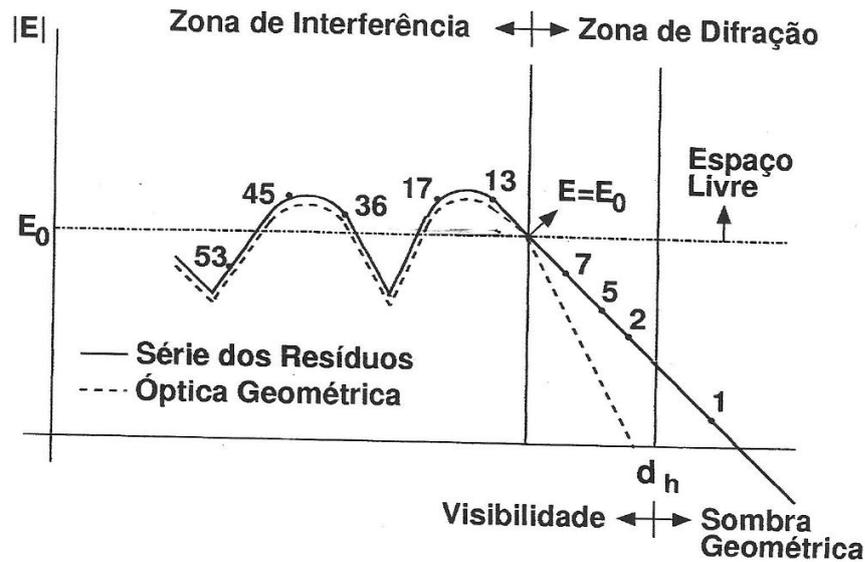


Figura 2.4 – Esboço apresentando o comportamento da série dos resíduos nas zonas de interferência e difração.

Em função da série dos resíduos, o campo elétrico é dado por:

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = 2\sqrt{2\pi\chi} \left| \sum_{s=0}^{\infty} \frac{e^{-j\tau_s\chi}}{\left(2\tau_s - \frac{1}{\delta^2}\right)} f_s(h_1)f_s(h_2) \right| \quad (2.16)$$

onde,

$$\chi = (k_0 a_e)^{1/3} \frac{d}{a_e} - \text{distância numérica entre as antenas;} \quad (2.17)$$

d – distância entre as antenas;

$a_e = Ka$ – raio equivalente da Terra;

$$\delta = \begin{cases} -j \frac{k_1^2/k_0^2}{(k_0 a)^{1/3} \sqrt{k_1^2/k_0^2 - 1}} & \text{(polarização vertical)} \\ 1 & \\ -j \frac{1}{(k_0 a)^{1/3} \sqrt{k_1^2/k_0^2 - 1}} & \text{(polarização horizontal)} \end{cases}; \quad (2.18)$$

$$f_s(h_{1,2}) = \frac{\sqrt{\frac{\chi_{h_{1,2}} - 2\tau_s}{-2\tau_s}} H_{\frac{1}{3}}^{(2)} \left[\frac{1}{3} (\chi_{h_{1,2}}^2 - 2\tau_s)^{\frac{3}{2}} \right]}{H_{\frac{1}{3}}^{(2)} \left[\frac{1}{3} (-2\tau_s)^{\frac{3}{2}} \right]} - \text{ganho de altura;} \quad (2.19)$$

$$\chi_{h_{1,2}} = (k_0 a_e)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{2h_{1,2}}{a_e}} - \text{altura numérica das antenas;} \quad (2.20)$$

$h_{1,2}$ – alturas das antenas acima do solo;

τ_s – são as soluções da equação (2.21):

$$e^{-j\frac{\pi}{3}} \frac{H_{2/3}^{(2)} \left[\frac{1}{3} (-2\tau_s)^{3/2} \right]}{H_{1/3}^{(2)} \left[\frac{1}{3} (-2\tau_s)^{3/2} \right]} = -\frac{1}{\delta \sqrt{-2\tau_s}}; \quad (2.21)$$

$H_n^{(2)}$ - função de Hankel cilíndrica de 2ª espécie e ordem n.

2.2.2 Solução pela aproximação geométrica

A outra solução possível é a aproximação geométrica, válida somente na região de visibilidade do transmissor, para alturas não nulas de antenas. Segundo essa solução o campo elétrico tem por expressão:

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = |1 + DR_E e^{-jk_0 \Delta}| \quad (2.22)$$

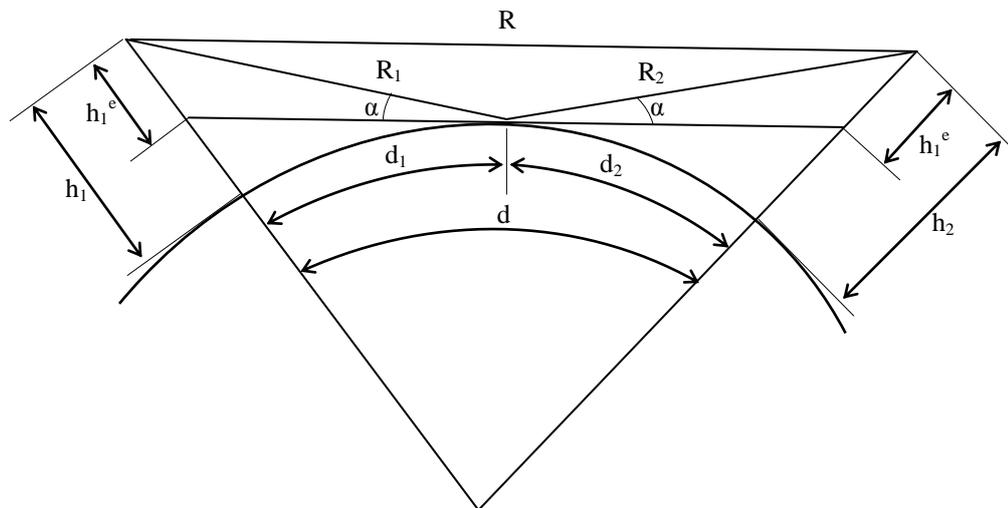


Figura 2.5 – Solução pela aproximação geométrica para terra esférica.

De acordo com a figura 2.5, são definidos:

E_0 – campo elétrico em condição de espaço livre;

$$\Delta = R_1 + R_2 - R; \quad (2.23)$$

R_E – coeficiente de reflexão esférico, onde para polarização vertical,

$$R_E = \frac{-\frac{1}{x} \frac{d}{dx} \{x h_n^{(1)}(x)\}_{x=k_0 a_e} - \frac{1}{x} \frac{d}{dx} \{x h_n^{(1)}(x)\}_{x=k_1 a_e}}{\frac{1}{x} \frac{d}{dx} \{x h_n^{(2)}(x)\}_{x=k_0 a_e} + \frac{1}{x} \frac{d}{dx} \{x h_n^{(1)}(x)\}_{x=k_1 a_e}} \quad (2.24)$$

Para polarização horizontal basta substituir o fator $1/x$ por x .

onde,

$$n = k_0 a_e \sin \varphi; \quad (2.25)$$

$h_n^{(l)}$ - função de Hankel esférica de 1ª espécie e ordem n.

D – coeficiente de divergência.

$$D = \frac{a_e(R_1 + R_2)\sqrt{\sin\varphi\cos\varphi}}{\sqrt{(a_e + h_1)(a_e + h_2)[R_1(a_e + h_2)\cos\varphi_2 + R_2(a_e + h_1)\cos\varphi_1]}}; \quad (2.26)$$

A equação (2.22) é muito semelhante à utilizada para terra plana, com exceção da presença do coeficiente de divergência D e da forma do coeficiente de reflexão esférico R_E , que é mais complexo se comparado ao coeficiente de reflexão de Fresnel. Entretanto, caso seja satisfeita a relação:

$$tg^3\alpha \gg \frac{1}{k_0 a_e} \quad (2.27)$$

é possível substituir o coeficiente de reflexão esférico pelo de Fresnel.

Utilizando as aproximações abaixo:

$$R_1 + R_2 \approx d;$$

$$a_e + h_{1,2} \approx a_e;$$

$$\cos\varphi \approx \sin\alpha;$$

$$\cos\varphi_{1,2} \cong \frac{h_{1,2}^e}{d_{1,2}};$$

$$h_{1,2} \cong h_{1,2}^e + \frac{d_{1,2}^2}{2a_e},$$

pode-se representar o coeficiente de divergência por:

$$D = \sqrt{1 + \frac{2d_1 d_2}{a_e(h_1^e + h_2^e)}} \quad (2.28)$$

Utilizando as mesmas aproximações acima, chega-se a:

$$\Delta = \frac{2h_1^e h_2^e}{d} \quad (2.29)$$

2.2.3 Solução para o receptor além do horizonte rádio

O método para solução da difração sobre terra esférica para receptores além do horizonte rádio está descrito na seção 3.1 da Recomendação UIT-R P.526-11 [21] e possui um histórico iniciado em 1977. As fórmulas da seção 3.1.1 dessa Recomendação existem, com algumas modificações desde 1986, conforme descrito no Report 715-2 [35] associado a essa Recomendação. Portanto, é muito difícil resgatar a documentação com todo o processo

dedutivo que as originou. Por outro lado, antes de 1986 essa solução já existia numa forma mista gráfico-analítica, com alguns dos parâmetros sendo obtidos através de gráficos originados da *Technical Note 101*(TN 101) do *National Bureau of Standards* (NBS) [36].

Conforme descrito na Recomendação P.526-11, a premissa principal do método é que suas fórmulas se baseiam no primeiro termo da série dos resíduos. Várias fontes podem ser utilizadas para chegar à fórmula atual. Os parágrafos a seguir estão baseados nas seguintes referências:

- a) Capítulo 8 da TN 101 do NBS, que contém um misto de gráficos e fórmulas que foram utilizadas nas Recomendações da UIT até 1986.
- b) O livro editado por Kerr [37] que apresenta uma formulação muito semelhante à utilizada nas inúmeras versões da citada Recomendação a partir de 1986 incluindo a atual (P.526-11).

2.2.3.1 Método da Recomendação P.526-11

Com o objetivo de facilitar a dedução das fórmulas descritas na Recomendação P.526-11, inicialmente será apresentado o método propriamente dito. Posteriormente será descrito os prováveis caminhos utilizados para chegar a essas fórmulas, baseadas nas referências citadas ao final da seção anterior.

A intensidade do campo difratado, E , relativa à intensidade do campo de espaço livre, E_0 , é dada por:

$$20 \log \frac{E}{E_0} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2) \text{ dB} \quad (2.30)$$

O comprimento do percurso entre antenas normalizado X e as alturas de antenas normalizadas Y_1 e Y_2 são definidas pelas equações abaixo:

$$X = \beta \left(\frac{\pi}{\lambda a_e^2} \right)^{1/3} d \quad (2.31)$$

$$Y = 2\beta \left(\frac{\pi^2}{\lambda^2 a_e} \right)^{1/3} h \quad (2.32)$$

ou, em unidades práticas:

$$X = 2,188\beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d \quad (2.33)$$

$$Y = 9,575 \cdot 10^{-3} \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h \quad (2.34)$$

onde:

a_e - raio equivalente da Terra (km);
 d - distância entre as antenas (km);
 h - altura das antenas (m);
 f - frequência (MHz).

A quantidade β é dada em função da admitância normalizada da superfície (K):

$$\beta = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4} \quad (2.35)$$

onde K , em unidades práticas, poder ser calculada por:

$$K_H = 0,36(a_e f)^{-1/3} [(\epsilon_r - 1)^2 + (18000\sigma/f)^2]^{-1/4} \quad (2.36)$$

$$K_V = K_H [\epsilon_r^2 + (18000\sigma/f)^2]^{1/2} \quad (2.37)$$

onde,

ϵ_r - permissividade relativa do solo;
 σ - condutividade elétrica do solo (S/m);
 f - frequência (MHz).

Os valores típicos de K estão mostrados na figura 2.6.

A função $F(X)$ depende somente da distância normalizada X , e é dada por:

$$F(X) = 11 + 10 \log X - 17,6X \quad \text{para } X \geq 1,6 \quad (2.38)$$

$$F(X) = -20 \log X - 5,6488X^{1,425} \quad \text{para } X < 1,6 \quad (2.39)$$

A função $G(Y)$ é dada pela fórmula abaixo:

$$G(Y) = 17,6(B - 1,1)^{1,2} - 5 \log(B - 1,1) - 8 \quad \text{para } B > 2 \quad (2.40)$$

Para $B < 2$ o valor de $G(Y)$ é também função de K :

$$G(Y) = 20(B - 0,1B^3) \quad \text{para } 10K < B \leq 2 \quad (2.41)$$

$$G(Y) = 2 + 20 \log K + 9 \log \left(\frac{B}{K} \right) \left[\log \left(\frac{B}{K} \right) + 1 \right] \quad \text{para } \frac{K}{10} < B \leq 2 \quad (2.42)$$

$$G(Y) = 2 + 20 \log K \quad \text{para } B \leq \frac{K}{10} \quad (2.43)$$

Sendo $B = \beta Y$.

A precisão da intensidade do campo difratado é limitada em até 2 dB para valores de X , Y_1 e Y_2 definidos pela fórmula:

$$X - (\beta Y_1)^{1/2} \Delta(Y_1, K) - (\beta Y_2)^{1/2} \Delta(Y_2, K) > X_{lim} \quad (2.44)$$

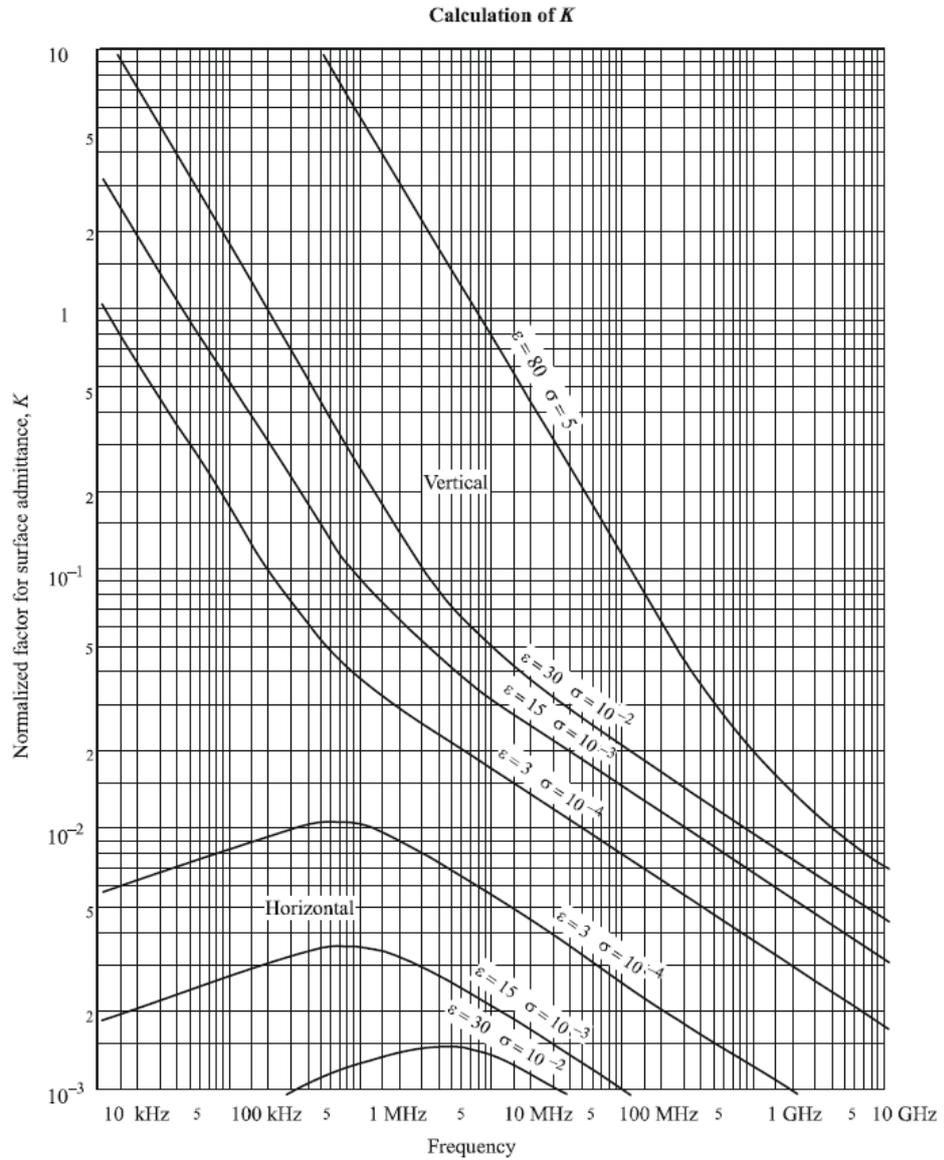


Figura 2.6 – Admitância normalizada da superfície (K) reproduzida da Rec. UIT-R P.526-11.

onde:

$$X_{lim} = 1,096 - 1,280(1 - \beta); \quad (2.45)$$

$$\Delta(Y, K) = \Delta(Y, 0) + 1,779(1 - \beta)[\Delta(Y, \infty) - \Delta(Y, 0)]; \quad (2.46)$$

$$\Delta(Y, 0) = 0,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{0,5 \log(\beta Y) - 0,255}{0,3} \right) \right]; \quad (2.47)$$

$$\Delta(Y, 0) = 0,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{0,5 \log(\beta Y) - 0,255}{0,25} \right) \right]. \quad (2.48)$$

Consequentemente, a distância mínima d_{min} para que a equação (2.30) seja válida, é dada por:

$$X_{min} = X_{lim} + (\beta Y_1)^{\frac{1}{2}} \Delta(Y_1, K) + (\beta Y_2)^{\frac{1}{2}} \Delta(Y_2, K) \quad (2.49)$$

onde d_{min} é obtido da equação 2.31.

2.2.3.2 Dedução do método da Recomendação UIT-R P.526-11 através da TN 101

Superficialmente a fórmulas da TN 101 têm estrutura similar às da Rec. UIT-R P.526-11. A equação equivalente à da equação (2.30), utilizando a notação da TN 101, é dada por:

$$20 \log \frac{E}{E_0} = -G_{TN101}(x_0) + -F_{TN101}(x_1) + F_{TN101}(x_2) + C_1(K, b) \text{ dB} \quad (2.50)$$

onde,

x_0 – distância entre antenas;

$x_{1,2}$ – horizonte das antenas Tx e Rx ;

K – magnitude da admitância normalizada da superfície;

b – fase da admitância normalizada da superfície.

O parâmetro $C_1(K, b)$ definido graficamente na figura 2.7, possui valores limites $C_1(0, b) = 20,03 \text{ dB}$ e $C_1(\infty, b) = 20,94 \text{ dB}$, independente do valor de b . Para K entre $0,1$ e 10 , $C_1(K, b)$ varia entre $16,5$ e $21,5$, dependendo do valor de b . Como a Rec. UIT-R P.526-11 não leva em conta a fase da admitância normalizada da superfície, e nem o termo C_1 aparece na equação (2.30), pode-se supor que o valor constante de $\sim 20 \text{ dB}$ (i.e. o menor valor de K) foi considerado para $C_1(K, b)$ e que esse valor foi absorvido nas funções $F(\cdot)$ e $G(\cdot)$.

A definição da distância normalizada, x_0 , e das alturas, x_1 e x_2 , necessita de um pouco mais de manipulação para podermos compará-los com as quantidades X e Y . Essas relações são:

$$x_0 = \Lambda X; \quad (2.51)$$

$$x_{1,2} = \Lambda (\beta Y_{1,2})^{1/2}; \quad (2.52)$$

onde,

$$\Lambda = \left(\frac{8497^2 c}{\pi} \right)^{1/3} \frac{B(K, b)}{\beta(K)} \quad (2.53)$$

Nessa equação, a velocidade da luz, c , é dada em unidades km.kHz. O parâmetro $B(K, b)$ é definido graficamente na figura 2.8 e limitado pelos valores $B(0, b) = 1,607$ e $B(\infty, b) = 0,7003$, independente do valor de b . Por inspeção da figura 2.8, podemos observar que $B(K, b)$ é fortemente dependente de K , ao contrário de b , sugerindo que o valor $B(K, b) = 1,607$ para

$K \rightarrow 0$, pode ser utilizado: (1) para maioria dos casos de polarização horizontal; e (2) para polarização vertical em frequências acima de 20 MHz sobre a terra e acima de 300 MHz sobre água salgada.

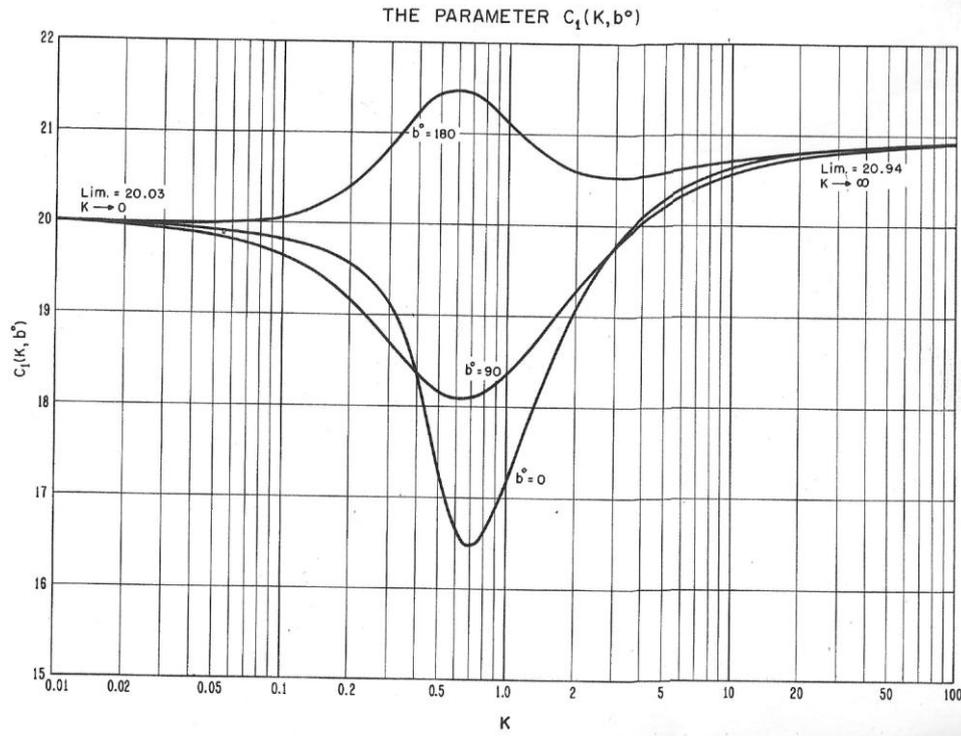


Figura 2.7 - Gráfico de $C_1(K, b)$ original da TN 101 para vários valores de b .

Pode-se observar através da equação (2.53), que $\beta(K)$ na equação (2.35) é proporcional a $B(K, b)$ com $b=0$. Essa constante de proporcionalidade deve ser 1,607 para satisfazer a necessidade de que $B(0, b)=1,607$ quando $\beta(0)=1$. Ou seja:

$$B(K, b) = 1,607\beta(K) \quad (2.54)$$

Mais uma vez observando os valores limites da figura 2.8, pode-se concluir que o valor da razão $B(0, b)/B(\infty, b)$ é igual a 2,29, aproximadamente o mesmo valor da razão $\beta(0)/\beta(\infty)$, confirmando então a validade da equação (2.35) e levando a um valor constante para o parâmetro Λ , nas equações 2.51 e 2.52.

$$\Lambda = 305,75 \quad (2.55)$$

Finalmente é possível comparar as funções de distância e de ganho de altura da Rec. UIT-R P.526-11 e da TN 101. Na TN 101, a função de distância é dada pela equação:

$$G_{TN101}(x_0) = 0,0575x_0 - 10\log x_0 \quad (2.56)$$

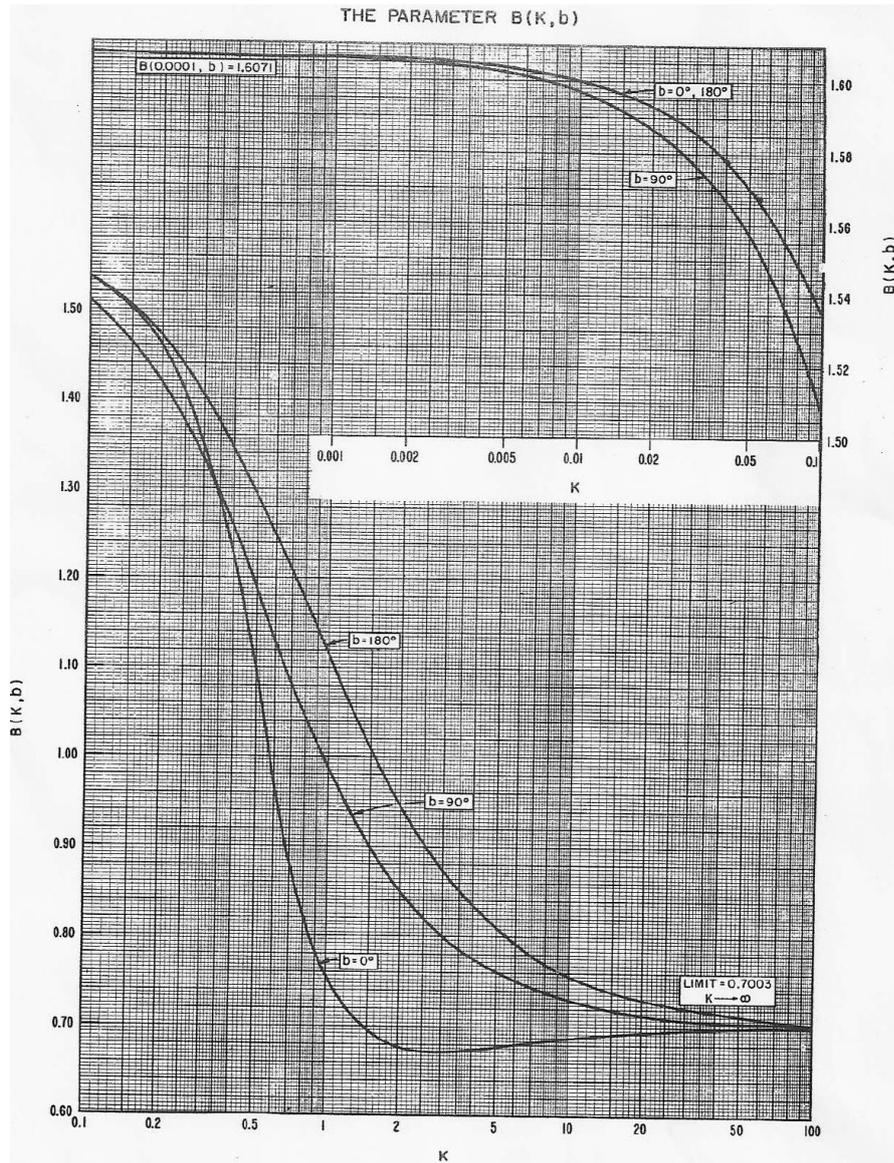


Figura 2.8 – Gráfico de $B(K, b)$ original da TN101 para vários valores de b .

Convertendo x_0 para X , através da equação (2.51), temos:

$$G_{TN101}(x_0) = 17,58X - 10 \log X - 24,85 \quad (2.57)$$

A única diferença em relação à equação (2.38) é o termo constante, mas isso era esperado, já que o termo $C_1(K, b)$ deve ser absorvido pelas funções $G(\cdot)$ e $F(\cdot)$, logo temos:

$$G_{TN101}(x_0) = -F_{P526}(X) - 13,85 \quad (2.58)$$

Para fazer as equações 2.30 e 2.50 concordarem e levando em conta o valor 20 dB de $C_1(K, b)$, chegamos à equivalência:

$$F_{TN101}(x_{1,2}) = G_{P526}(Y_{1,2}) - 16,93 \quad (2.59)$$

Confirma-se a validade da equação (2.59), traçando curvas de F_{TN101} utilizando as equações (2.40) à (2.43) de G_{P526} , convertido em F_{TN101} através da equação (2.59), e com o valor de x convertido em X através da equação (2.51), conforme ilustrado na figura 2.9.

A comparação das curvas das figuras 2.9 e 2.10 (diretamente retirada da TN 101) demonstra que para valores de x pequenos e grandes, as curvas de ambos gráficos se correspondem de forma quase perfeita, para qualquer valor de K . Para valores de x intermediários ($10 \text{ km} < x < 500 \text{ km}$), a profundidade da “queda” das curvas no gráfico originado da TN 101, depende do valor da fase da admitância superficial, b . As curvas baseadas na Rec. UIT-R P.526-11 são independentes de b . Contudo, comparando ambos os conjuntos de curvas, observa-se que elas seguem as curvas da TN 101 para um valor de b entre 0° e 90° , ficando claro que as aproximações realizadas acima são perfeitamente coerentes, considerando que b foi ignorado na Rec. UIT-R P.526-11.

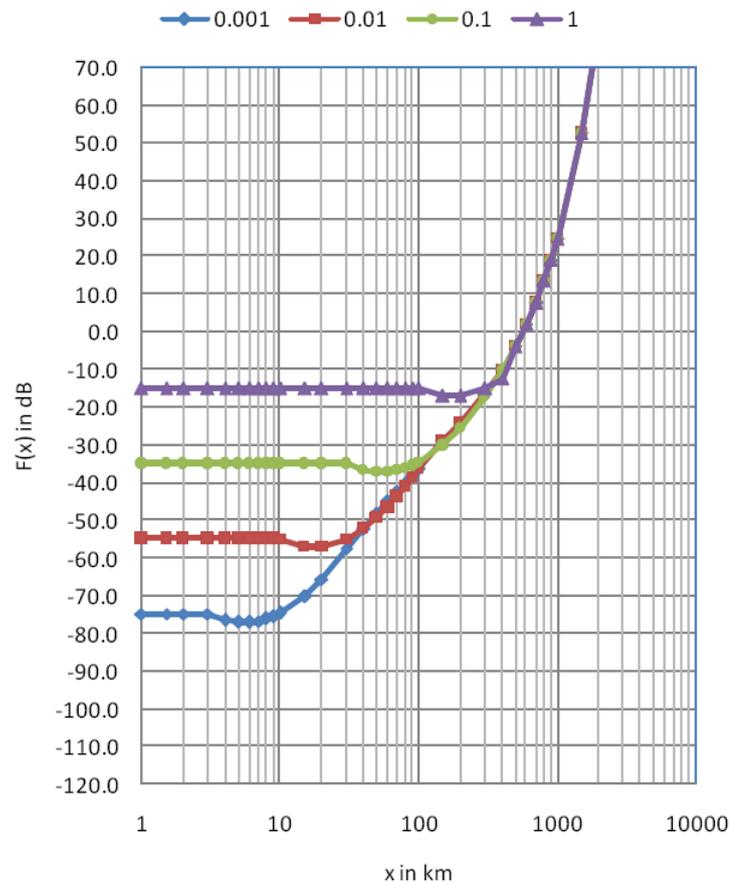


Figura 2.9 – Gráfico de $F_{TN101}(x)$ utilizando as equações da Rec. UIT-R P.526-11.

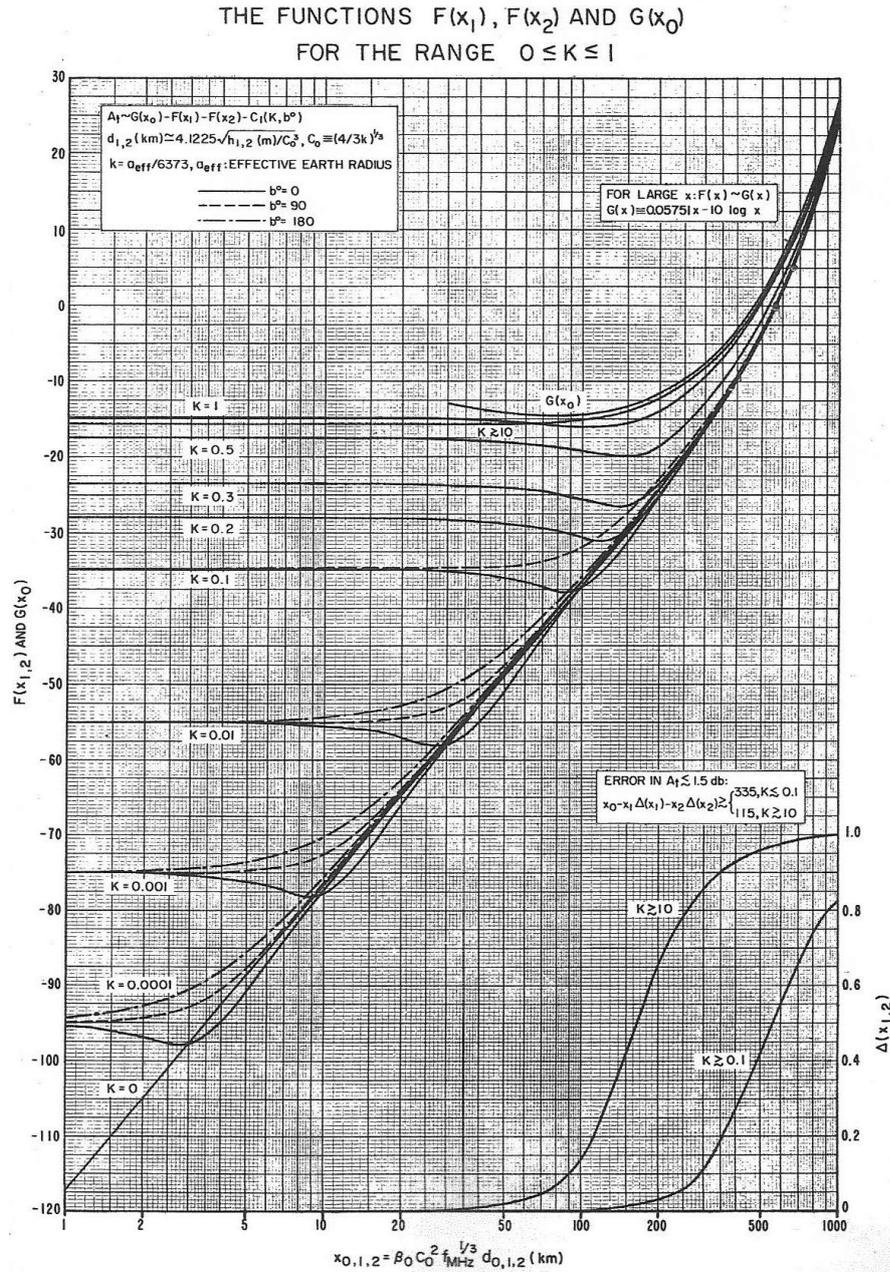


Figura 2.10 - Gráfico de $F_{TN101}(x)$ original da TN 101 para vários valores de K .

2.2.3.3 Dedução do método da Recomendação UIT-R P.526-11 através da série dos resíduos

Outra forma de se chegar ao método da Rec. UIT-R P.526-11 foi apresentada por Kerr [37], derivada diretamente da série dos resíduos, utilizando convenções e normalizações muito parecidas com as da Rec. UIT-R P.526-11. A equação (2.60) apresenta a série dos resíduos para a intensidade do campo difratado, seguindo a notação de Kerr, resultando em uma considerável redução de complexidade matemática:

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = 2\sqrt{\pi X} \left| \sum_{m=1}^{\infty} e^{-iA_m X} U_m(Z_1) U_m(Z_2) \right| \quad (2.60)$$

onde:

$$X = \left(\frac{\pi n_0}{\lambda a_e^2} \right)^{1/3} d \quad (2.61)$$

$$Z = 2 \left(\frac{\pi^2 n_0^2}{\lambda^2 a_e} \right)^{1/3} h \quad (2.62)$$

Comparando estes parâmetros com as equações 2.31 e 2.32, observa-se que X e Z de Kerr são equivalentes ao X e Y da P.526-11, exceto pelos termos n_0 (índice de refração na superfície) e β da P.526-11 (função da admitância normalizada de superfície). Estas diferenças estão relacionadas às diferentes condições de atmosfera e condições de contorno utilizadas em ambos os trabalhos. Este trabalho não será detalhado suficientemente para estudar as propriedades elétricas da superfície, logo assumir-se-á que as normalizações de ambos os trabalhos se equivalem.

Na equação (2.60), a intensidade do campo difratado relativo a do espaço livre é dada por uma simples dependência $X^{1/2}$, multiplicado por uma soma de modos. Para cada modo, o termo $\exp(iA_m X)$ indica como o modo se propaga com a distância. Os termos A_m são as raízes da equação de modos, que depende do perfil do índice de refração e das condições de contorno. Os termos A_m são números complexos, logo cada modo terá velocidade de fase e taxa de atenuação diferentes. No caso de um único modo, o termo $U_m(Z)$ pode ser considerado a função do ganho de altura, mas é importante notar que, para o somatório de modos, não é possível fatorar a fórmula da intensidade de campo, a fim de separar os termos de distância e de ganho de altura.

Na prática, o valor da parte imaginária de A_m aumenta rapidamente com m . Para um valor de X suficientemente grande, somente alguns modos contribuem de maneira significativa para a soma de modos. As fórmulas da Rec. UIT-R P.526-11 e da TN 101 correspondem ao caso em que todos os modos, exceto o primeiro podem ser ignorados. Neste caso, a equação (2.60) pode ser fatorada de modo a separar as funções distância e ganho de altura:

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = 2\sqrt{\pi X} |e^{-iA_1 X}| \times |U_1(Z_1)| \times |U_1(Z_2)| \quad (2.63)$$

Para atmosfera linear, ou seja, com índice de refração constante, pode ser demonstrado que as raízes da equação de modos, A_m , podem ser escritas em termos dos zeros, ζ_m , da função de Airy, $Ai(z)$:

$$A_m = |\zeta_m| e^{2\pi i/3} + \frac{1}{Hp} \quad (2.64)$$

O termo de distância da equação (2.62) fica:

$$f_{modo}(X) = 2\sqrt{\pi X} e^{-|\zeta_m| \cos(\frac{\pi}{6})X} e^{\frac{X}{|Hp|}} \quad (2.65)$$

ou em dB:

$$F_{modo}(X) = 20 \log \left| \frac{E}{E_0} \right| = 10,992 + 10 \log X - \left[7,5222 |\zeta_m| - \frac{8,6859}{|Hp|} \right] X \quad (2.66)$$

O termo Hp é uma correção de segunda ordem que depende da frequência e das características elétricas do solo, normalmente desconsiderada para polarização horizontal, mas importante para alguns casos da polarização vertical.

Os zeros, ζ_m , da função de Airy estão distribuídos ao longo do eixo real negativo e foram tabulados por Abramowitz e Stegun [38], ou podem ser calculados utilizando a fórmula assintótica:

$$\zeta_m = -f \left[\frac{3}{2} \left(m - \frac{1}{4} \right) \pi \right] \quad (2.67)$$

onde,

$$f(z) = z^{\frac{2}{3}} \left[1 + \frac{5}{48z^2} - \frac{5}{36z^4} + \frac{77125}{82944z^4} - \dots \right] \quad (2.68)$$

Retendo somente o termo de ordem zero dentro dos colchetes da equação (2.68) (i.e. a constante 1), o valor de ζ_l possuirá uma precisão melhor que 1%, e incluindo a primeira correção z^2 ela será reduzida para 0,06%. Ou seja, os valores calculados de ζ_m são com certeza mais precisos, à medida que m aumenta.

Os primeiros cinco zeros, ζ_m , são dados na tabela 2.1:

m	ζ_m
1	-2.3381
2	-4.0879
3	-5.5206
4	-6.7867
5	-7.9441

Tabela 2.1 – Os cinco primeiros zeros da equação (2.67).

Substituindo o valor de ζ_l na equação (2.66) e ignorando Hp temos:

$$F_{modo(m=1)}(X) = 20 \log \left| \frac{E}{E_0} \right| = 10,992 + 10 \log X - 17,588X \quad (2.69)$$

Este resultado concorda com a equação (2.38) correspondente ao termo de distância da Recomendação UIT-R P.526-11.

A figura 2.11 mostra o termo de distância correspondente à equação (2.69) para os primeiros cinco modos. A taxa de atenuação para eles (i.e. o coeficiente do termo linear X) são 17,6; 30,8; 41,5; 51,1 e 59,8 dB/km, respectivamente. A figura 2.11 indica a partir de que valor de X os modos mais altos podem ser ignorados. Por exemplo, para $X = 2$ o segundo modo foi atenuado em mais que 25 dB, em comparação com o primeiro modo, logo sua contribuição pode ser desprezada. Para $X = 1$ essa diferença cai para cerca de 13 dB. Em $X = 0,1$ a diferença cai para menos de 2 dB. Logo a aproximação do primeiro modo poderia ocasionar resultados equivocados. De fato, para distâncias curtas, o número de modos necessários para a soma de modos convergir rapidamente aumenta rapidamente, dificultando a aplicação computacional.

A função de ganho de altura $U_m(Z)$, para o primeiro modo da equação (2.38), através das equações de Airy e suas derivações, é dada por:

$$G_{modo}(Z) = 20 \log(U_m(Z)) = 20 \log \left| \frac{Ai(Z + A_m)e^{\pi i/3}}{Ai'e^{\pi i/3}} \right| \quad (2.70)$$

As funções de Airy podem ser calculadas numericamente, ou aproximadamente através a série de Taylor ou de fórmulas assintóticas. As curvas da TN 101 para o termo do ganho de altura, também ilustradas na figura 2.10, foram supostamente geradas dessa forma. A fórmula para o termo de ganho de altura da Rec. UIT-R P.526-11 foi provavelmente encontrado através de método numérico, de modo que se ajustasse às curvas da TN 101.

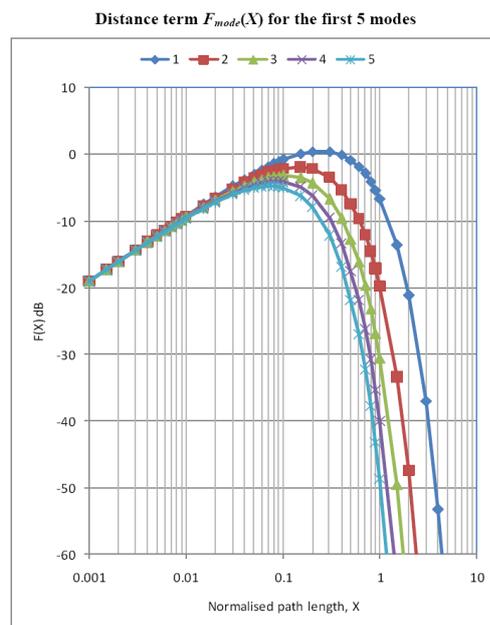


Figura 2.11 - Gráfico de $F_{NT101}(x)$ para os primeiros cinco modos.

2.3 Teoria da difração de Fresnel-Kirchoff

A primeira explicação do fenômeno da difração da luz por um obstáculo foi publicada por Fresnel em 1818 utilizando o princípio de Huygens, onde se supõe que cada elemento de uma frente de onda atua como fonte de perturbação, produzindo ondas esféricas elementares que se combinam de forma a produzir uma nova frente de onda. A base matemática da análise de Fresnel foi estruturada por Kirchoff em 1882, passando a se chamar teoria da difração de Fresnel-Kirchoff [1].

Dentro do escopo desse trabalho, uma importante aplicação dessa teoria corresponde ao estudo da difração por um semiplano infinito perfeitamente absorvente. Este tipo de obstáculo, ilustrado na figura 2.12, é conhecido como “gume de faca” (knife-edge) e constitui a base fundamental de inúmeros estudos sobre o problema da difração pelas irregularidades do terreno. Para determinar a intensidade de campo no ponto Rx , que pode assumir qualquer posição ao longo de AB , supõe-se que cada elemento de linha du da frente de onda produza em Rx um campo elementar dado por:

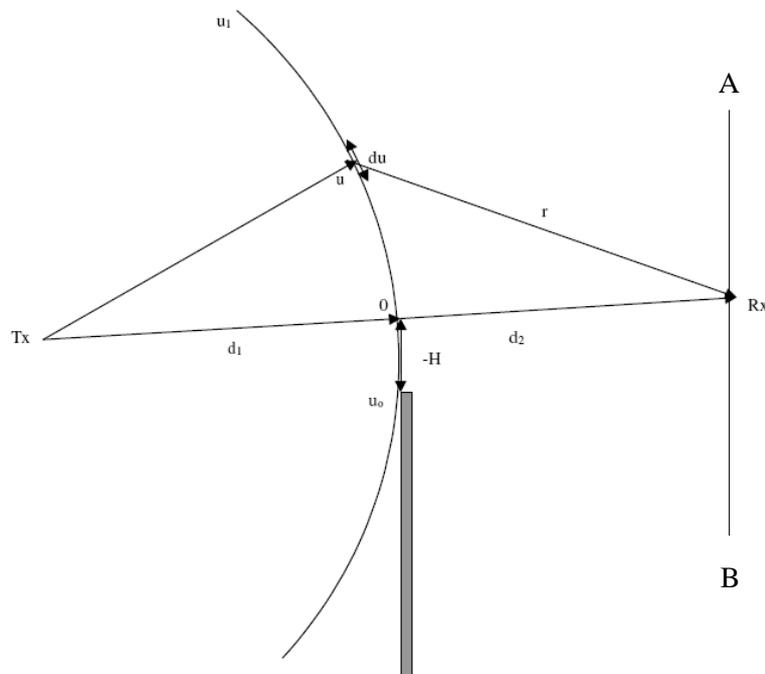


Figura 2.12 – Difração por obstáculo do tipo “gume de faca”.

$$dE = \frac{C}{f(r)} e^{-jk_0 r} du$$

O campo total em Rx , devido à porção da frente de onda entre u_0 e u_1 , será:

$$E = C \int_{u_0}^{u_1} \frac{e^{-jk_0 r}}{f(r)} du \quad (2.71)$$

Onde k_0 é dado pela equação (2.7) e,

C – constante de proporcionalidade;

$f(r)$ – função relacionada à amplitude do campo elétrico, dependente de r .

Efetuada as aproximações:

a) No denominador: $r = d_2$

b) No expoente: $r = d_2 + u^2 \frac{d_1 + d_2}{2d_1 d_2}$

e fazendo uso das integrais de Fresnel, definidas por:

$$C(v) - jS(v) = \int_0^v e^{-j\frac{\pi}{2}v^2} dv \quad (2.72)$$

onde,

$$C(v) = \int_0^v \cos \frac{\pi v^2}{2} dv \quad e \quad S(v) = \int_0^v \sen \frac{\pi v^2}{2} dv \quad (2.73)$$

A expressão do campo passa a ser dada por,

$$E = K \{ [C(v_1) - C(v_0)] - j[S(v_1) - S(v_0)] \} \quad (2.74)$$

sendo,

$$v_{1,0} = \sqrt{2} \frac{u_{1,0}}{R}; \quad (2.75)$$

R = raio da primeira zona de Fresnel;

$$K = C \frac{e^{-jk d_2} R}{f(d_2) \sqrt{2}}. \quad (2.76)$$

De acordo com a figura 2.12, para o obstáculo tipo “gume de faca”, o limite u_1 se localiza no infinito, e como,

$$C(v)_{v \rightarrow \infty} = S(v)_{v \rightarrow \infty} = \frac{1}{2}$$

tem-se para o campo E ,

$$E = K \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(v_0) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S(v_0) \right] \right\} \quad (2.77)$$

Esta situação viola as aproximações efetuadas anteriormente, entretanto, não prejudica a precisão do resultado final.

Para determinar K na expressão anterior, faz-se $u_0 \rightarrow -\infty$. Isto é, a extremidade do obstáculo localiza-se muito abaixo do percurso direto entre Tx e Rx . Neste caso,

$$C(u_0)_{u_0 \rightarrow -\infty} = S(u_0)_{u_0 \rightarrow -\infty} = -\frac{1}{2}$$

e o campo deve ser igual ao do espaço livre E_0 .

Portanto,

$$|K| = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \quad (2.78)$$

e assim,

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = \frac{\sqrt{2}}{2} \left| \left[\frac{1}{2} - C(v_0) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S(v_0) \right] \right| \quad (2.79)$$

A distância u_0 da figura 2.12 corresponde à folga (valor negativo) ou obstrução (valor positivo) do percurso, que foi definida anteriormente pela letra H . Com essa nomenclatura, o parâmetro v_0 é dado por:

$$v_0 = \sqrt{2} \frac{H}{R} \quad (2.80)$$

A figura 2.13 apresenta a variação de $|E/E_0|$ em função de v_0 . Observa-se que para $H < -0,6R$ (mais exatamente para $H < -0,56R$), o campo aproxima-se do seu valor de espaço livre, com um erro menor do que 1,5 dB. Para $H > -0,6R$ o campo não oscila mais, decrescendo monotonicamente à medida que aumenta a obstrução, o que caracteriza a difração. É imediato concluir que este comportamento está plenamente de acordo com o critério estabelecido na seção 2.1.1, para separar a zona de interferência de difração.

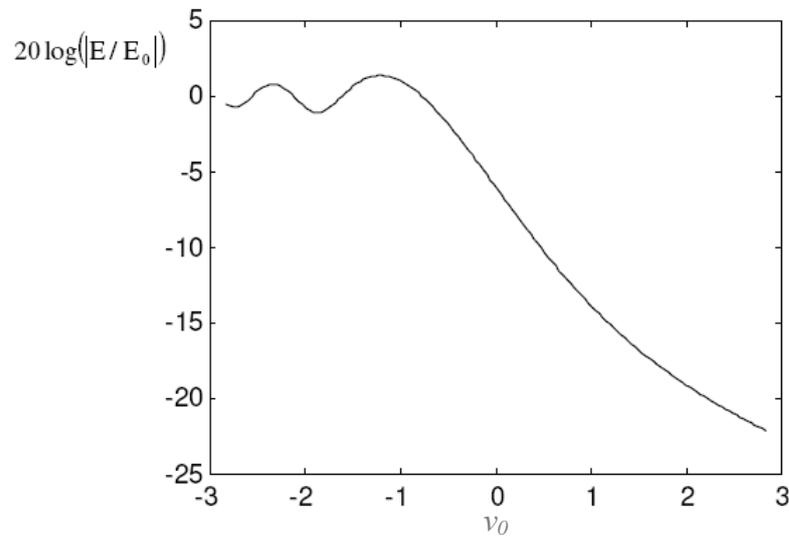


Figura 2.13 – Campo difratado por obstáculo do tipo “gume de faca”.

2.4 Difração sobre obstáculos convexos isolados

Schelleng et al [13] desenvolveram em 1933 o primeiro modelo matemático para solucionar o problema da difração das ondas eletromagnéticas pelo relevo do terreno utilizando a teoria de Fresnel-Kirchoff para um obstáculo tipo gume de faca.

Apesar de suas limitações, em certos casos, esta solução apresenta resultados satisfatórios. Entretanto, dependendo da situação, o efeito das dimensões do obstáculo pode levar a um resultado bem diferente do previsto por essa teoria. Consequentemente, ficou evidenciada a necessidade de se determinar um fator de correção para esta teoria, de modo a se obter um modelo matemático que fosse mais aderente à situação física dos problemas reais.

Uma das primeiras correções apareceu em 1948, quando Fock [14] aplicou a solução da terra esférica ao problema da difração por obstáculos convexos. Neste trabalho, esse autor demonstrou a existência de duas parcelas no campo difratado. Uma correspondente à obtida pela teoria de Fresnel-Kirchoff para um obstáculo gume de faca e a outra, função das dimensões do obstáculo, definindo o fator de correção. Embora formalmente o problema estivesse resolvido, os resultados foram equacionados de forma muito complexa para uma utilização prática imediata.

Entre 1950 e 1970, foram publicados inúmeros trabalhos sobre este assunto. Uma importante contribuição à solução do problema foi desenvolvida por Wait e Conda [18] em 1959. O mérito deste trabalho foi resolver por métodos numéricos a formulação integral de Fock, evitando o problema da lenta convergência da série na região de visibilidade, comum às demais soluções existentes.

O problema investigado por estes autores teve por base inicial a difração de uma onda plana por um cilindro circular de condutividade finita. Tal como no caso da terra esférica, a solução clássica deste problema é dada por uma série de convergência lenta. A aplicação da transformação de Watson por Wait e Conda em 1959 permitiu contornar este problema. Após longo desenvolvimento matemático, no qual se passa para a incidência de uma onda esférica, chega-se à seguinte expressão para o fator de atenuação em relação ao espaço livre, a qual se aplica quando o receptor encontra-se situado nas vizinhanças do horizonte do transmissor,

$$F(X, u) = \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\pi}} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-j\alpha^2} d\alpha - \frac{G(X)}{u} e^{-j\alpha^2} \quad (2.81)$$

onde,

$$u = \frac{\alpha}{X} = \left(\frac{2k_0 s_1 s_2}{s_1 + s_2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(2/k_0 a_e)^{\frac{1}{3}}}{2}; \quad (2.82)$$

$$X = \left(\frac{k_0 a_e}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \theta; \quad (2.83)$$

$$G(X) = e^{j\frac{\pi}{12}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{Xt}{2}(\sqrt{3}-j)} \frac{v'(t) - qe^{-j\frac{2}{3}v(t)}}{w'_2(t) - qe^{-j\frac{2}{3}w_2(t)}} dt + e^{-j\frac{\pi}{4}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-jXt} \frac{v'(t) - qv(t)}{w'_1(t) - qw_1(t)} dt \quad (2.84)$$

$$v(t) = \frac{w_2(t) - w_1(t)}{2j}; \quad (2.85)$$

$$w_{1,2}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\Gamma_1, \Gamma_2} e^{t_s - \frac{s^3}{3}} ds \quad (\text{integral de Airy}); \quad (2.86)$$

sendo os contornos Γ_1 e Γ_2 mostrados na figura 2.14 e os números t_s as raízes da equação,

$$\frac{dw_{1,2}(t)}{dt} - qw_{1,2}(t) = 0 \quad (2.87)$$

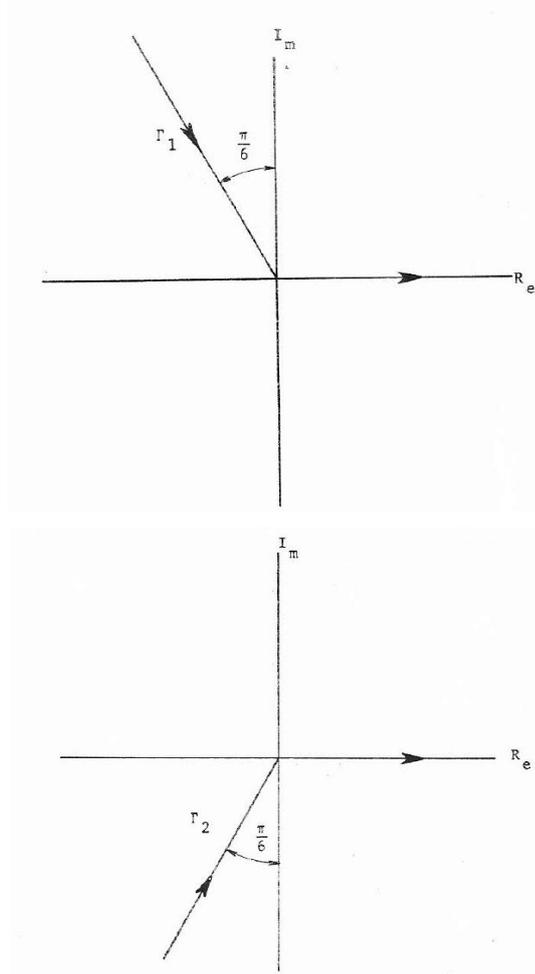


Figura 2.14 – Contornos Γ_1 e Γ_2 , obtidos da referência [1].

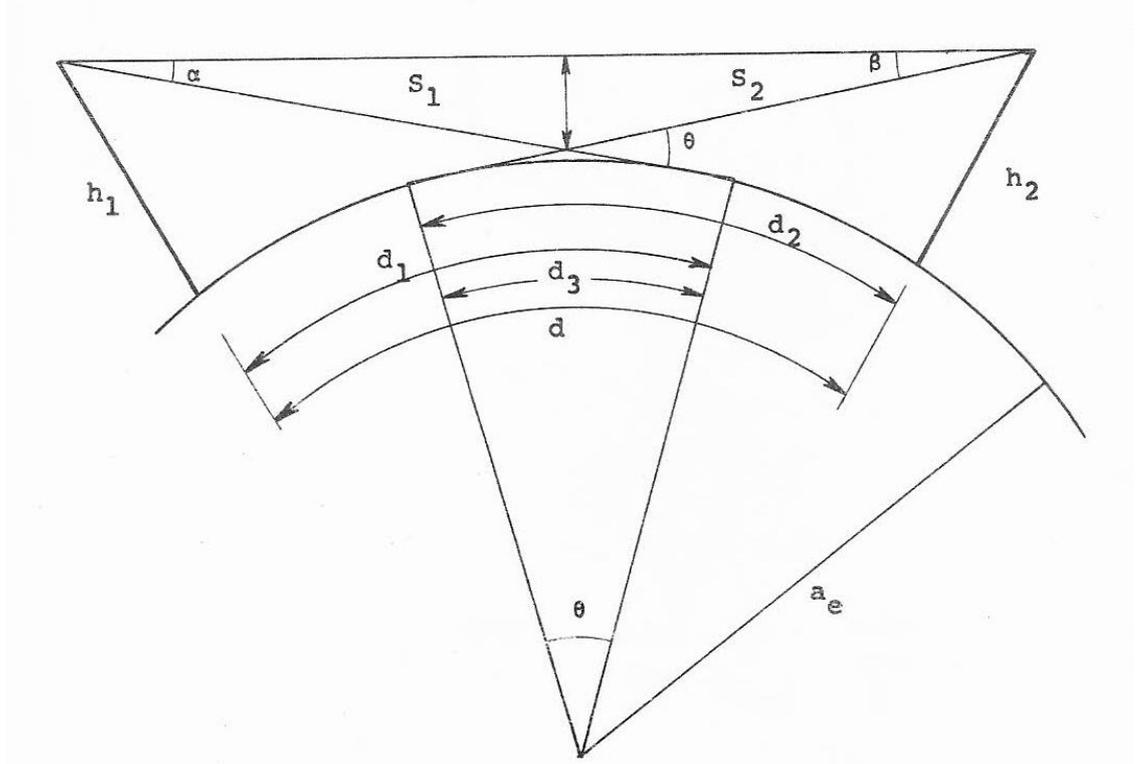


Figura 2.16 – Receptor na visibilidade do transmissor. Figura reproduzida da referência [1].

Devido às aproximações utilizadas, os resultados de Wait e Conda [18] foram limitados pela condição $u \geq 2$. Em 1964, Dougherty e Maloney [19] publicaram uma extensão do trabalho de Wait e Conda para valores maiores de u , com a atenuação devida à difração em um obstáculo convexo dividida em três parcelas:

$$A(v, \rho) = A(v, 0) + A(0, \rho) + U(\rho v) \quad (2.91)$$

onde,

$A(v, 0)$ - parcela equivalente a difração pelo modelo ideal do “gume de faca”;

$A(0, \rho)$ - parcela correspondente ao caso do receptor no horizonte do transmissor ($H/R=0$);

$U(\rho v)$ - parcela função do produto ρv .

Cujos parâmetros são definidos por:

$$v = \sqrt{2} \frac{H}{R}; \quad (2.92)$$

$$\rho = \frac{1}{u} = \frac{\alpha_c}{\pi^6}; \quad (2.93)$$

$$\alpha_c = \frac{\lambda^{\frac{2}{3}} r^{\frac{1}{3}}}{R} - \text{fator de curvatura do obstáculo} \quad (2.94)$$

λ - comprimento de onda;

R - raio da primeira zona de Fresnel;
 r - raio de curvatura do obstáculo.

Entretanto, aproximações incorretas nas funções de Airy da solução integral prejudicaram o resultado obtido para a parcela $A(0, \rho)$. Um trabalho posterior de Dougherty e Wilkerson [20] em 1967, utilizando a série dos resíduos corrigiu esta parcela, estendendo a solução até $\theta < \rho^2 < 8$, ou seja, $\theta < \alpha_c < 3,4$. Os gráficos da figura 2.18 apresentam as curvas corrigidas do trabalho de Dougherty e Maloney. A curva relativa à parcela $A(v, 0)$ é idêntica à da figura 2.13.

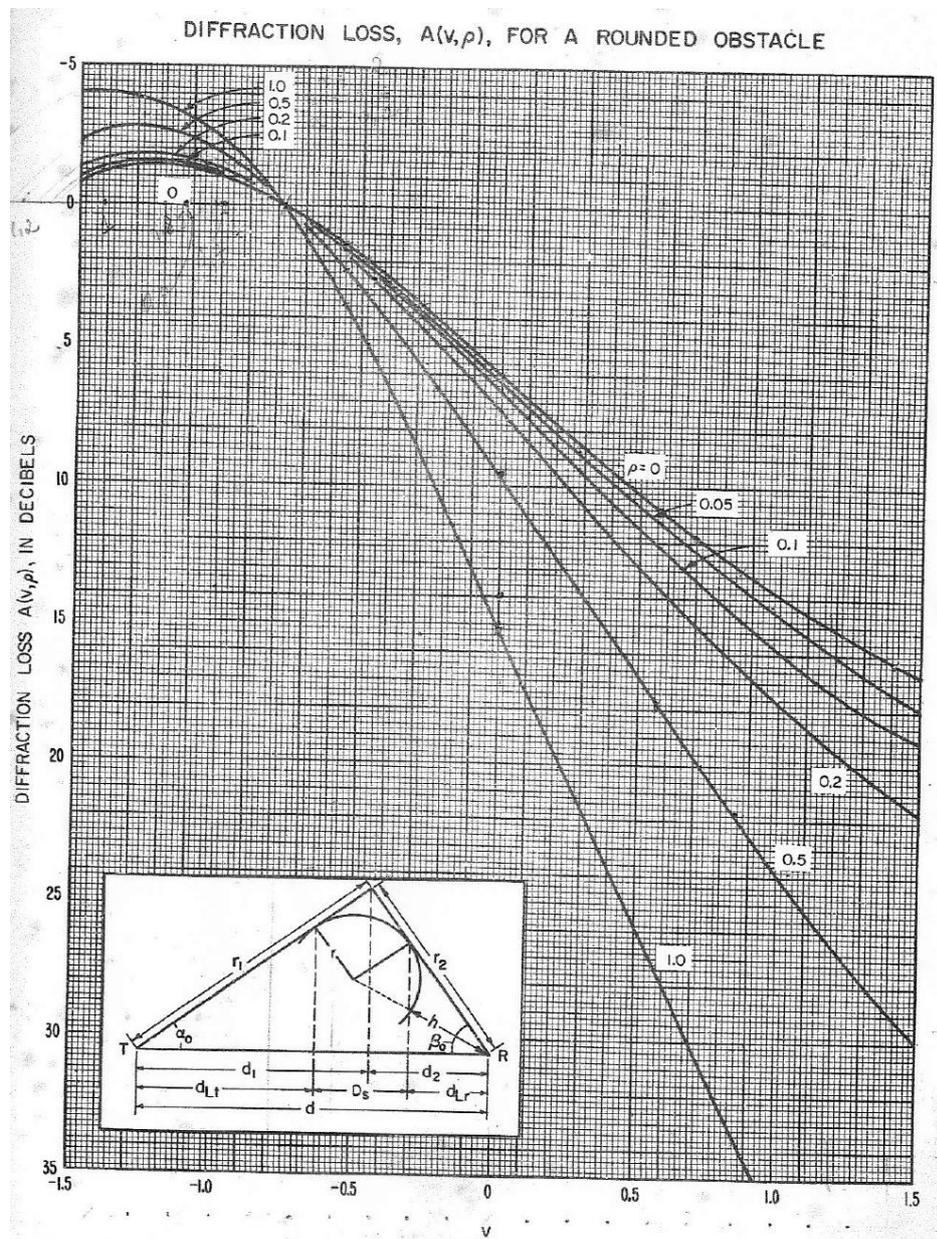


Figura 2.17 – Gráfico relativo à atenuação total $A(v, \rho)$, reproduzido do artigo de Dougherty e Maloney [19].

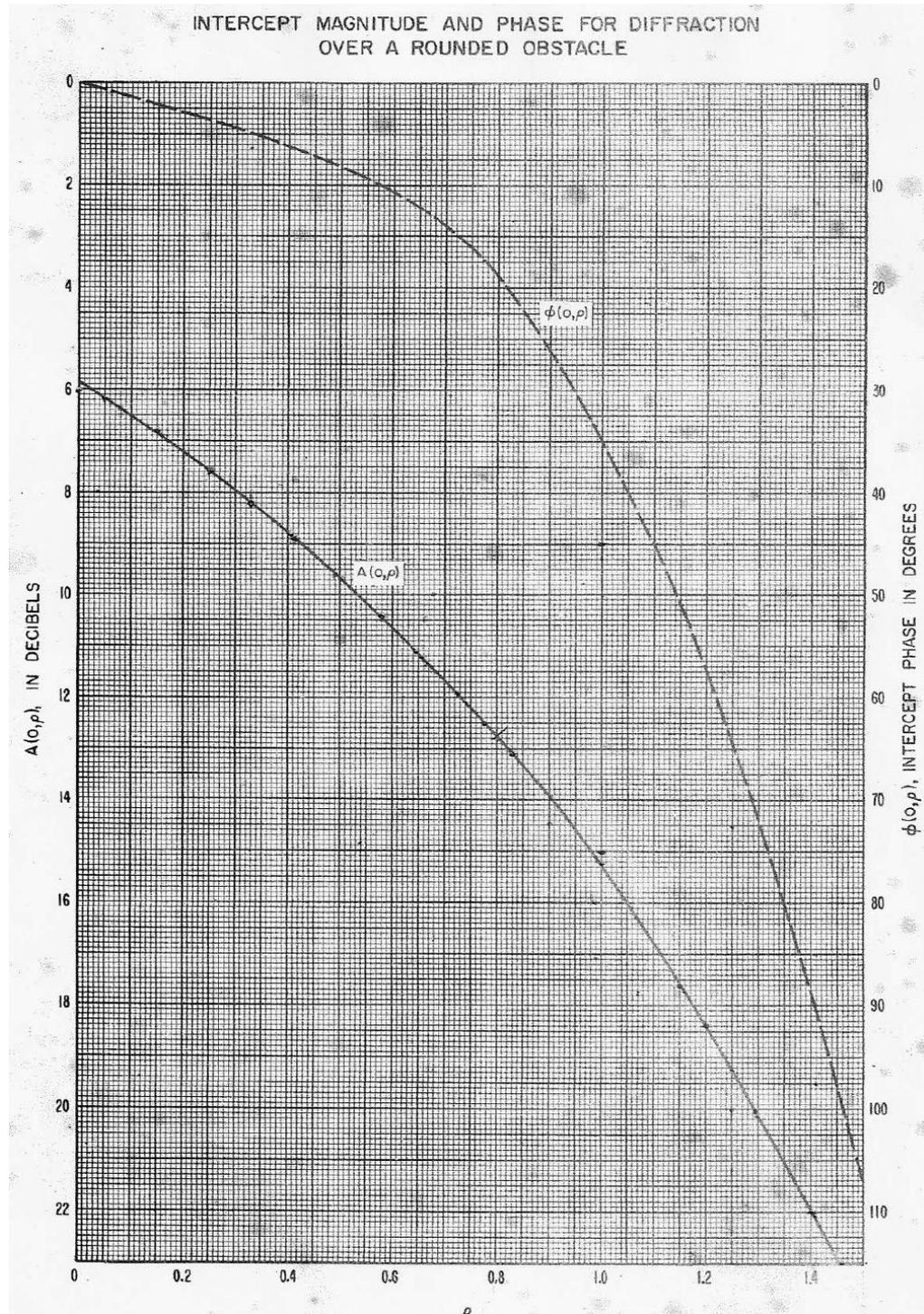


Figura 2.18 – Gráfico relativo à parcela dependente do raio de curvatura $A(0, \rho)$, reproduzido do artigo de Dougherty e Maloney [19].

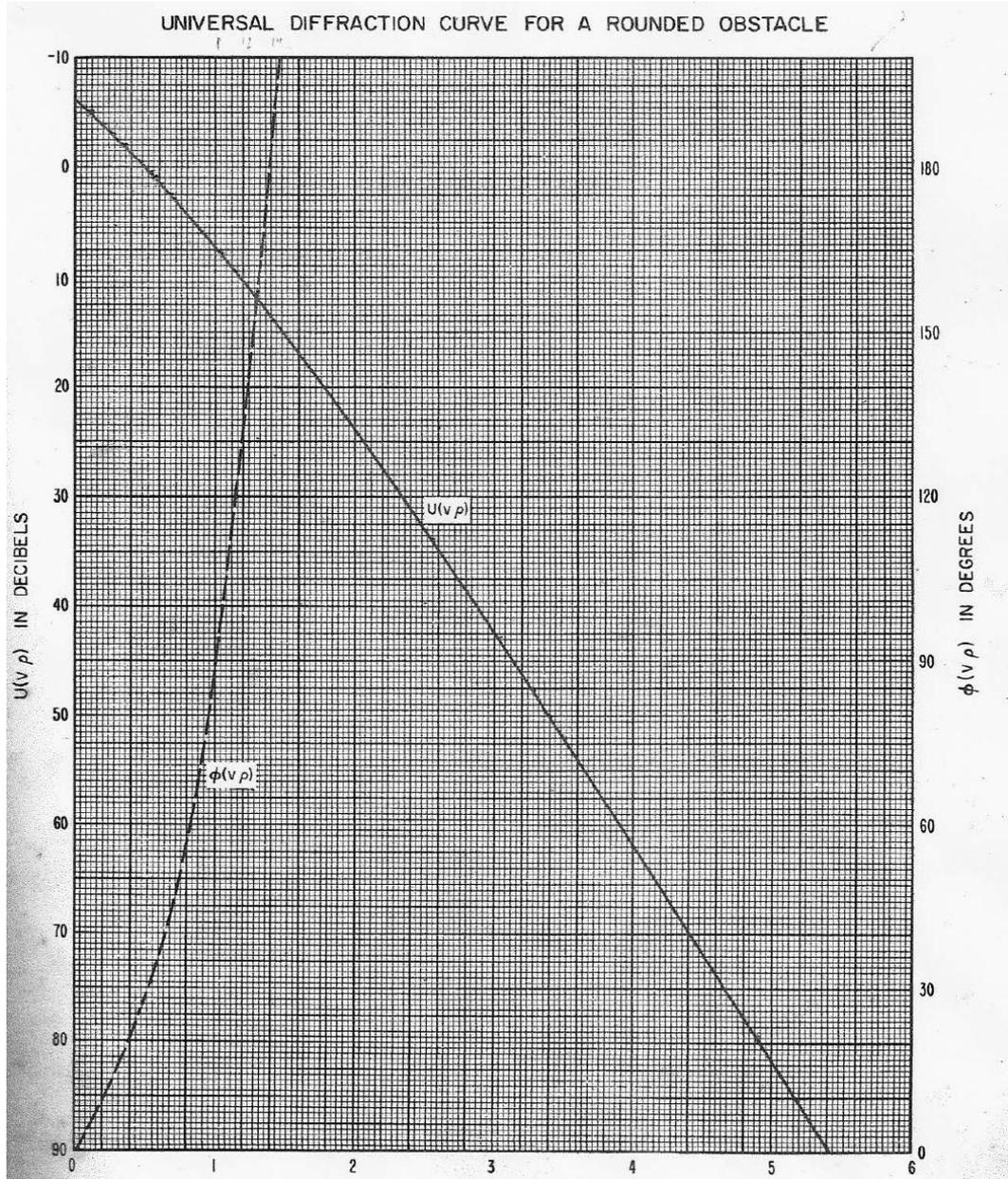


Figura 2.19 – Gráfico relativo à parcela dependente do produto $v\rho$, reproduzido do artigo de Dougherty e Maloney [19].

2.4.1 Raio de curvatura do obstáculo

Conforme descrito na seção 2.4, os estudos realizados nas décadas de 1950 a 70, dentre eles Crysdale [22], Neugebauer e Bachynsky [23], Dougherty e Maloney [19], mostraram claramente a necessidade de levar em conta o raio de curvatura dos obstáculos, particularmente nas faixas de VHF e UHF. Por outro lado, a disponibilidade atual de relevo digitalizado tornou a determinação do raio de curvatura uma tarefa relativamente simples, que

pode ser incorporada sem dificuldade, ao programa de computador utilizado no cálculo da atenuação.

O “Princípio da Ação Local”, enunciado por Fock [14] em 1965, consiste no seguinte: “A transição da região de visibilidade para a região de sombra se passa em uma estreita faixa no limite da sombra geométrica, a qual é denominada região de penumbra”. A largura desta faixa é da ordem de:

$$l = \left(\frac{\lambda r^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.95)$$

Consequentemente, de acordo com esse princípio, a difração independe da forma do obstáculo (esfera, cilindro circular, cilindro parabólico, etc.), sendo função somente do raio de curvatura no topo. Por esta razão, na determinação do raio de curvatura r dos obstáculos, utilizaremos o modelo parabólico ilustrado na figura 2.20, conforme Assis [39], onde,

$$y = \frac{x^2}{r} \quad (2.96)$$

sendo $y \ll x$.

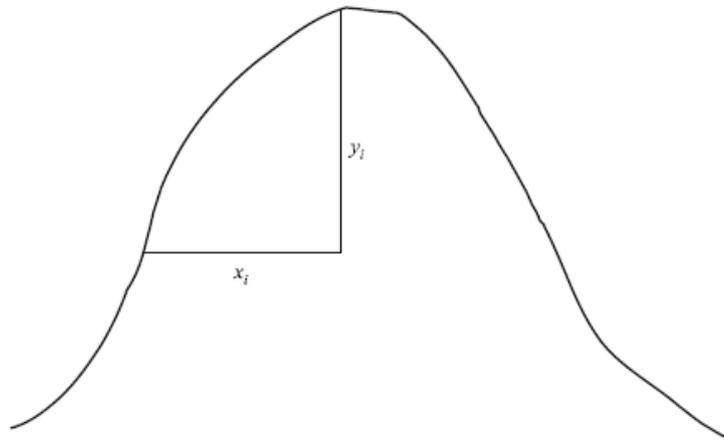


Figura 2.20 – Modelo parabólico para determinação do raio de curvatura do obstáculo. Figura reproduzida da Rec. UIT-R P.526-11.

Considerando que perfil do obstáculo não é uma parábola perfeita, é recomendável determinar o valor de r para diversos pontos situados nas proximidades do topo do obstáculo, ou seja,

$$r_1 = \frac{x_1^2}{y_1}; \quad r_2 = \frac{x_2^2}{y_2}; \quad \dots \quad r_n = \frac{x_n^2}{y_n} \quad (2.97)$$

e utilizar nos cálculos o raio de curvatura médio dado por,

$$r = \frac{1}{n} \sum_1^n r_i \quad (2.98)$$

Durante o ajuste à parábola, a máxima distância vertical entre do ápice da parábola e a altura da amostra mais inferior deve ser da ordem do primeiro raio de Fresnel onde o obstáculo estiver localizado.

O número de pontos a ser utilizado deve ser tal que permita uma definição precisa da curvatura do obstáculo. Após determinado o raio de curvatura, pode ser feita uma verificação, traçando-se sobre o perfil, a curva correspondente à aproximação parabólica. Havendo muita diferença, o valor do raio deve ser reavaliado.

2.4.2 Fórmulas da Recomendação P.526-11

Atualmente, os resultados obtidos por Wait e Conda [18], Dougherty e Maloney [19], dentre outros, são adotados na Recomendação UIT-R P.526-11, para o cálculo da difração por obstáculos convexos, porém seguindo uma notação própria. Nas próximas linhas será feita uma demonstração resumida do caminho que levou à formulação existente nessa recomendação.

A partir da figura 2.18, Dougherty [20] encontrou um polinômio que se ajustava satisfatoriamente com a seguinte forma:

$$A(0, \rho) = 7,2\rho - 2\rho^2 + 3,6\rho^3 - 0,8\rho^4 \quad (2.99)$$

Para a dedução da fórmula equivalente à parcela $U(\rho v)$, substituiremos o produto ρv pelo parâmetro X de Wait e Conda, demonstrando que esses são diretamente proporcionais.

Das equações 2.92 e 2.93 podemos calcular o produto ρv :

$$\rho v = \frac{\sqrt{2} H}{\pi^{\frac{1}{6}} R} \alpha_c \quad (2.100)$$

A equação (2.83) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$X = \left(\frac{\pi a_e}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \theta \quad (2.101)$$

Das figuras 2.15 e 2.16 pode-se deduzir que:

$$\theta = \frac{H(d_1 + d_2)}{d_1 d_2} \quad (2.102)$$

Assim tem-se que a equação (2.101) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$X = \pi^{\frac{1}{3}} \frac{H}{R} \alpha_c \quad (2.103)$$

Substituindo a equação (2.100) em (2.103) chega-se:

$$X = \frac{\pi^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2}} \rho v \quad (2.104)$$

Para atingir o ajuste satisfatório, foi necessário dividir a curva $U(\rho v)$ em duas equações.

Considerando $Q(X) = U(\rho v)$ tem-se,

$$Q(X) = 12X \quad \text{para } 0 < X < 4; \quad (2.105)$$

$$Q(X) = 17X - 6 - 20 \log X \quad \text{para } X \geq 4; \quad (2.106)$$

Atualmente, a Recomendação UIT-R P.526-11 utiliza, em vez de ρ e X , os parâmetros m e n , os quais são definidos por:

$$m = \pi^{-1/3} \alpha_c^2 = \rho^2; \quad (2.107)$$

$$n = \pi^{2/3} \frac{H}{R} \frac{1}{\alpha_c}; \quad (2.108)$$

$$X = mn. \quad (2.109)$$

e α_c dada pela equação (2.94).

Considerando a notação da P.526-11:

$$T(m,n) = A(0,\rho) + Q(X) \quad (2.110)$$

e substituindo as equações 2.107, 2.108 e 2.109 em 2.99, 2.105, 2.106 e 2.110, tem-se,

$$T(m,n) = 7,2m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{para } mn \leq 4; \quad (2.111)$$

$$T(m,n) = -6 - 20 \log(mn) + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{para } mn > 4. \quad (2.112)$$

Assim, a atenuação total devida à difração em um obstáculo convexo, de acordo com a notação da Recomendação UIT-R P.526-11, tem por expressão:

$$A = J(v) + T(m,n) \text{ dB}; \quad (2.113)$$

onde,

$J(v)$ – atenuação devido à difração em um obstáculo “gume de faca”;

$T(m,n)$ – correção devido ao raio de curvatura do obstáculo.

2.5 Difração sobre múltiplos obstáculos convexos

Mais uma vez, a solução rigorosa do problema é extremamente complexa. Utilizando uma formulação baseada na série dos resíduos, Furutsu [24] apresentou uma solução geral, infelizmente muito complicada para possibilitar aplicações práticas. Para dois obstáculos gume de faca é ainda possível utilizar resultados provenientes de modelos matemáticos como os de Furutsu [24], Milligton et al [25], Vogler [26], e outros. Entretanto, em problemas de engenharia, é mais simples utilizar métodos empíricos, cuja eficiência tenha sido comprovada por dados experimentais.

As soluções empíricas desenvolvidas para o cálculo da difração sobre vários obstáculos procuram reduzir o problema a geometrias simples, mantendo a melhor coerência possível com a situação física real. Historicamente, o método de Bullington [27] que reduz os obstáculos a um único equivalente, foi um dos primeiros a ser apresentado. Entretanto, em geral, este método tende a ser muito otimista, exceto quando a distância entre cada terminal e o obstáculo mais próximo é pequena em relação à distância que separa os obstáculos. Os métodos de Epstein & Peterson [28] e Deygout [29] são os mais frequentemente adotados nas aplicações práticas, sendo este último abordado nesta seção.

2.5.1 Método Deygout

De acordo com este método, o primeiro passo é determinar o obstáculo principal do percurso. Este obstáculo é o responsável pela maior parcela da atenuação, correspondendo àquele que apresenta a maior obstrução relativa ao raio da 1ª zona de Fresnel (H/R). No caso da figura 2.21, supõe-se que M_1 seja o obstáculo principal. A atenuação associada a M_1 é calculada como se M_2 não existisse, e utiliza o seguinte parâmetro,

$$v_1 = H_1 \left[\frac{2(a+b+c)}{\lambda a(b+c)} \right]^{1/2} = \sqrt{2} \frac{H_1}{R_1} \quad (2.114)$$

A contribuição do obstáculo secundário M_2 é calculada no trajeto M_1R através do parâmetro,

$$v_2 = H_2 \left[\frac{2(b+c)}{\lambda bc} \right]^{1/2} = \sqrt{2} \frac{H_2}{R_2} \quad (2.115)$$

A atenuação total será a soma das atenuações introduzidas por M_1 no percurso TR e por M_2 no percurso M_1R .

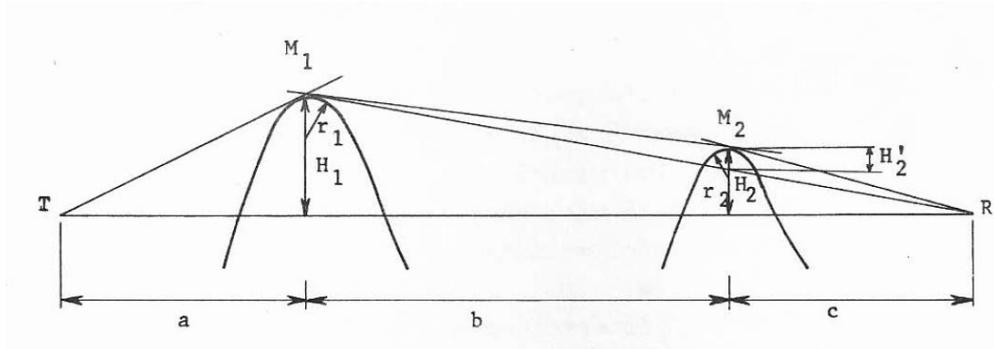


Figura 2.21 – Método Deygout para dois obstáculos. Figura reproduzida da referência [1]

A generalização para o caso de vários obstáculos é feita por um procedimento similar ao acima descrito. Um exemplo é ilustrado na figura 2.22. Nesta situação, tem-se:

- M_3 – obstáculo principal do percurso TR;
- M_1 – obstáculo principal do percurso TM_3 ;
- M_4 – obstáculo principal do percurso M_3R .

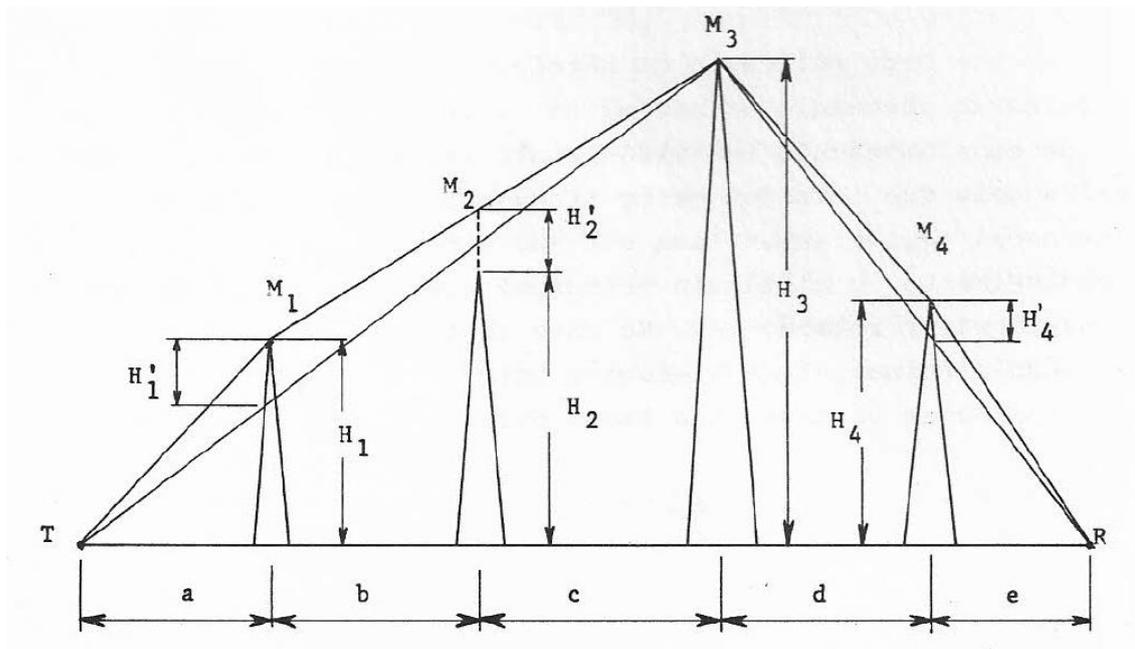


Figura 2.22 – Método Deygout para vários obstáculos. Figura reproduzida da referência [1]

2.5.2 Método Assis

O método de Deygout considera na difração, somente obstáculos tipo gume de faca. Como citado anteriormente, quando as dimensões do obstáculo têm efeito importante, esse método tende a ser muito otimista.

Em 1971, Assis [39] desenvolveu um método baseado em Deygout [29], estendendo as soluções apresentadas anteriormente, para obstáculos convexos. Para isto, bastou incluir no cálculo da atenuação a contribuição associada ao efeito da curvatura de cada obstáculo, ou seja, a função $T(\text{dB})$ das equações 2.111 e 2.112.

2.6 Ganho de obstáculo

Define-se ganho de obstáculo (G_{obs}) em dB como a diferença entre os valores de atenuação em dB sem $[A_{s/obs}(\text{dB})]$ e com obstáculo $[A_{c/obs}(\text{dB})]$ no trajeto de propagação, ou seja,

$$G_{obs}(\text{dB}) = A_{s/obs}(\text{dB}) - A_{c/obs}(\text{dB}) \quad (2.116)$$

Este conceito foi introduzido por Dickson et al [40] para analisar percursos que apresentavam o efeito combinado de reflexão no solo e difração por um obstáculo dominante do terreno. Na definição deste conceito foi utilizado o modelo de quatro raios proposto por Schelleng et al [13] em 1933.

Admitindo $q = \infty$ (aproximação usualmente utilizada para a propagação em VHF/UHF sobre terra), as figuras 2.24, 2.25 e 2.26 apresentam curvas do ganho de obstáculo em função da relação entre a altura do obstáculo (h_0) e o raio da 1ª zona de Fresnel (R) no ponto em que está localizado, conforme a figura 2.23. Estas curvas mostram o comportamento do ganho em relação à distância entre os terminais, à frequência de operação e às alturas das antenas. Para simplificar, supõem-se alturas iguais das antenas do transmissor e do receptor e que o obstáculo esteja localizado no meio do percurso. Deve ser observado que este procedimento não implica em limitação da conclusão final obtida.

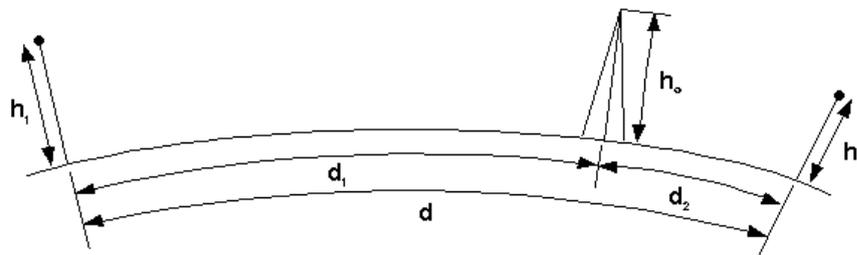


Figura 2.23 – Terra lisa esférica com obstáculo tipo gume de faca sobreposto. Figura reproduzida da referência [41]

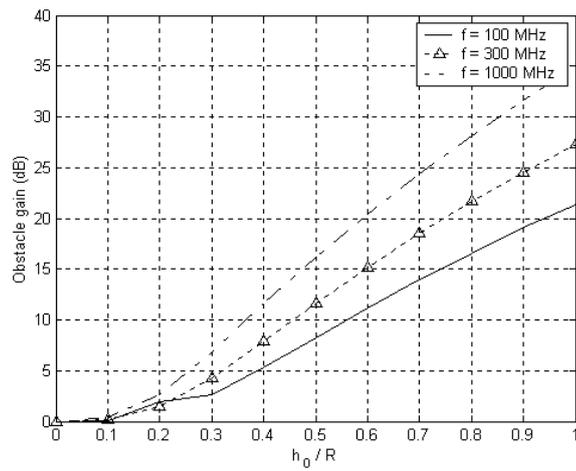


Figura 2.24 – Ganho de obstáculo: $d = 150$ km; $h_1 = 100$ m; $h_2 = 100$ m. Figura reproduzida da referência [41].

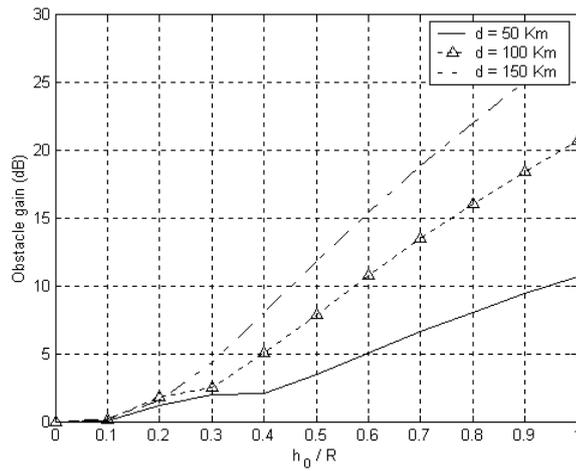


Figura 2.25 – Ganho de obstáculo: $f = 300$ MHz; $h_1 = 50$ m; $h_2 = 50$ m. Figura reproduzida da referência [41].

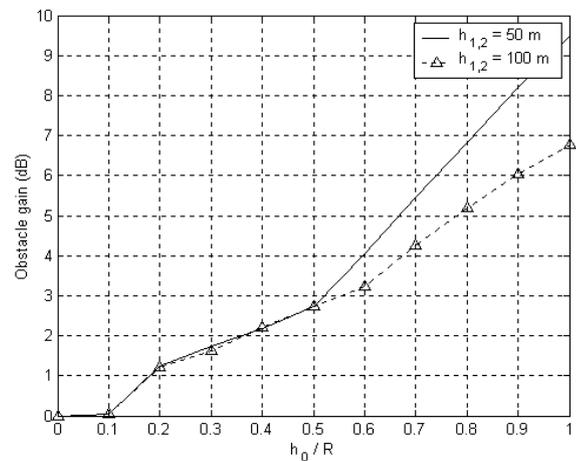


Figura 2.26 – Ganho de obstáculo: $d = 50$ km; $f = 100$ MHz. Figura obtida na referência [41].

2.6.1 Conceito de terra lisa

Observa-se nas curvas das figuras 2.24, 2.25 e 2.26, que o ganho de obstáculo aumenta proporcionalmente em relação a h_0/R , podendo atingir valores razoavelmente grandes dependendo da frequência e da distância considerada. Por outro lado, à medida que a relação h_0/R decresce, o ganho tende para zero. Em outras palavras, o efeito do obstáculo pode ser ignorado se $h_0/R \ll 1$. Numericamente, pode-se verificar que esta condição corresponde a $h_0/R \leq 0,1$. Souza e Assis [41] estenderam este resultado para uma superfície ondulada, chegando à seguinte condição para terra lisa,

$$\Delta h < 0,1R \quad (2.117)$$

sendo,

Δh – parâmetro utilizado para definir o grau de irregularidade do terreno. De acordo com a Recomendação UIT-R P.310-9, esse parâmetro é definido como a diferença entre as alturas excedidas por 10% e 90% das alturas medidas, em intervalos regulares, ao longo de um percurso específico;

R – valor máximo do raio da 1ª zona de Fresnel na região onde se processa a difração.

3 Difração sobre múltiplos obstáculos convexos

Neste capítulo é apresentado um modelo semiempírico, cujo resultado é uma solução simplificada para o problema da difração sobre relevo liso, sobre múltiplos obstáculos convexos ou sobre relevos com grau de irregularidade intermediário.

Este modelo origina-se no modelo de Assis [39], ou seja, basicamente é o método de Deygout [29], que utiliza a fórmula da difração sobre obstáculos do tipo gume de faca para calcular a parcela de atenuação associada ao obstáculo principal de cada percurso, corrigido por uma parcela relacionada ao efeito da curvatura de cada obstáculo.

Além disso, para possibilitar a aplicação do modelo a perfis de relevo lisos ou quase lisos, foi incluído o método simplificado de difração sobre terra esférica da Recomendação ITU-R P.526-11 [21]. O critério para a utilização dessa solução é definido pela utilização do parâmetro empírico Δh , utilizado para caracterizar a irregularidade do terreno.

3.1 Definição do obstáculo principal de cada percurso

Inicialmente, deve-se definir que perfil refere-se à configuração desse relevo ao longo de um percurso em linha reta entre dois pontos. Para fim deste modelo, esse perfil deve apresentar, pelo menos, a altura e a distância ao transmissor (Tx) para cada amostra.

Conforme o método Deygout, o primeiro passo é determinar o obstáculo principal do percurso TxRx. Este obstáculo é o responsável pela maior parcela da atenuação, correspondendo àquele que apresenta a maior obstrução relativa ao raio da 1ª zona de Fresnel (H/R). Entretanto, conforme já citado anteriormente, esse obstáculo não deve mais ser representado por um gume de faca, e sim por um conjunto de amostras do perfil do relevo, que, através do método da seção 2.4.1, define o raio de curvatura do obstáculo principal e, assim a parcela de correção T , conforme descrito na seção 2.4.2.

Dessa questão, surge a necessidade do primeiro critério a ser caracterizado pelo modelo: isto é, definir, para qualquer perfil de relevo, o conjunto de amostras que formarão o obstáculo principal. De acordo com as figuras 3.1 e 3.2 (para o caso $h_1=h_2=0$), Millington et al [25] demonstraram, para o caso de dois obstáculos gume de faca, que quanto menor for a distância entre os dois obstáculos, comparada a distância entre os terminais e os obstáculos, mais estes se comportaram como um único obstáculo.

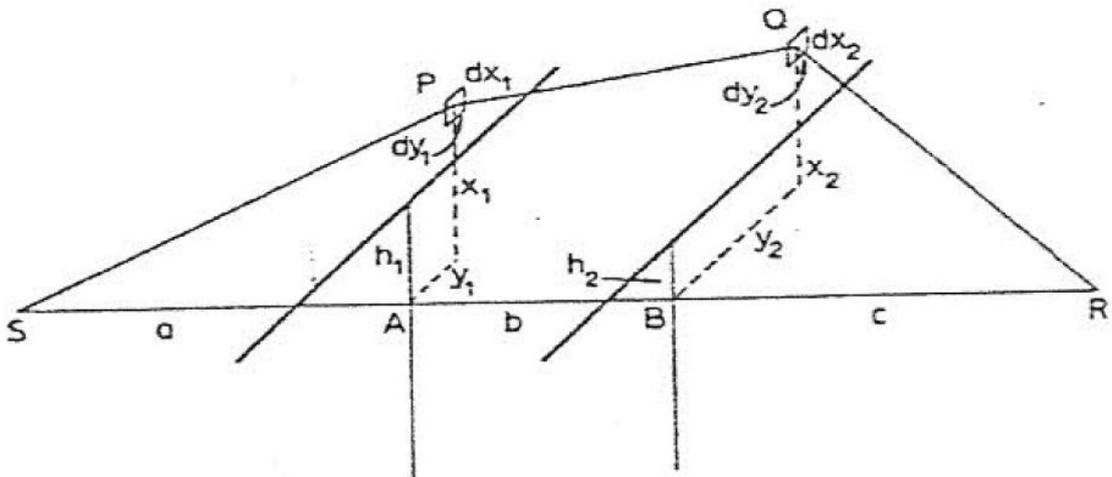


Figura 3.1 – Geometria para um sistema com dois gumes de faca. Figura reproduzida da referência [25].

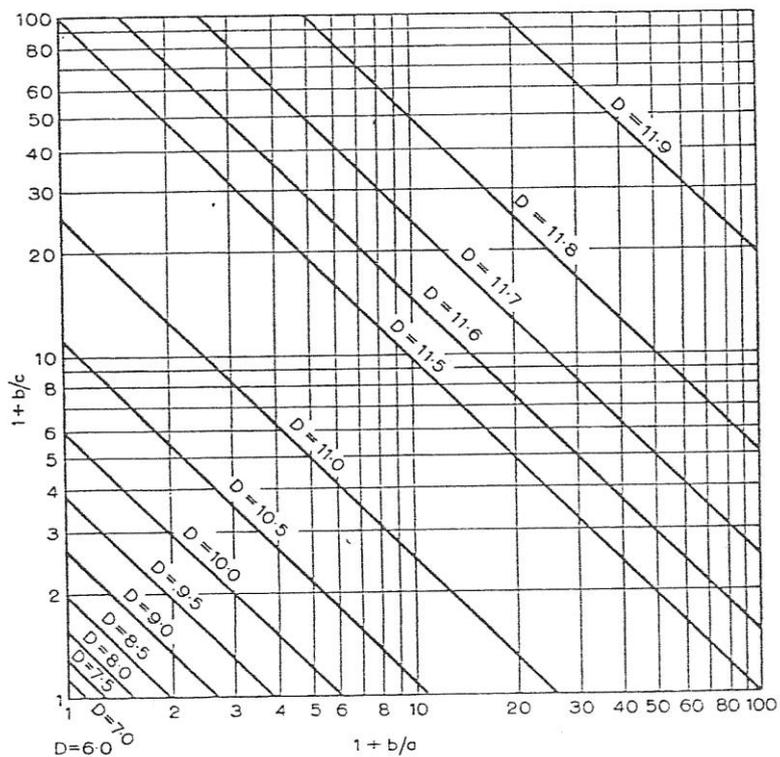


Figura 3.2 – Atenuação D em dB para dois gumes de faca ($h_1=h_2=0$). Figura obtida na referência [25].

Trazendo esse raciocínio para o problema em questão, considerando M_1 a amostra do relevo com maior relação H/R do perfil, é razoável afirmar que todas as amostras do perfil localizadas a uma distância de M_1 “muito menor” do que a maior das distâncias entre TxM_1 ou M_1Rx , fazem parte do obstáculo principal. Para quantificar essa relação, consideramos

“muito menor”, uma distância equivalente a 10% daqueles percursos, criando assim o primeiro critério para definir o conjunto de amostras pertencentes ao obstáculo principal. A figura 3.3 ilustra esse critério em detalhes.

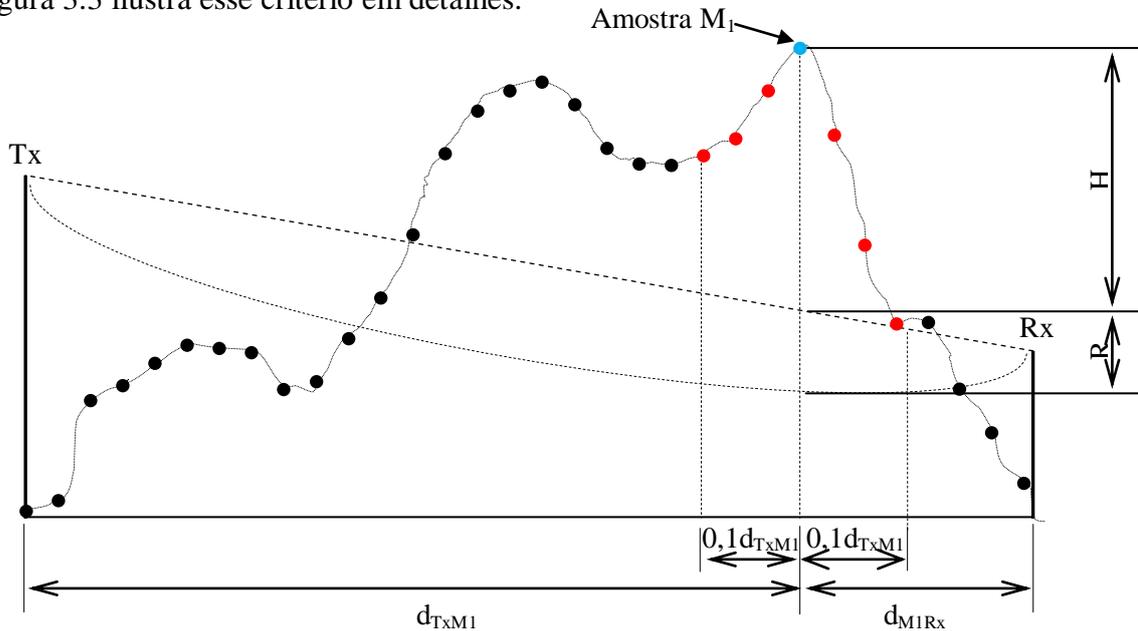


Figura 3.3 – Definição do obstáculo principal no percurso TxRx.

Onde,

Tx – terminal transmissor;

Rx – terminal receptor;

H – tamanho da obstrução (ou folga) do obstáculo principal no percurso;

R – raio da primeira zona de Fresnel no percurso;

M_1 – amostra do relevo com maior relação H/R no percurso TxRx;

d_{TxM_1} – distância do percurso entre Tx e a amostra M_1 ;

d_{M_1Rx} – distância do percurso entre a amostra M_1 e Rx;

● – amostras equidistantes do perfil do relevo;

● – amostras pertencentes ao obstáculo principal do percurso TxRx;

● – amostra equivalente a M_1 ;

— — contorno real do relevo.

Cabe ressaltar que, na figura 3.3, a distância entre os terminais Tx e Rx e suas respectivas alturas não estão na mesma escala. Em outras palavras, assim como na maioria dos percursos utilizados na prática, a distância entre os terminais é muito maior que suas respectivas alturas. Desta forma, no modelo descrito nesta dissertação, o tamanho do percurso TxRx é considerado equivalente à distância entre os terminais.

Outra consideração importante é que, conforme a seção 2.3, a influência de um obstáculo na atenuação total só é considerada se o critério $H > -0,6R$, em seu respectivo percurso for obedecido.

Seguindo o método de Deygout, esse procedimento pode ser generalizado para os demais percursos possíveis, a fim de definir os conjuntos de amostras que representam os obstáculos principais desses percursos. Obviamente, as amostras de perfil já relacionadas a um determinado obstáculo não devem ser consideradas nos demais. A figura 3.4 demonstra essas considerações, baseada no exemplo de perfil da figura anterior.

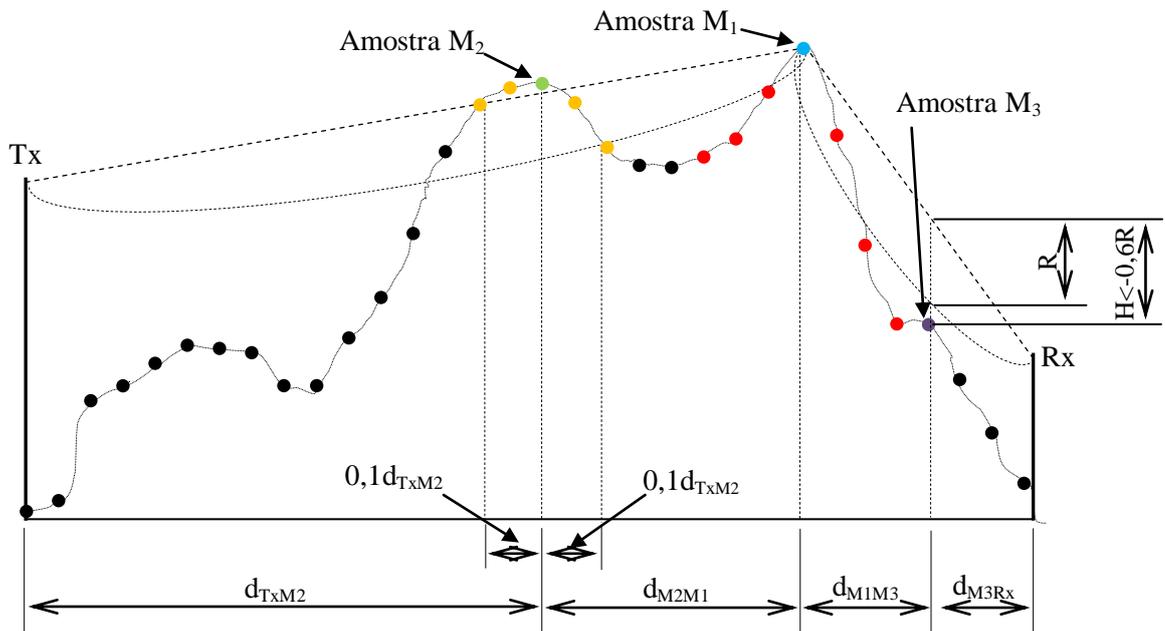


Figura 3.4 – Definição dos obstáculos principais nos percursos TxM_1 e M_1Rx .

Onde,

M_2 – amostra do relevo com maior relação H/R no percurso TxM_1 ;

M_3 – amostra do relevo com maior relação H/R no percurso M_1Rx ;

d_{TxM2} – distância do percurso entre Tx e a amostra M_2 ;

d_{M2M1} – distância do percurso entre a amostra M_2 e a amostra M_1 ;

d_{M1M3} – distância do percurso entre a amostra M_1 e a amostra M_3 ;

d_{M3Rx} – distância do percurso entre a amostra M_3 e Rx;

● – amostras pertencentes ao obstáculo principal do percurso TxM_1 ;

● – amostra equivalente a M_2 ;

● – amostra equivalente a M_3 ;

Os demais parâmetros são equivalentes aos da figura 3.3.

Neste exemplo vale salientar que a amostra M_3 (a mais relevante do percurso M_1Rx) possui relação $H/R < -0,6$, logo devem ser desconsiderados quaisquer obstáculos no percurso M_1Rx .

3.1.1 Critério complementar ao da distância entre as amostras

O critério detalhado na seção anterior se mostrou satisfatório em relevos onde os possíveis obstáculos principais de cada percurso estão bem definidos. Contudo, na prática, a aleatoriedade das formações geológicas produz perfis de relevo onde a distância da amostra de maior H/R , comparada ao tamanho do percurso, não é suficiente para definir o obstáculo com clareza. A figura 3.5 demonstra um exemplo deste caso.

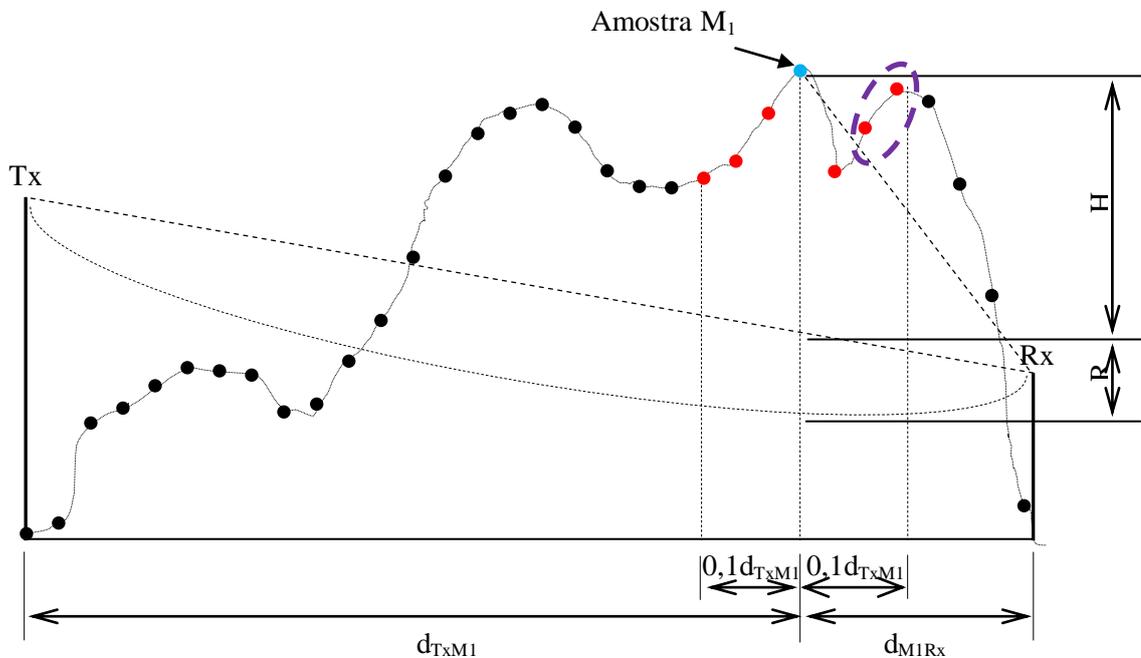


Figura 3.5 – Definição do obstáculo principal em um perfil mais complexo.

Após aplicar o critério definido na seção 3.1 ao perfil da figura 3.5, verifica-se que o resultado não foi satisfatório, já que, analisando intuitivamente a figura, percebe-se que o conjunto de amostras do perfil que supostamente compõe o obstáculo principal do percurso TxRx está, na verdade, avançando sobre um possível obstáculo principal do percurso M_1Rx , o que provavelmente afetará o cálculo do efeito total da difração do perfil. Além disso, a irregularidade da variação de altura dos pontos da amostra afetará o cálculo do raio de curvatura do obstáculo principal do percurso TxRx, causando assim distorção no cálculo da parcela T , descrita na seção 2.4.2.

Para evitar esse tipo de distorção foi criado um critério complementar, puramente empírico, que define que, se todas as amostras que compõem um determinado obstáculo, à esquerda e à direita da amostra de maior H/R do percurso, possuem valores de obstrução (ou folga) H que formem um declive, basta o critério de distância relativa ao tamanho do percurso descrito na seção 3.1. Entretanto, se houver, à esquerda ou à direita, um conjunto de amostras cujo valor H forme um aclave, deve ser avaliado o tamanho desse aclave. Se a distância vertical entre a última amostra em declive e a mais alta do aclave (ΔH da figura 3.6) for da ordem de grandeza do valor máximo do primeiro raio de Fresnel daquele percurso ($\max R$ da figura 3.6), ou maior, essas amostras deverão ser desconsideradas na formação daquele obstáculo principal. Esse critério complementar é apresentado detalhadamente no Apêndice A desta dissertação. A figura 3.6 demonstra uma correção do critério utilizado na figura 3.5.

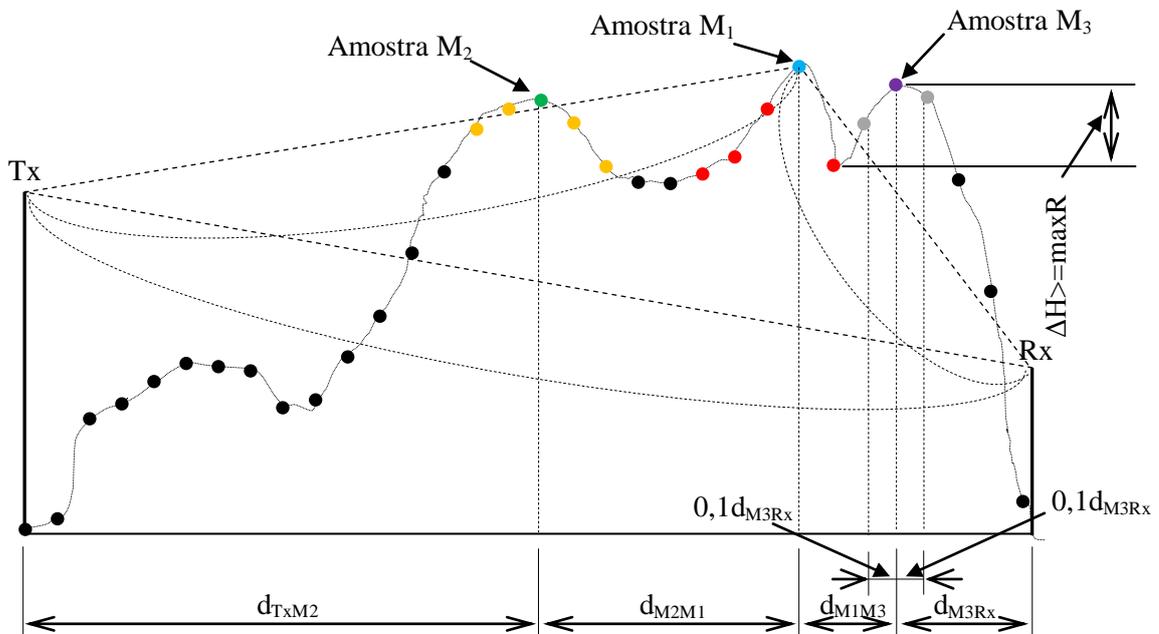


Figura 3.6 – Correção do critério utilizado na figura 3.5.

Onde,

M_3 – amostra do relevo com maior relação H/R no percurso M_1Rx ;

● – amostras pertencentes ao obstáculo principal do percurso M_1Rx ;

● – amostra equivalente a M_3 ;

ΔH – distância vertical entre a última amostra em declive e a mais alta do aclave;

$\max R$ – valor máximo do primeiro raio de Fresnel do percurso $TxRx$;

Os demais parâmetros são os mesmos as figuras 3.3 e 3.4.

Neste exemplo, a distância vertical entre os valores de H da última amostra em declive e a amostra mais alta do aclave do obstáculo principal do percurso $TxRx$, conforme a figura 3.5,

é maior ou igual ao valor máximo do primeiro raio de Fresnel do referido percurso. Logo, essas amostras em aclave deixaram de fazer parte do conjunto pertencente ao obstáculo principal do percurso TxRx. Conseqüentemente, elas formaram o conjunto de amostras do obstáculo principal do percurso M₃Rx.

3.2 Cálculo do raio de curvatura de cada obstáculo

Após a definição dos obstáculos principais de cada percurso, é possível calcular então o raio de curvatura desses obstáculos, utilizando o conjunto de amostras que os compõem, no método descrito na seção 2.4.1. Vale ressaltar que, de acordo com o “Princípio da Ação Local” [14], só as amostras pertencentes ao topo dos obstáculos são relevantes. Por outro lado, quanto maior o número de amostras utilizadas, melhor é o ajuste da parábola ao topo do obstáculo. Desta forma, na hora de avaliar que amostras do obstáculo podem ser utilizadas para o cálculo do seu raio, pode-se utilizar novamente o critério empírico da seção 3.1.1, porém de forma mais rigorosa, ou seja, se a distância vertical entre a última amostra em declive e a mais alta do aclave (ΔH da figura 3.7) for equivalente a 10% do valor máximo do primeiro raio de Fresnel daquele percurso ($\max R$ da figura 3.7) ou maior, essas amostras deverão ser desconsideradas, e assim evitar distorções no cálculo do raio do topo do obstáculo. A figura 3.7 demonstra o critério descrito na seção 3.2.

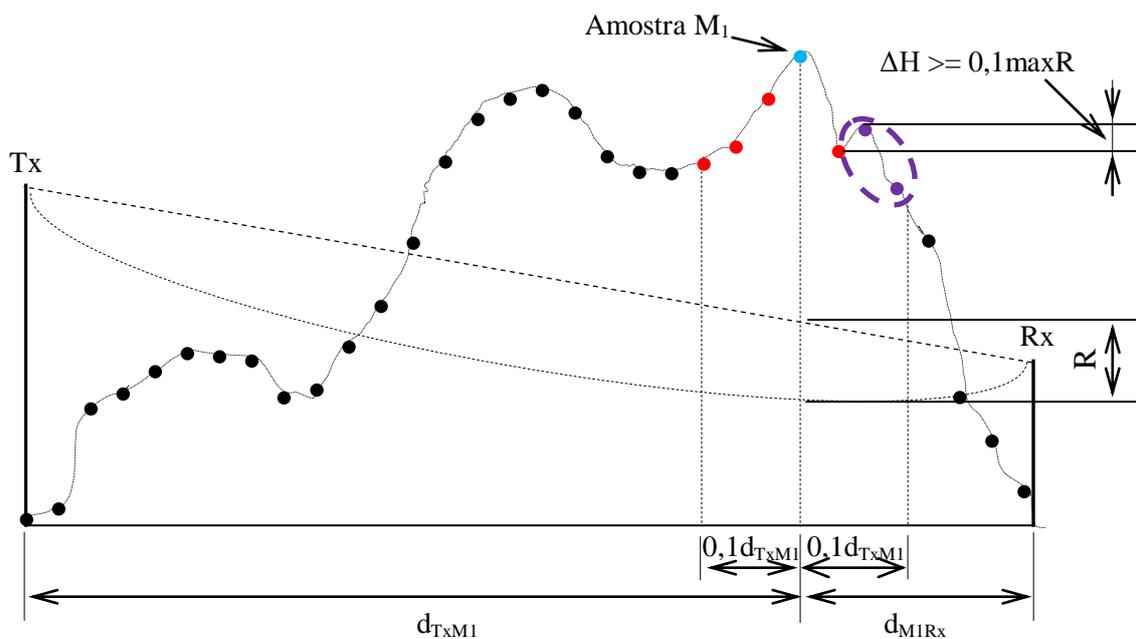


Figura 3.7 – Critério utilizado na seção 3.2.

Onde,

Tx – terminal transmissor;

Rx – terminal receptor;

ΔH – distância vertical entre a última amostra em declive e a mais alta do aclive;

maxR – valor máximo do primeiro raio de Fresnel do percurso TxRx;

R – raio da primeira zona de Fresnel no percurso;

M_1 – amostra do relevo com maior relação H/R no percurso TxRx;

d_{TxM_1} – distância do percurso entre Tx e a amostra M_1 ;

d_{M_1Rx} – distância do percurso entre a amostra M_1 e Rx;

- – amostras equidistantes do perfil do relevo;
- – amostras pertencentes ao obstáculo principal do percurso TxRx;
- – amostra equivalente a M_1 ;
- – amostras descartadas pelo critério da seção 3.2;
- / — – contorno real do relevo.

3.3 Cálculo da atenuação equivalente de cada obstáculo

Depois de analisar o perfil e de caracterizar suas visadas possíveis com seus respectivos obstáculos principais, pode ser identificada a amostra de maior relação H/R de cada obstáculo e seu respectivo raio de curvatura. Utilizando esses parâmetros nas equações que dão origem à equação (2.114), é possível calcular a atenuação equivalente de cada obstáculo.

Contudo, adiantando algumas conclusões dos resultados numéricos do próximo capítulo, foram identificadas algumas restrições no número de obstáculos possíveis de serem considerados e na utilização da parcela T (correção devido à curvatura do obstáculo). Para isto será necessário criar alguns critérios empíricos para caracterizar essas restrições.

3.3.1 Restrição do número de obstáculos possíveis de serem utilizados

A primeira conclusão da utilização do método Assis foi que, quando havia mais do que sete obstáculos relevantes ($H/R < -0,6$ em seu respectivo percurso), o cálculo da atenuação total do percurso ficava muito pessimista (valor calculado alto em relação ao valor medido). Assim, neste método utilizar-se-á no máximo sete dos obstáculos relevantes do perfil.

3.3.2 Restrição da utilização da parcela T relacionada ao número de obstáculos

Outra conclusão da utilização direta do método Assis nos conjuntos de dados foi que o modelo ficava muito pessimista quando utilizávamos a parcela T em mais de um obstáculo, além do formado no percurso TxRx. Por este motivo, neste método, para percursos com múltiplos obstáculos, consideramos a parcela T apenas para o obstáculo mais importante, ou seja, aquele com maior relação H/R .

3.3.3 Restrição da parcela T relacionada a H/R

Outra conclusão baseada nos resultados numéricos foi que, à medida que a obstrução H do obstáculo crescia, e, conseqüentemente, também a parcela T , mais pessimista ficava o valor total da atenuação. Uma explicação possível é que, à medida que a relação H/R do obstáculo aumenta, menor é a importância da dimensão do topo, até chegar ao ponto que a relação H/R é tão grande que o obstáculo pode ser considerado do tipo gume de faca, isto é, a parcela T pode ser considerada igual a zero.

Logo, foi necessário, primeiramente, definir o valor máximo de H/R até onde o valor de T pode ser calculado através das equações 2.111 e 2.112, e o valor mínimo de H/R a partir do qual o valor de T pode ser considerado igual a zero, ou seja, o obstáculo pode ser tratado como gume de faca. Feito isso, o próximo passo foi criar uma regra de transição para a parcela T quando a relação H/R ficar entre os dois valores descritos acima. Neste caso, foi utilizada uma simples interpolação linear com resultados satisfatórios. Assim, o critério para o cálculo de T foi definido, empiricamente, conforme descrito abaixo:

$0 < H/R < 1 \rightarrow$ a parcela T é calculada através das equações 2.111 e 2.112;

$1 \leq H/R \leq 3 \rightarrow$ parcela T é calculada por interpolação linear;

$H/R > 3 \rightarrow T = 0.$

3.4 Aplicação do modelo de terra esférica lisa

Apesar das restrições e soluções empíricas utilizadas, até agora o modelo apresentado é basicamente o método Assis. Entretanto, mais uma vez a aleatoriedade do relevo demonstrou que o método descrito até agora não seria suficiente para caracterizar, satisfatoriamente, o efeito da difração em qualquer tipo de terreno. Na próxima seção, são descritos situações do

relevo onde foi necessário adaptar os modelos de Propagação sobre Terra Esférica, descrito na seção 2.2.3.1, e empregá-lo neste método, obtendo melhoras consideráveis nos resultados.

3.4.1 Propagação sobre Terra Esférica Lisa

Dentro dos conjuntos de dados utilizados, foram identificados outros tipos de relevo onde o modelo Assis também parece não se ajustar adequadamente. São perfis que cumprem o critério $H/R > -0,6$, mas não apresentam, aparentemente, obstáculo que se destaque em relação ao restante do perfil. A figura 3.8 apresenta um perfil real desse tipo.

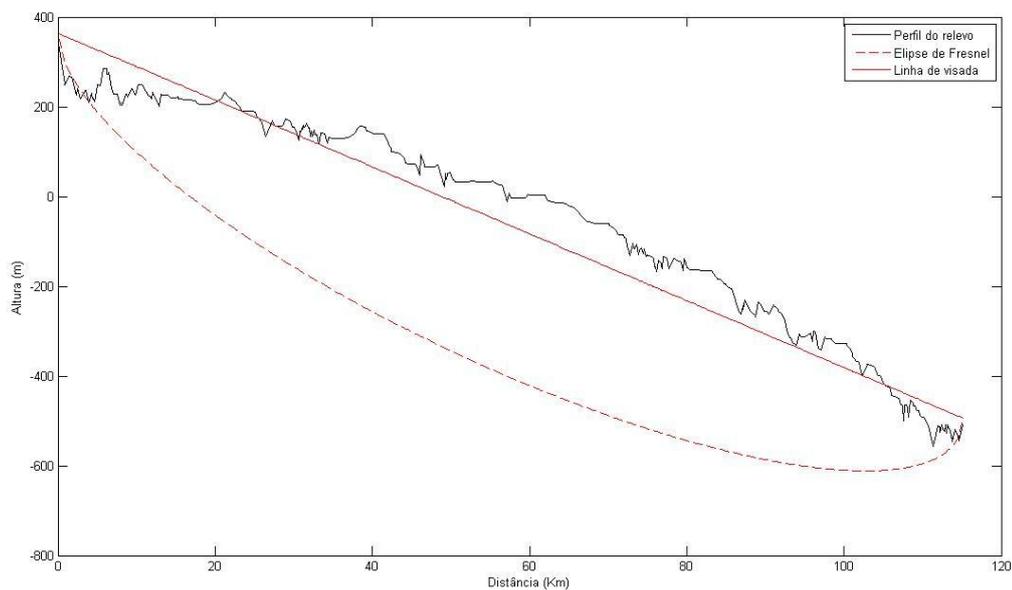


Figura 3.8 – Exemplo de perfil sem obstáculo principal.

Para este tipo de perfil foi utilizada uma solução baseada em Assis e Cerqueira [42], que adapta a solução para difração sobre terra esférica lisa, com antena de recepção além do horizonte, descrita na seção 2.2.3.1, para terreno não completamente liso, situação semelhante à de alguns perfis descritos nesta seção.

O primeiro passo é calcular o valor da mediana das alturas das amostras do perfil, sendo que essa mediana substitui as alturas das amostras do perfil para esta solução, formando uma superfície lisa equivalente sobre a curvatura da Terra.

Em seguida, devido a essa superfície lisa equivalente, é utilizado um artifício gráfico para calcular as alturas equivalentes dos terminais (h_e). Assim, é traçada uma tangente entre os terminais e essa superfície lisa. Os tamanhos dessas tangentes são considerados os novos

horizontes-rádio de cada terminal que, através da equação (3.1), permite encontrar a altura equivalente de cada terminal.

$$h_e = \frac{H_R^2}{2a_e} \quad (3.1)$$

Onde,

h_e – altura equivalente do terminal;

H_R – novo horizonte rádio;

a_e – raio efetivo da Terra.

O exemplo de relevo, descrito na figura 3.9, demonstra a definição do novo horizonte-rádio de cada terminal.

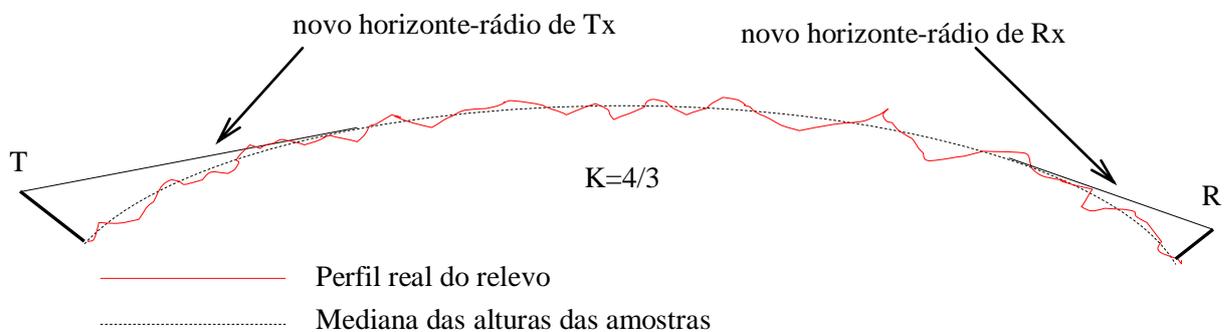


Figura 3.9 – Esboço apresentando a definição dos horizontes-rádio dos terminais.

Em alguns casos, a altura da antena do terminal Rx é muito reduzida, ficando abaixo da superfície lisa equivalente. Neste caso, a tangente utilizada no cálculo da altura equivalente desse terminal deve ser traçada diretamente sobre o perfil, dispensando a utilização daquela superfície lisa equivalente. Após a definição das alturas equivalentes dos terminais, segue-se normalmente o método descrito na seção 2.2.3.1 para calcular a atenuação total do perfil.

Entretanto, foi necessário definir critérios para utilização desta restrição. O primeiro critério deve indicar o grau de irregularidade máxima do relevo para utilização desta adaptação, já que a solução foi desenvolvida para terra lisa. Para isso, utilizar-se-á, mais uma vez o parâmetro Δh calculado sobre todo perfil. Conforme definido anteriormente para terra lisa, os resultados numéricos mostraram que o critério deve ser $\Delta h < 0,1R$. Por outro lado, quando $\Delta h > 0,5R$, o relevo deve ser considerado irregular e a solução deve alcançada pelo método definido nas seções 3.1 a 3.3. Para os valores de Δh intermediários, deve-se realizar a interpolação linear entre as duas soluções. Ou seja,

$\Delta h < 0,1 R \rightarrow$ método da seção 3.4.1 (modelo de terra esférica);

$0,1 R \leq \Delta h \leq 0,5R \rightarrow$ interpolação linear entre as soluções;
 $\Delta h > 0,5R \rightarrow$ método da seção 3.1 a 3.3.

Outro critério, este já estabelecido pela Recomendação UIT-R P.526-11 e pela equação (2.49), define a distância mínima do percurso para a utilização dessa solução. Nessa Recomendação, a distância mínima está relacionada à precisão mínima de 2 dB. Como inicialmente não há interesse em restringir a utilização dessa solução à essa precisão, emprega-se o critério descrito abaixo, com resultados satisfatórios.

$$d_{total} > 0,6d_{min}$$

onde,

d_{total} – distância total do perfil;

d_{min} – distância mínima para utilização da solução da Rec. UIT-R P.526-11 com precisão de 2 dB.

Por último, foi estabelecido um critério relacionado à solução gráfica utilizada para o cálculo das alturas equivalentes dos terminais, descrita anteriormente. Na prática, dependendo também do tipo de relevo, os horizontes-rádio podem ficar muito pequenos e, em consequência, os ganhos de altura $G(Y)$, da seção 2.2.3.1, produzindo uma atenuação total muito pessimista em relação ao valor medido. Assim, foi estabelecido empiricamente que o horizonte-rádio total (soma dos horizontes-rádio de cada terminal) deve ter, pelo menos, 50% do tamanho da distância total do perfil. Além disso, o horizonte rádio total deve ser menor que a distância total do perfil, garantindo que o receptor está na zona de difração do transmissor, condição indispensável para utilização do método da seção 2.2.3.1. Assim,

$$d_{total} > d_{hr} > 0,5d_{total}$$

onde,

d_{total} – distância total do perfil;

d_{hr} – horizonte-rádio total (soma dos horizontes-rádio de cada terminal).

Para os perfis que não se enquadram nesses critérios, deverá ser utilizado o método descrito nas seções 3.1 a 3.3.

4 Resultados numéricos

Utilizando diversos conjuntos de dados de medições realizadas em perfis de relevo provenientes de vários países da Europa e nos Estados Unidos, este capítulo apresenta resultados numéricos calculados com o modelo proposto. Neste contexto, a seção 4.1 descreve em detalhe os conjuntos de dados, relacionando suas fontes, assim como os critérios empregados na seleção das medições. A seção 4.2 introduz os critérios de comparação usados entre os modelos, além das medidas estatísticas consideradas para esta finalidade. A seção 4.3 enfatiza a importância dos fundamentos teóricos incluídos neste modelo, tais como terra plana, terra esférica lisa e efeito da curvatura do topo do obstáculo. Por outro lado, a seção 4.4 destaca como se comporta o modelo proposto relativamente aos resultados avaliados por outros modelos normalmente utilizados no cálculo do efeito da difração.

4.1 Conjuntos de dados utilizados

Este modelo foi testado através de quinze conjuntos de dados com medições realizadas em locais e épocas diferentes, compilados pelo *Correspondence Group* 3K-1 (CG 3K-1) da União Internacional de Telecomunicações – Setor de Radiocomunicações (UIT-R) e validada conforme reportado no documento 3K/11 [43] de maio de 2008. Os conjuntos de dados norte-americanos foram retirados diretamente da base de dados do que os originou, embora também estivessem presentes nos estudos desenvolvidos pelo CG 3K-1.

Cabe ressaltar que os conjuntos de dados possuem um número maior de medições do que as utilizadas neste trabalho. Isto ocorre porque foram utilizadas somente aquelas consideradas válidas, isto é, aquelas que preenchem as condições abaixo:

- a) coordenadas geográficas especificadas com precisão suficiente, e erro no comprimento do percurso menor que 2 km;
- b) ausência de erro nos dados do perfil do relevo (sem inconsistência nas alturas e distância entre as amostras menor que 5 km);
- c) ausência de contaminação nas medições causada por obstruções do tipo “clutter” (prédios, vegetação, etc.);
- d) ausência de incoerências nas medições realizadas em percursos com linha de visada, isto é, a diferença entre a atenuação medida e a atenuação de espaço livre é menor que 6 dB;

- e) nos arquivos que possuem medições para um grupo de alturas da antena de transmissão, apenas a mais alta foi utilizada.

O objetivo de obedecer a esses critérios é utilizar as condições mais próximas possíveis das empregadas nos resultados numéricos dos outros modelos, permitindo assim a comparação.

A tabela 4.1 associa os nomes dos conjuntos de dados com os números que serão usados nas apresentações gráficas dos resultados. Adicionalmente, inclui também a quantidade de medições realizadas, o número de perfis de relevo disponíveis e sua localização aproximada. Essa numeração segue a mesma sequência da utilizada no documento 3J/175 [44] da UIT-R, a fim de facilitar a futura comparação com os gráficos desse documento. Por conta disso, o conjunto de dados número 13 relativo ao conjunto de dados TDF, que não foi utilizado neste trabalho, foi mantido nesta tabela, apesar de não haver resultados a ele relacionados.

Cabe frisar que, assim como outros trabalhos que utilizaram a mesma base de dados, os resultados numéricos do modelo proposto são apresentados nesta dissertação sempre por conjunto de dados, e não empregando o número total de perfis. Isso porque cada um desses conjuntos de dados foi produzido em circunstâncias distintas, isto é, foram realizados por pessoas diferentes, utilizando metodologias diferentes, com equipamentos e condições atmosféricas diversas. Toda essa variedade de condições gera uma distorção difícil de ser filtrada no modelo, por isso dividir os resultados por conjunto de dados é a forma mais eficiente de mitigar os erros gerados.

4.2 Critérios de comparação entre os modelos

Os critérios de comparação entre os modelos apresentados nesta seção são baseados no erro em relação à atenuação calculada pelo modelo em dB, dado pela atenuação calculada menos a medida. Não existe um critério definitivo para decidir o melhor modelo baseado na comparação entre medições. As medidas estatísticas mais frequentemente utilizadas são a média e o desvio padrão dos erros.

Existem outras questões relacionadas ao comportamento e à natureza geral de um modelo que podem ser decisivos. Essas questões são apresentadas a seguir, listadas em ordem de importância:

Conjunto de dados	Nome do conjunto de dados	Perfis de relevo disponíveis	Medições realizadas	Localização aproximada
1	BBC	32	53	Reino Unido
2	BBCL	25	25	Reino Unido
3	BBCn	252	252	Reino Unido
4	ERT	9	9	Grécia
5	HOL	69	69	Holanda
6	IRT	584	584	Alemanha
7	IRTL	154	154	Alemanha
8	ORF	54	54	Áustria
9	RAI	83	83	Itália
10	S	107	107	Suécia
11	SUI	973	1114	Suíça
12	Swiss	405	405	Suíça
13	TDF	64	64	França
14	USphase1	1767	4412	Estados Unidos
15	USphase2	410	1449	Estados Unidos
16	YLE	100	100	Finlândia
	Total	5088	8934	

Tabela 4.1 – Conjuntos de dados disponíveis.

- a) desvio padrão dos erros – deve ser o menor possível. Essa medida é de grande relevância por ser a característica mais fundamental de um modelo. Não existe uma maneira simples de diminuir o desvio padrão, a não ser melhorando o próprio modelo. É importante comparar o desvio padrão através de conjuntos de dados com o maior número possível de medições válidas;
- b) erro médio – em geral deve ser o mais próximo possível de zero. Considerando as condições práticas existentes, uma média levemente negativa é melhor do que uma positiva. Isto porque os modelos utilizados aqui não levam em consideração obstruções do tipo “clutter” (construções, vegetação, etc.) próximas aos terminais. Logo, algumas medições podem ter sido afetadas por obstruções locais. O erro médio é sempre menos importante do que o desvio padrão porque sempre pode ser corrigido empiricamente. É preferível que um modelo alcance um erro médio

pequeno sem utilizar uma correção empírica, particularmente porque essa correção dependerá do conjunto de dados utilizado. Contudo muitas aplicações utilizam dados empíricos de forma bem sucedida. Logo esse artifício não pode ser simplesmente descartado;

- c) continuidade - a descontinuidade ocorre quando uma pequena mudança nos dados de entrada, como comprimento do percurso, formato do perfil, frequência, etc., causa um salto na saída. Descontinuidades podem ser toleradas em algumas aplicações de modelos de propagação, mas podem ser muito inconvenientes em outras. Descontinuidades podem causar distorções quando os resultados de propagação são exibidos graficamente, como por exemplo, em áreas de cobertura;
- d) critérios arbitrários – uma objeção com relação aos modelos híbridos, como o apresentado nesta dissertação, é a utilização de critérios arbitrários como interpolações. Na maioria das vezes, na obtenção dos seus valores ótimos, não há evidência de que as escolhas de critério sejam feitas baseadas em comparações com as medições realizadas. Por outro lado, a utilização de um critério arbitrário não é motivo para, automaticamente, descartar um modelo, mas, na comparação de dois modelos com desempenho similar, sendo um sem critério arbitrário, esse pode ser um motivo para selecioná-lo;
- e) simplicidade de implementação – este deve ser um critério a ser considerado somente em caso de modelos de extrema complexidade. Normalmente estes modelos são implementados em programas de computador. Uma vez escritos e testados, a única questão é o tempo de execução. Vale salientar que um método complicado não necessariamente possui execução lenta.

4.3 Comparação de resultados entre os fundamentos teóricos utilizados no modelo

Conforme os elementos discutidos no capítulo anterior, vários resultados numéricos do modelo descrito nesta dissertação são apresentados nesta seção, diversificando os métodos e fundamentos teóricos utilizados, demonstrando assim suas influências na qualidade dos resultados. As alíneas de a até e tratam das variações utilizadas neste modelo para fim de comparação com os nomes que serão utilizados nos gráficos e tabelas:

- a) Deygout puro – utiliza somente o método de Deygout descrito na seção 2.5.1;

- b) Deygout + T – utiliza o método de Deygout com até uma correção T , relativa ao obstáculo principal M_1 da visada TxRx;
- c) Deygout + T + terra esférica – conforme alínea b, mas utilizando o modelo de terra esférica para os perfis que cumprem os requisitos descritos na seção 3.4.2. É o modelo objetivo desta dissertação e está descrito detalhadamente no capítulo 3;
- d) Deygout + $3T$ + terra esférica – conforme alínea c, mas utilizando a correção T para os obstáculos principais M_1, M_2, M_3 , das respectivas visadas TxRx, Tx M_1 e M_1 Rx;
- e) Deygout + T + terra plana + terra esférica – conforme alínea c, mas substituindo o modelo de obstáculo gume de faca pelo de terra plana da seção 2.1 para obstáculos planos ($\Delta h < 0,1R$) no intervalo $-0,6 > H/R > -0,38$.

As figuras de 4.1 a 4.6 e as tabelas de 4.2 a 4.5 apresentam a comparação dos resultados deste modelo e das modificações descritas anteriormente, para cada conjunto de dados, em termos do erro médio e do desvio padrão dos erros, em dB. Para evitar que os gráficos fiquem desnecessariamente confusos, as comparações serão divididas em três grupos de gráficos e tabelas. Cabe ressaltar, que nas apresentações gráficas, os resultados estão caracterizados apenas nos símbolos, sendo que as linhas servem apenas para facilitar a visualização.

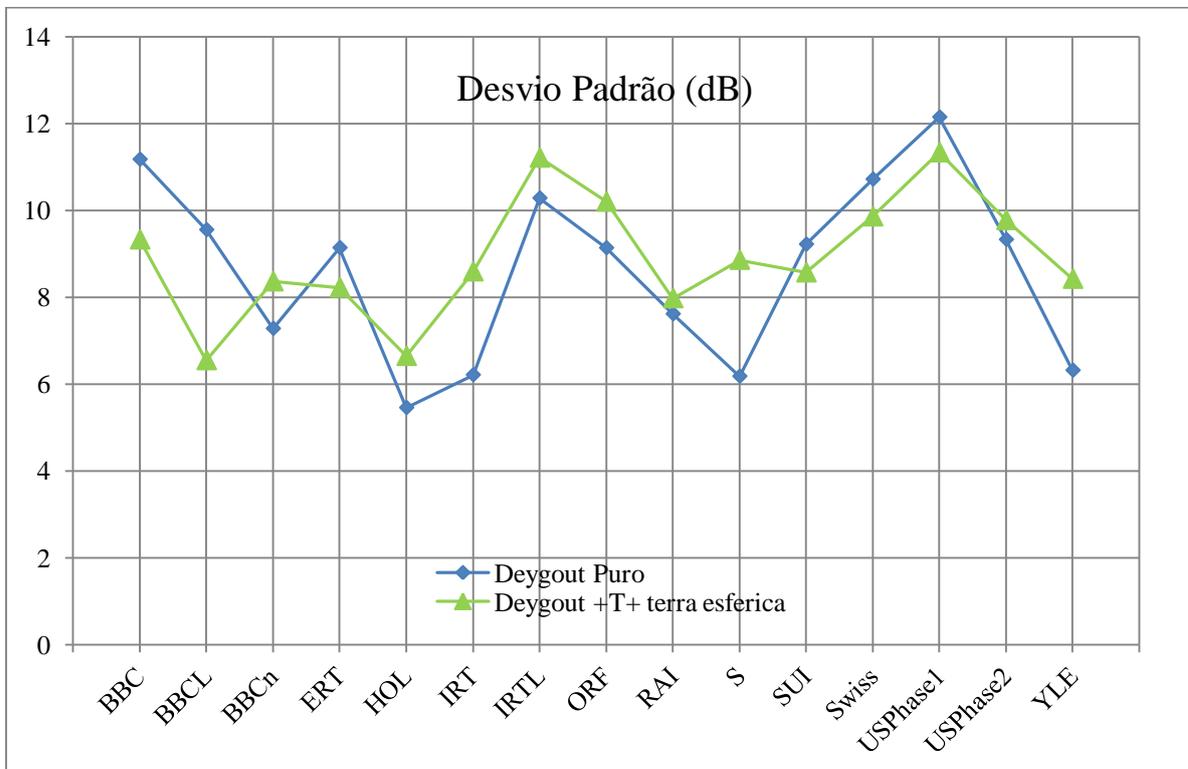


Figura 4.1 – Comparação entre o desvio padrão do modelo proposto com Deygout puro.

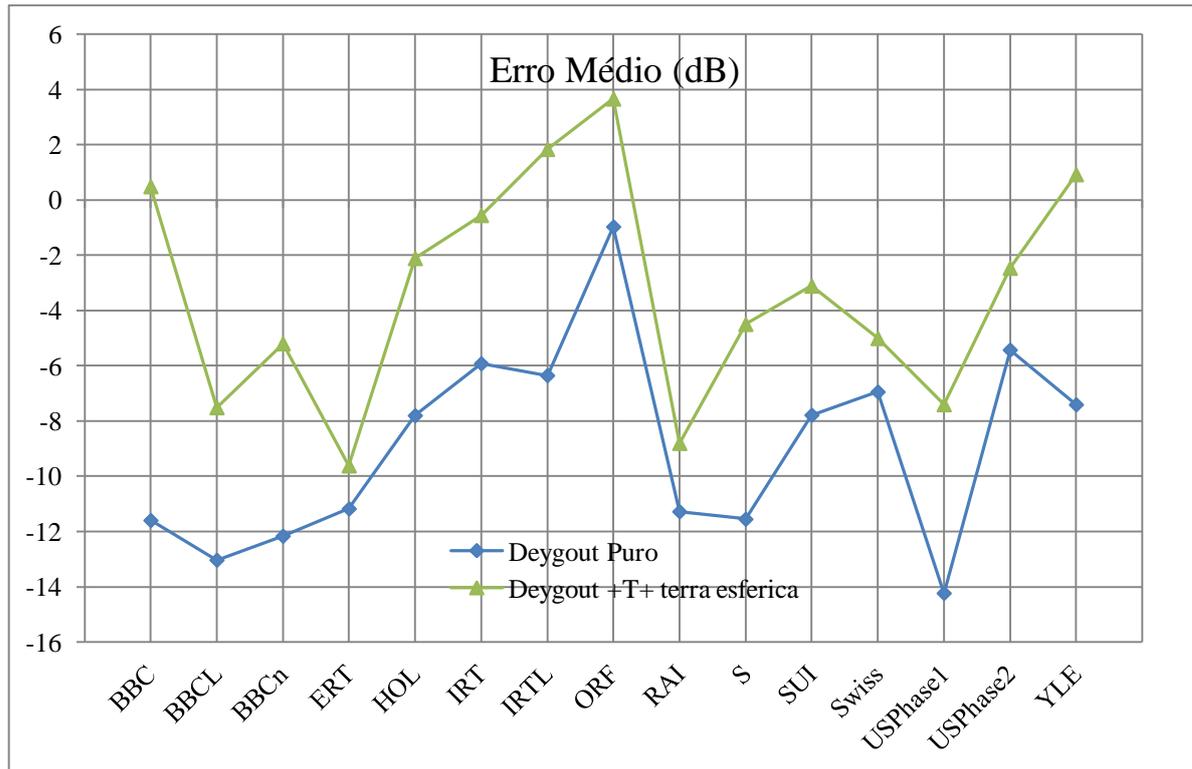


Figura 4.2 – Comparação entre o erro médio do modelo proposto com Deygout puro.

A primeira comparação foi realizada com o modelo Deygout [29], que serviu de base para este modelo, com o objetivo de identificar se, de fato, houve algum ganho de qualidade. Da observação do gráfico do desvio padrão dos erros verifica-se que, dependendo do conjunto de dados, o modelo proposto ou o modelo Deygout pode ter o melhor resultado, mas que de certa forma esses resultados se equilibram, não sendo possível identificar qual dos dois é o mais preciso. Entretanto, da observação do gráfico de erro médio, é fácil concluir que o modelo Deygout é quase sempre mais otimista, isto é, o valor da atenuação calculada tende a ser sempre muito menor que o valor medido, se comparado com os resultados do modelo descrito neste trabalho. A tabela 4.2 apresenta as médias, aritméticas e ponderadas (utilizando o número de medições como peso), do desvio padrão e do erro médio para todos os conjuntos de dados, explicitando essa tendência.

Modelo	Média aritmética Desvio padrão	Média aritmética Erro médio	Média ponderada Desvio padrão	Média ponderada Erro médio
Deygout puro	8,65	-8,91	10,43	-10,62
Deygout + T + terra esférica	8,93	-3,29	10,24	-5,00

Tabela 4.2 – Comparação numérica do modelo proposto com o modelo Deygout.

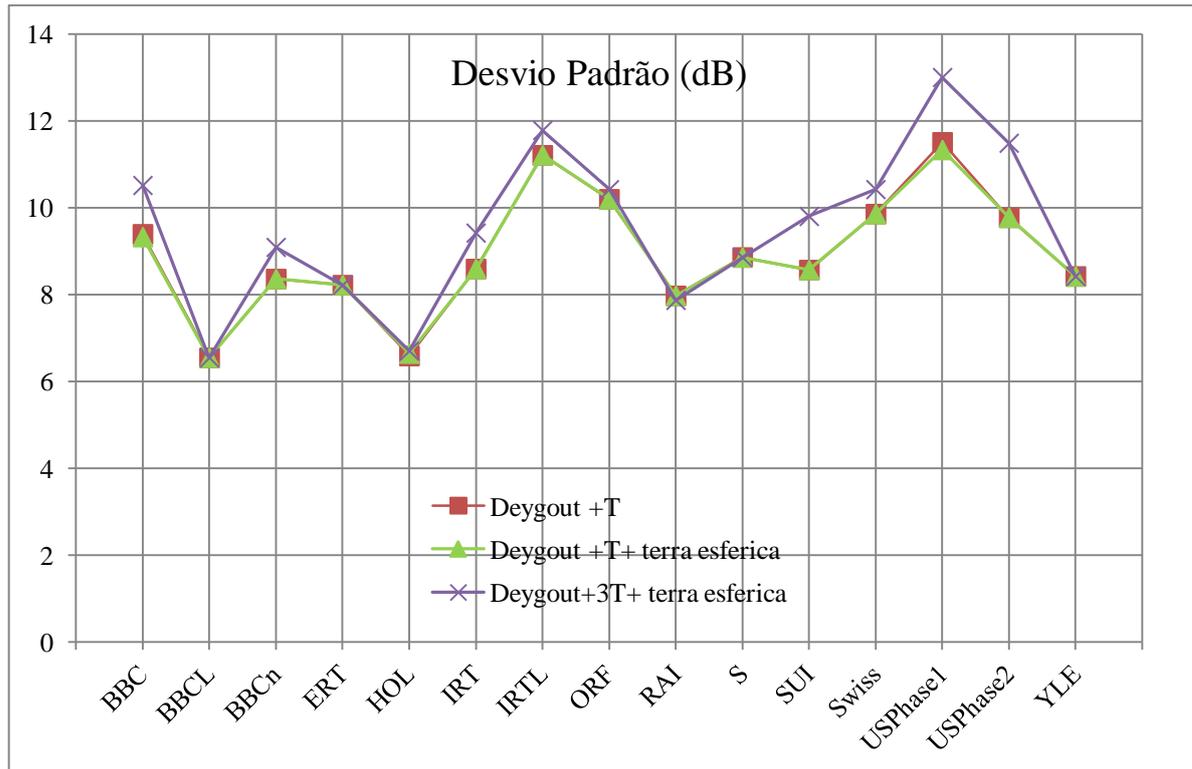


Figura 4.3 – Efeito no desvio padrão da utilização do modelo de terra esférica e da correção T (modelo proposto) para mais de um obstáculo.

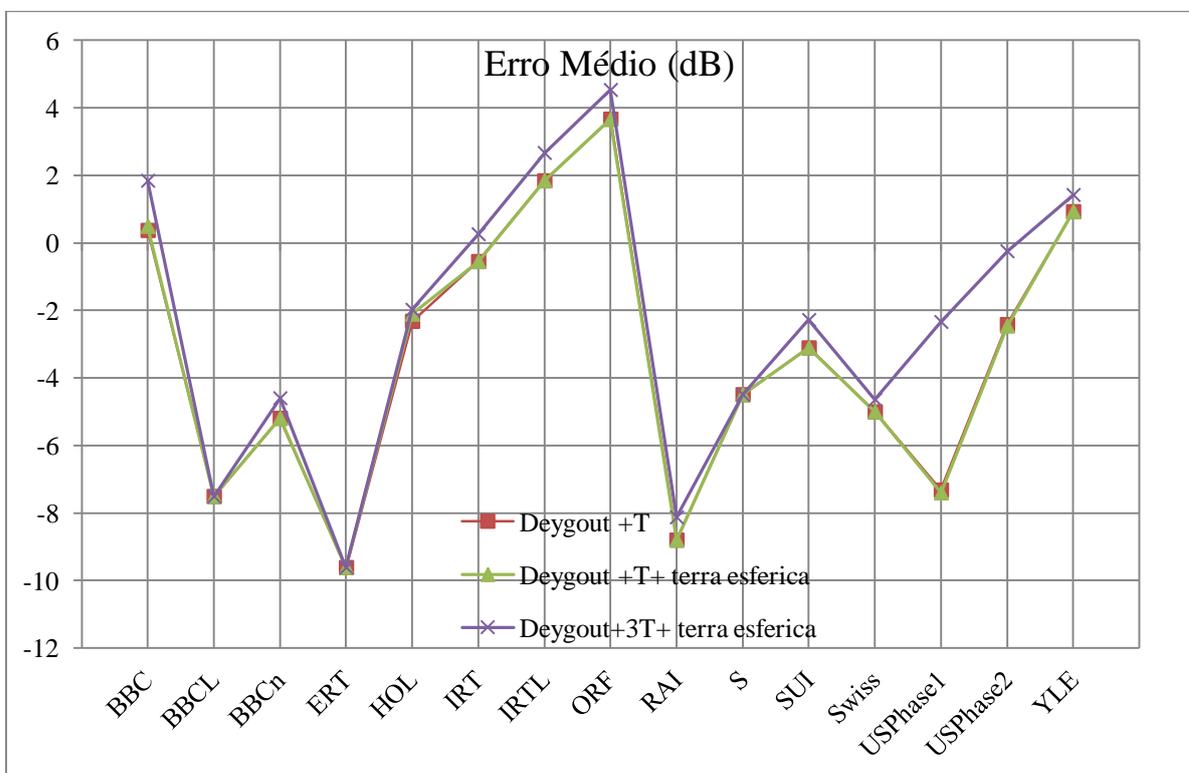


Figura 4.4 – Efeito no erro médio da utilização do modelo de terra esférica e da correção T (modelo proposto) para mais de um obstáculo.

As comparações descritas nas figuras 4.3 e 4.4 mostram a influência da inclusão do modelo de terra esférica e da utilização da correção T , relativa às dimensões do topo do obstáculo. O gráfico do desvio padrão dos erros demonstra que o modelo deste trabalho é sempre mais preciso quando utiliza a correção T apenas para o obstáculo principal da visada TxRx. Contudo, o gráfico do erro médio mostra que, dependendo do conjunto de dados testado, o erro médio utilizando a correção T para os obstáculos principais M_1 , M_2 , M_3 pode ser até relativamente menor. A tabela 4.3, apresentando as médias, aritméticas e ponderadas (utilizando o número de medições como peso), do desvio padrão e do erro médio para todos os conjuntos de dados, demonstra que a vantagem de erro médio utilizando três correções T , apesar de perceptível, não é relevante. Vale salientar que os pontos dos gráficos onde os resultados são idênticos correspondem a conjuntos de dados que não possuem perfis com mais de um obstáculo principal ou que cumpram os requisitos para caracterizar o modelo de terra esférica.

Com relação à aplicação do modelo de terra esférica, a tabela 4.3 não é muito conclusiva devido ao pequeno número de perfis existentes nos diversos conjuntos de dados que se enquadram nos critérios da seção 3.4.1. Entretanto, quando são analisados somente os quinhentos e setenta e dois (572) perfis que cumprem aqueles requisitos, o resultado demonstra a importância da sua utilização, conforme apresentado na tabela 4.4.

Modelo	Média aritmética Desvio padrão	Média aritmética Erro médio	Média ponderada Desvio padrão	Média ponderada Erro médio
Deygout + T	8,94	-3,30	10,32	-4,96
Deygout + T + terra esférica	8,93	-3,29	10,24	-5,00
Deygout + $3T$ + terra esférica	9,51	-2,34	11,62	-1,89

Tabela 4.3 – Resultado numérico mostrando principalmente a influência da correção T .

Modelo	Média aritmética Desvio padrão	Média aritmética Erro médio
Deygout + T	11,59	-8,41
Deygout + T + terra esférica	10,19	-9,02

Tabela 4.4 – Resultado numérico mostrando a influência do modelo híbrido de terra esférica para os 572 perfis lisos ou semilisos.

Quando verificamos somente os noventa e oito (98) perfis lisos ($\Delta h < 0,25$) a validade do modelo de terra lisa fica ainda mais evidente, conforme demonstrado na tabela 4.5.

Modelo	Média aritmética Desvio padrão	Média aritmética Erro médio
Deygout + T	11,88	-5,26
Deygout + T + terra esférica	7,95	-3,68

Tabela 4.5 – Resultado numérico mostrando a influência do modelo puro de terra esférica para os 98 perfis lisos.

As figuras 4.5 e 4.6 exibem as influências da utilização do modelo de terra plana da seção 2.1, substituindo o modelo de obstáculo gume de faca para obstáculos planos ($\Delta h < 0,1R$) no intervalo $-0,6 > H/R > -0,38$. O gráfico do desvio padrão mostra claramente que, nos conjuntos de dados onde o critério para utilização do modelo de terra plana pode ser utilizado, o modelo fica sempre menos preciso. Já o gráfico de erro médio não aponta nenhuma vantagem na utilização desse modelo, apesar de alguns conjuntos de dados apresentarem erro menor. A tabela 4.6 apresenta as médias, aritméticas e ponderadas (utilizando o número de medições como peso), do desvio padrão e do erro médio para todos os conjuntos de dados, explicitando essa tendência.

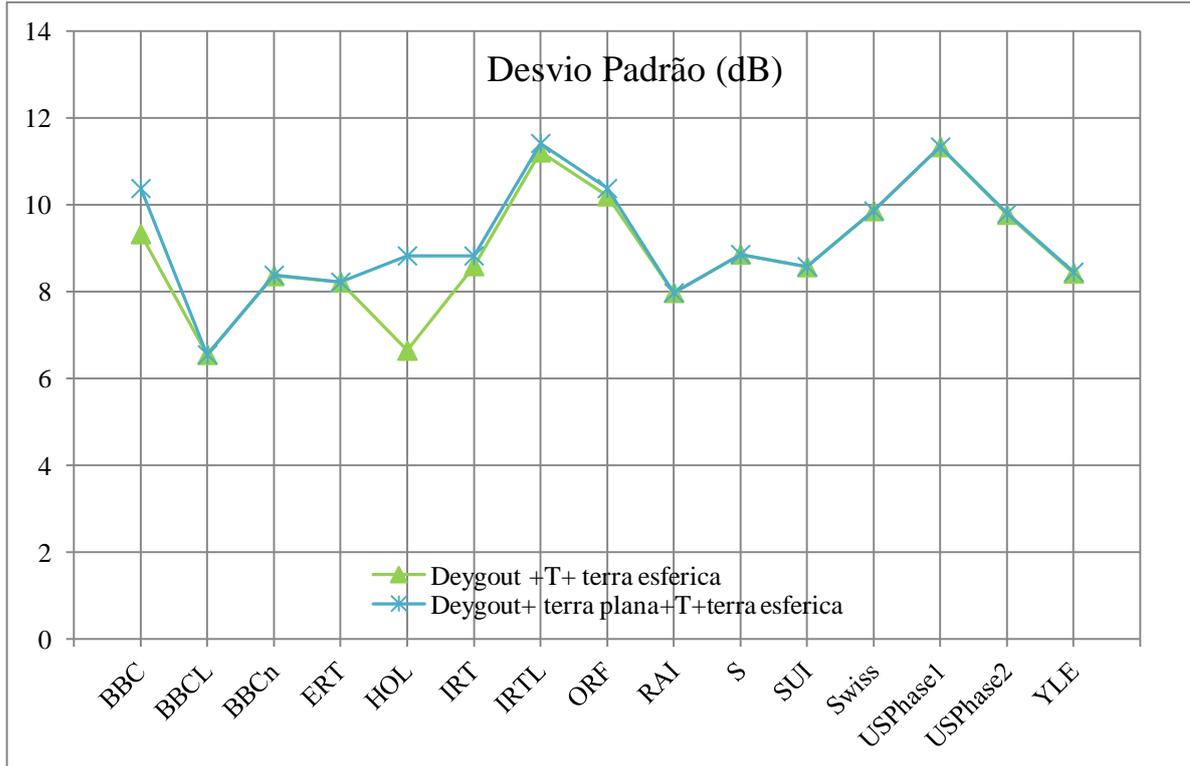


Figura 4.5 – Efeito da utilização do modelo de terra plana no desvio padrão.

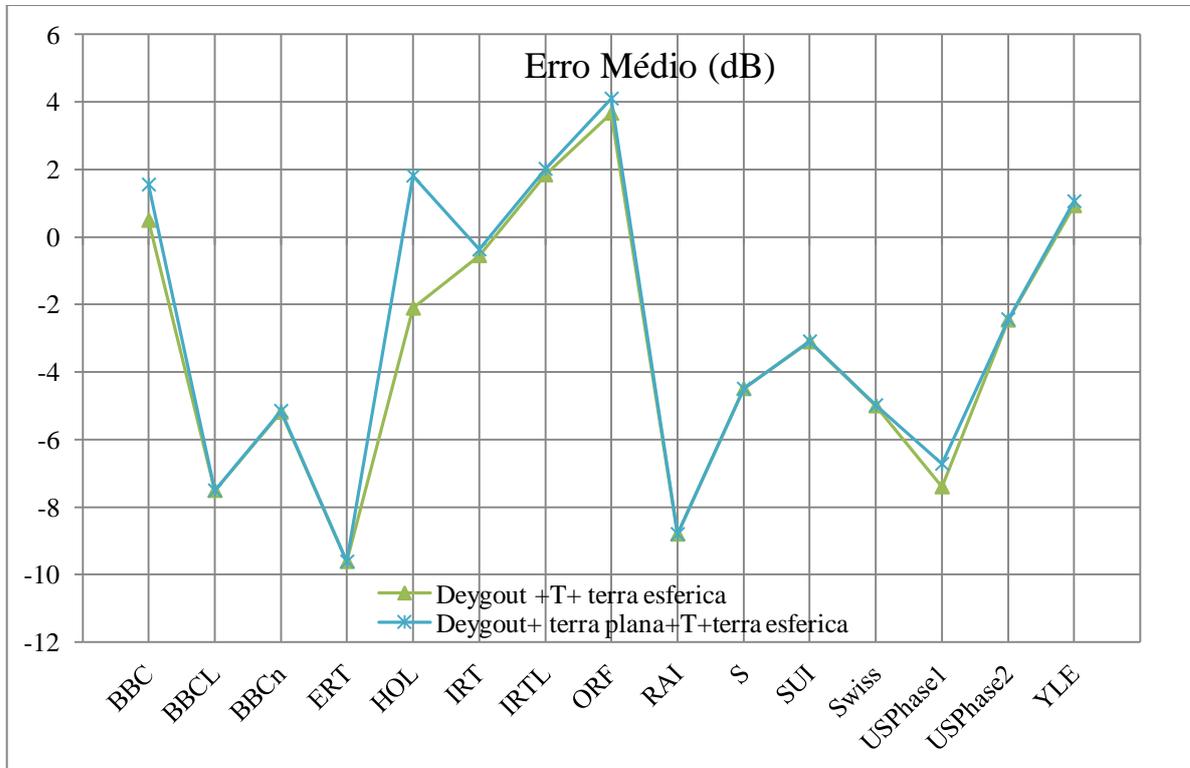


Figura 4.6 – Efeito da utilização do modelo de terra plana no erro médio.

Modelo	Média aritmética Desvio padrão	Média aritmética Erro médio	Média ponderada Desvio padrão	Média ponderada Erro médio
Deygout + T + terra esférica	8,93	-3,29	10,24	-5,00
Deygout + T + terra esférica + terra plana	9,19	-2,84	10,29	-4,60

Tabela 4.6 – Resultado numérico mostrando a influência do modelo de terra plana.

4.4 Comparação de resultados com outros modelos

Antes de descrever as comparações com outros modelos, seguem algumas informações sobre os modelos utilizados:

- a) modelo sequência de gumes de faca (*Cascaded knife-edge*) – está descrito na Recomendação UIT-R P.526-11 [21], na seção 4.42 como “Cascaded knife-edge method”. É o modelo atualmente utilizado nas Recomendações UIT-R P.452-14 [45] e P.1812-1 [46];
- b) modelo Bullington – esse modelo foi extensivamente discutido pelo CG 3K-1 no desenvolvimento da recomendação UIT-R P.1812-1. A definição do “ponto de Bullington” para as condições: linha de visada, linha de visada marginal e sem linha de visada; aparecem no documento 3K/17 [47] da UIT, incluindo a correção “taper”. O modelo Bullington, utilizado nesta comparação, se refere à atenuação produzida por um gume de faca no ponto de Bullington, mais uma correção denominada “taper”;
- c) correção C2 para o modelo Bullington – o modelo Bullington, descrito na alínea b, possui um erro médio que aumenta com o tamanho do percurso. Devido a esse efeito diversas correções foram propostas. O anexo três do documento 3K/17 descreve duas correções, sendo que a segunda é muitas vezes chamada de correção C2. O documento 3K/83 [48] parece propor o modelo Bullington com a correção C2 para uso na Recomendação UIT-R P.1812;
- d) modelo terra esférica – quatro dos seis modelos utilizados nesta comparação, assim como o modelo descrito neste trabalho, utilizam o modelo de difração em terra esférica, descrito na Recomendação UIT-R P.526-11, nas seções 3.1.1 e 3.2. Deve

ser enfatizada a importância de se fazer uma boa aproximação para difração em terra esférica sobre relevo liso ou mar. Existem dois métodos que um modelo pode utilizar para reproduzir o modelo de terra esférica para terra lisa: o método híbrido e o método “Delta”;

- e) modelos de difração híbridos – A base do método híbrido é utilizar um modelo para terreno irregular, o modelo de terra esférica, ou uma interpolação entre o dois, de acordo com a irregularidade do perfil. Os métodos híbridos podem se diferenciar de acordo com o modelo utilizado para terreno irregular, a definição do grau de irregularidade do terreno e o critério arbitrário para interpolação. Os documentos da UIT-R 3J/19 [49], 3J/70 [50] e 3J/120 [51], tiveram grande contribuição propondo vários modelos híbridos. Dois modelos híbridos, utilizando os modelos “Cascaded knife-edge” e Bullington com C2, estão incluídos nesta comparação. Ambos utilizam a definição de grau de irregularidade do terreno e de critério de interpolação definidos no documento 3J/120;
- f) modelo Delta-Bullington – foi inicialmente descrito no documento 3J/64 [52]. É, basicamente, o método Delta citado anteriormente, utilizado em conjunto com o modelo Bullington. Sua descrição detalhada está no documento 3M/124 [53];
- g) correção “Ganho de Obstáculo” para o modelo Delta-Bullington – o documento 3J/112 [54] comparou os modelos “Cascaded knife-edge” e Delta-Bullington, e introduziu na seção 6 a correção “Ganho de Obstáculo” para o modelo Delta-Bullington, demonstrando que essa correção melhorava a sua precisão.

4.4.1 Resultados numéricos do modelo

As figuras 4.7 e 4.8 apresentam o resultado para cada conjunto de dados em termos do erro médio e do desvio padrão respectivamente, conforme dados da tabela 4.7 que resume todos os resultados do modelo proposto. A fim de facilitar a comparação, essas figuras utilizarão o formato dos gráficos do documento da UIT-R 3J/75 [43], lembrando que os resultados do conjunto de dados número 13 (TDF) estão em branco porque não foi possível ter acesso a ele.

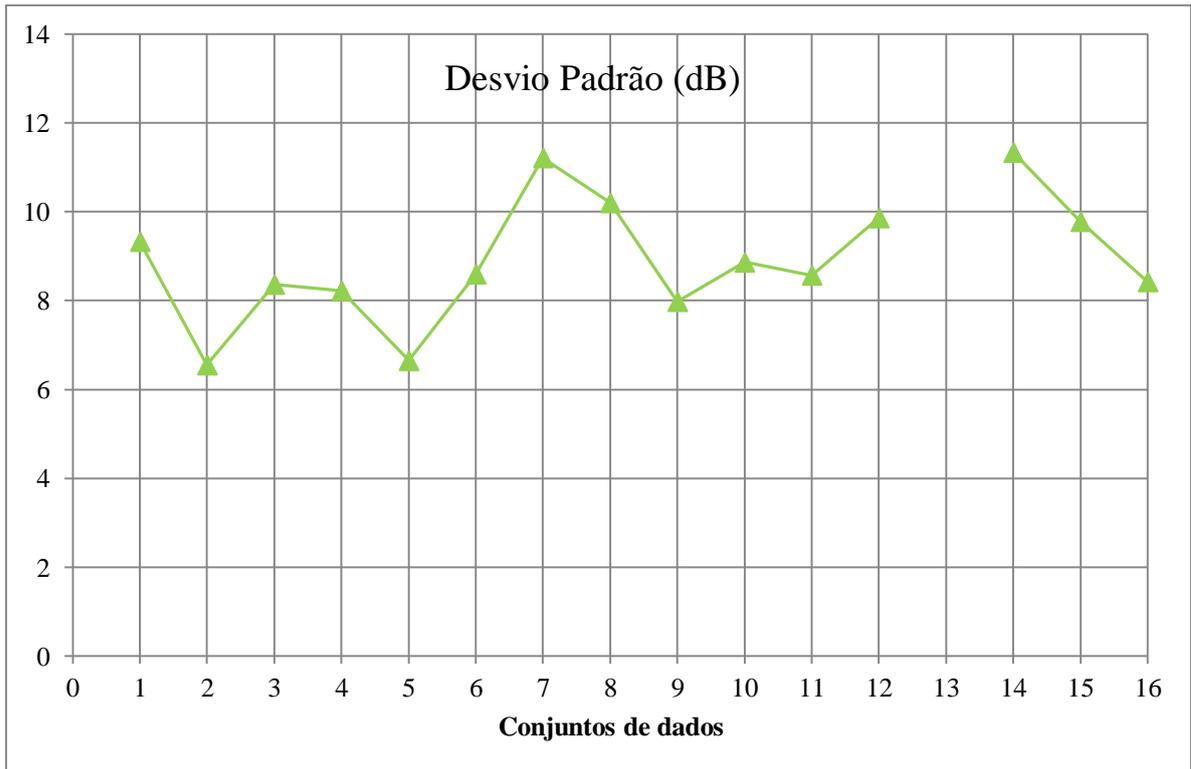


Figura 4.7 – Desvio padrão do erro para o modelo da dissertação.

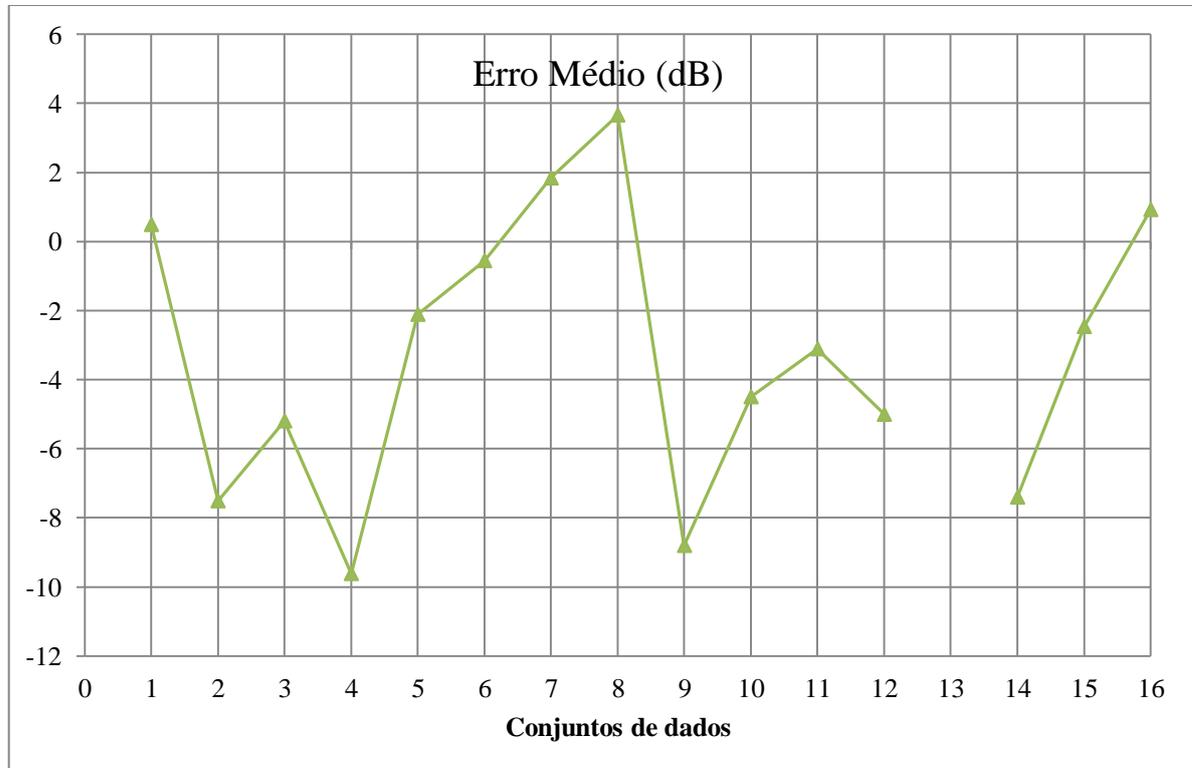


Figura 4.8 – Erro médio para o modelo da dissertação.

No.	Nome	Deygout Puro		Deygout +T		Deygout +T+ terra esférica		Deygout+3T+ terra esférica		Deygout + T + terra esférica+ terra plana	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	BBC	-11,6	11,2	0,4	9,4	0,5	9,3	1,8	10,5	1,5	10,4
2	BBCL	-13,0	9,6	-7,5	6,6	-7,5	6,6	-7,5	6,6	-7,5	6,6
3	BBCn	-12,2	7,3	-5,2	8,4	-5,2	8,4	-4,6	9,1	-5,2	8,4
4	ERT	-11,2	9,1	-9,6	8,2	-9,6	8,2	-9,6	8,2	-9,6	8,2
5	HOL	-7,8	5,5	-2,3	6,6	-2,1	6,6	-2,0	6,7	1,8	8,8
6	IRT	-5,9	6,2	-0,6	8,6	-0,6	8,6	0,3	9,4	-0,4	8,8
7	IRTL	-6,4	10,3	1,8	11,2	1,8	11,2	2,7	11,8	2,0	11,4
8	ORF	-1,0	9,1	3,7	10,2	3,7	10,2	4,5	10,4	4,1	10,4
9	RAI	-11,3	7,6	-8,8	8,0	-8,8	8,0	-8,1	7,9	-8,8	8,0
10	S	-11,5	6,2	-4,5	8,9	-4,5	8,9	-4,5	8,9	-4,5	8,9
11	SUI	-7,8	9,2	-3,1	8,6	-3,1	8,6	-2,3	9,8	-3,1	8,6
12	Swiss	-6,9	10,7	-5,0	9,9	-5,0	9,9	-4,6	10,4	-5,0	9,9
13	TDF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	USPhase1	-14,2	12,2	-7,3	11,5	-7,4	11,3	-2,3	13,0	-6,7	11,3
15	USPhase2	-5,4	9,3	-2,4	9,8	-2,5	9,8	-0,2	11,5	-2,4	9,8
16	YLE	-7,4	6,3	0,9	8,4	0,9	8,4	1,4	8,4	1,1	8,5
	Média Aritmética	-8,9	8,7	-3,3	8,9	-3,3	8,9	-2,3	9,5	-2,8	9,2
	Média Ponderada	-10,6	10,4	-4,9	10,3	-5,00	10,2	-1,9	11,6	-4,6	10,3

Tabela 4.7 – Resultados numéricos do modelo proposto.

4.4.2 Modelos utilizados para comparação

Conforme os elementos discutidos nas seções anteriores, os seguintes modelos terão seus resultados exibidos para comparação com o método descrito nesta dissertação:

- modelo “Cascaded knife-edge”;
- modelo Bullington com correção C2;
- modelo híbrido utilizando “Cascaded knife-edge”;
- modelo híbrido utilizando Bullington com correção C2;
- modelo Delta-Bullington;
- modelo Delta-Bullington com correção “Ganho de obstáculo”.

A descrição detalhada de cada modelo está no Apêndice B. As figuras 4.9 a 4.11 exibem os gráficos apresentados no documento da UIT-R 3J/75, enquanto que a tabela 4.8 apresenta numericamente os resultados dos modelos desse documento mais o resultado do modelo

descrito nesta dissertação, através das médias dos erros médios, dos desvios padrão dos erros e do erro rms (*root mean square*).

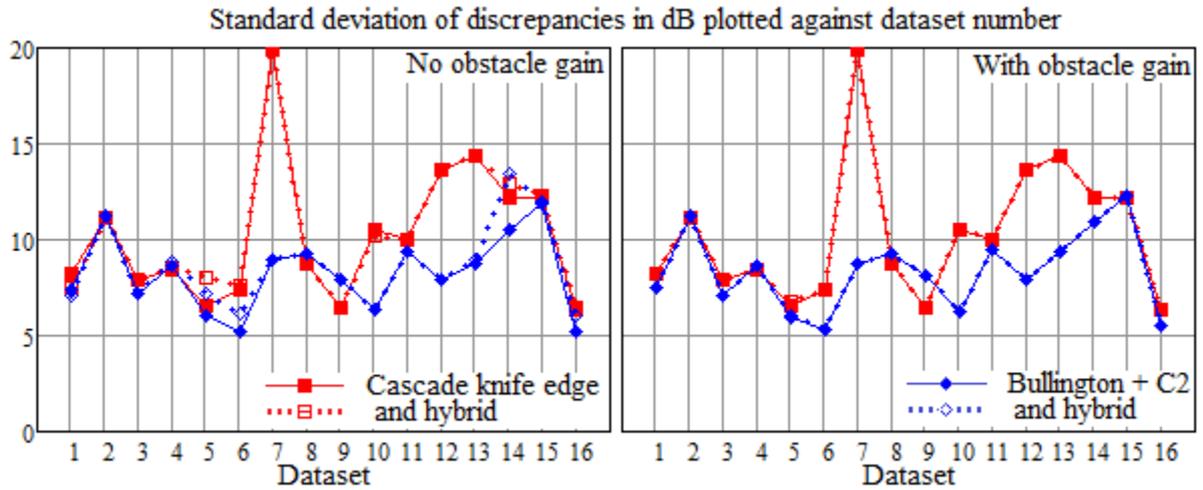


Figura 4.9 – Desvio padrão do erro para os modelos “Cascaded knife-edge” e Bullington com correção C2, híbrido ou não, com e sem correção ganho de obstáculo. Figuras obtidas do documento UIT-R 3J/75.

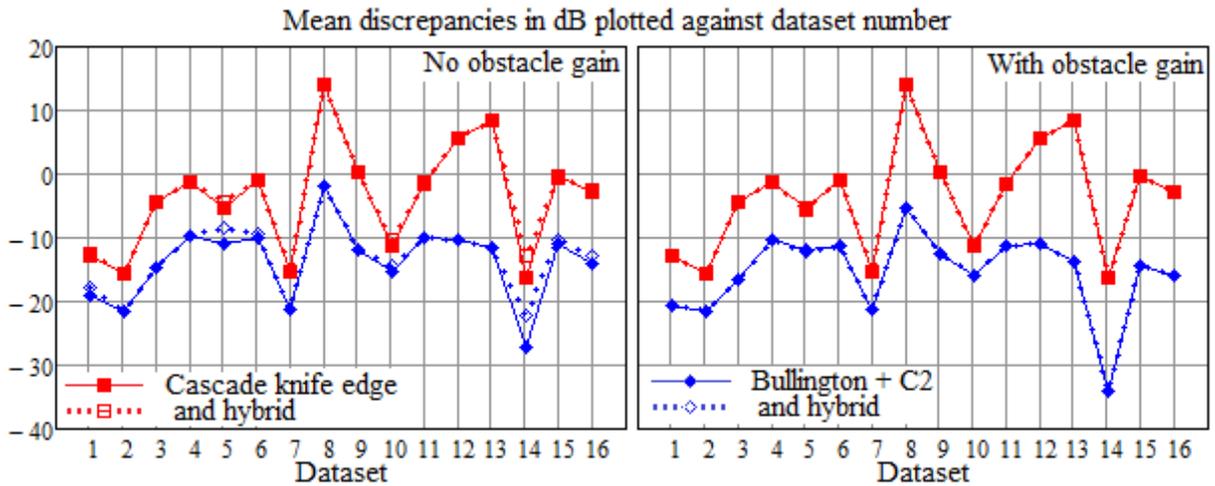


Figura 4.10 – Erro médio para os modelos “Cascaded knife-edge” e Bullington com correção C2, híbrido ou não, com e sem correção ganho de obstáculo. Figuras obtidas do documento UIT-R 3J/75.

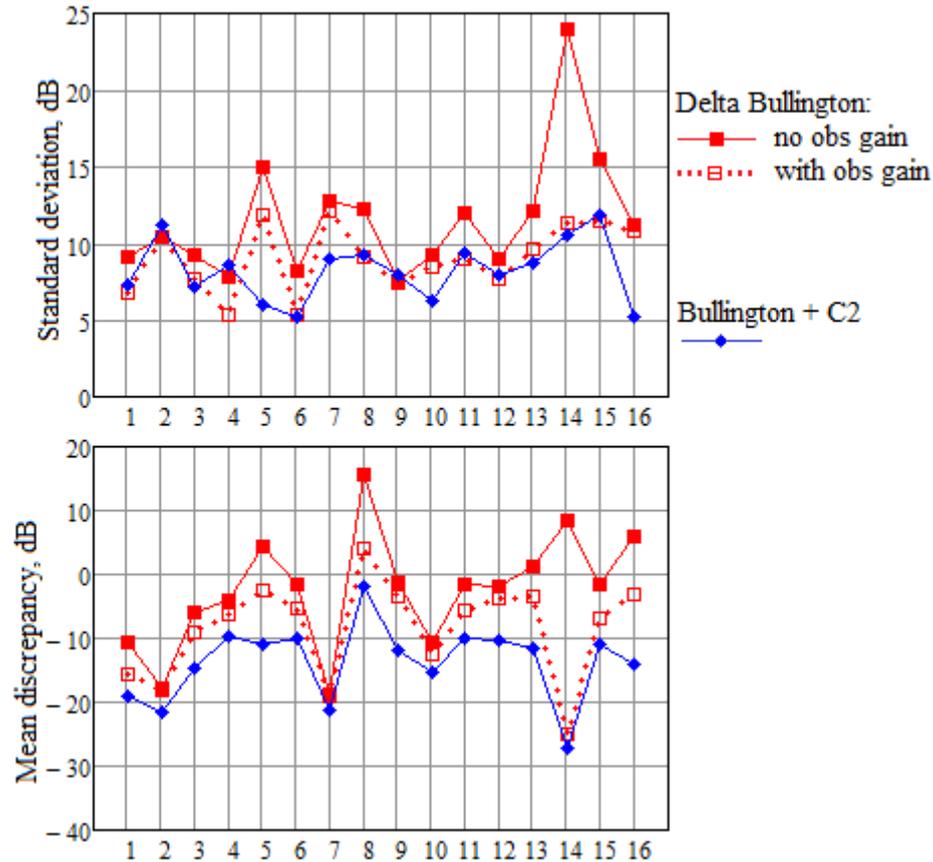


Figura 4.11 – Desvio padrão do erro e erro médio para os modelos Delta-Bullington, com e sem correção ganho de obstáculo, e Bullington com correção C2. Figuras obtidas do documento UIT-R 3J/75.

Segundo o documento 3J/175, o modelo Delta-Bullington com ganho de obstáculo, apresentou o melhor resultado, baseado dentre outras coisas, nos resultados da tabela 4.8. Esse método deve inclusive substituir o modelo “Cascaded knife edge” na próxima revisão da Recomendação P.526-11. Contudo, sem conhecer precisamente os demais métodos utilizados no documento 3J/175, o modelo proposto neste trabalho apresentou resultados visivelmente melhores que os modelos do documento 3J/175. Esta afirmativa fica evidenciada quando se considera como critérios o desvio padrão e o erro médio, uma vez que o modelo proposto corresponde ao menor erro rms (ver Tabela 4.8).

Modelo	Desvio padrão	Erro médio	Erro RMS
Deygout + T + terra esférica (proposto)	8,9	-3,3	10,2
“Cascaded knife edge”	10,3	-3,7	13,3
“Cascaded knife edge” híbrido	10,4	-3,3	13,1
Bullington + C2	8,2	-13,8	16,3
Bullington + C2 híbrido	8,6	-13,0	15,9
Delta-Bullington, sem ganho de obstáculo	11,6	-2,5	14,4
Delta-Bullington, com ganho de obstáculo	9,0	-8,5	13,4

Tabela 4.8 – Resultados numéricos de todos os modelos.

5 Conclusão

Esta dissertação analisou o problema da difração sobre terreno irregular, objetivando desenvolver um modelo de cálculo que cobrisse desde obstáculos convexos isolados até a situação ideal de um relevo perfeitamente liso. O modelo proposto é do tipo semiempírico uma vez que tem por base as teorias tradicionais relacionadas à difração, como a propagação sobre terra esférica lisa, difração sobre obstáculos gume de faca, etc., mas também utiliza critérios arbitrários, definidos por análise experimental em função do parâmetro rugosidade do terreno Δh . Pode também ser considerado um modelo híbrido, uma vez que engloba tanto a solução para terra lisa, como para obstáculos isolados, possuindo ainda uma solução intermediária por interpolação para a situação onde não sejam aplicáveis os casos anteriores.

Este modelo baseia-se no método de cálculo proposto por Assis [38], que por sua vez, é um aprimoramento do modelo de Deygout [29], incluindo uma correção relacionada ao efeito da curvatura do topo do obstáculo. É importante observar que os resultados numéricos mostraram que a precisão do modelo, medida através do desvio padrão dos erros, melhora sensivelmente quando a referida correção é utilizada apenas para o obstáculo principal da visada TxRx. Tais resultados demonstram que, para o mesmo desvio padrão, este modelo alcança erros médios muito menores que o modelo de Deygout puro. Verificou-se ainda que a tentativa de utilizar o modelo de terra plana quando a obstrução do relevo pode ser associada a esta geometria não trouxe melhoria significativa aos resultados. Por este motivo, esta solução foi deixada de lado a fim de não aumentar a complexidade do modelo. Com relação aos relevos lisos ou semilisos, onde se considera a propagação sobre uma terra esférica, os resultados indicaram que a precisão do modelo aumenta significativamente quando se utiliza a solução híbrida. Contudo esses resultados influenciaram pouco no cômputo geral porque no banco de dados utilizado existe um número relativamente pequeno de perfis de relevos com características que se enquadrem nos critérios estabelecidos para esta situação.

Para comparação com outros modelos que calculam o efeito da difração sobre terrenos irregulares, foram utilizados inúmeros documentos da UIT. Tais documentos se referem a trabalhos atuais que visam obter um modelo de uso simplificado, capaz de apresentar resultados satisfatórios para qualquer tipo de relevo, obviamente com a finalidade de empregá-lo nas Recomendações que tratam o problema da difração. De modo similar ao procedimento adotado nesta Dissertação, a avaliação desses modelos pela UIT teve por base o desvio padrão dos erros e o erro médio. A análise comparativa dos resultados com os números

constantes do documento 3J/175[44] do UIT-R mostrou que o modelo aqui proposto teve um desempenho plenamente satisfatório. Observa-se no citado documento que se chegou a um desvio padrão equivalente ao obtido pelo modelo Delta-Bullington com a correção denominada “ganho de obstáculo” (definido como o modelo de melhor resultado), mas com um erro médio muito menor, o que fica evidenciado pelo menor erro rms obtido.

Cabe salientar que a base de dados utilizada na avaliação do modelo proposto nesta dissertação foi praticamente igual àquela utilizada pelo UIT-R. Apenas o conjunto de dados designado por TDF não foi levado em conta. Considerado que este conjunto é relativamente pequeno, com apenas 64 medidas, pode-se dizer que sua ausência não influenciou o resultado final.

5.1 Sugestão para um trabalho futuro

Conforme comentado no capítulo anterior, os dados utilizados nesta dissertação foram produzidos em circunstâncias distintas em termos do pessoal envolvido, das metodologias empregadas, dos equipamentos utilizados e das condições atmosféricas durante a realização das medidas. Conseqüentemente, é compreensível que os resultados obtidos apresentem certa variabilidade dependendo do conjunto de dados considerados. Pode-se inferir que o desvio padrão da ordem de 8 dB dificilmente poderá ser reduzido manipulando-se apenas o modelo de cálculo dentro do grau de flexibilidade permitido pelas variáveis envolvidas. Tentativas neste sentido foram realizadas nesta dissertação sem aumentar a precisão do cálculo.

O efeito da não uniformidade dos dados é evidente quando se observa os valores do desvio padrão e do erro médio para cada conjunto. A variação é significativa, o desvio padrão mantém-se em uma faixa de 6 a 12 dB, enquanto o erro médio vai de -10 a +4 dB. O mesmo se observa no caso dos resultados numéricos constantes da documentação do UIT-R. Por exemplo, no caso do modelo Delta-Bullington, a variação estende-se de 5 a 12 dB para o desvio padrão e de +4 a -24 dB para o erro médio.

Em vista de tais considerações torna-se difícil sugerir melhorias para o aprimoramento do modelo de cálculo proposto nesta dissertação. Um procedimento que talvez possa aumentar a precisão seria utilização de soluções do tipo equação integral. Neste contexto, os resultados obtidos por equações integrais do campo elétrico (EFIE) e do campo magnético (MFIE) têm sido particularmente animadores. Por outro lado, contribuindo para o sucesso de tais soluções, deve ser destacada a possibilidade de empregar processamento paralelo nos

cálculos de propagação. Esta facilidade permitirá reduzir de modo substancial o tempo de computação.

Referências Bibliográficas

- [1] ASSIS, M.S. Aplicações da Teoria Matemática da Difração. Série CETUC, caderno 32, PUC/ Rio de Janeiro, março 1979.
- [2] MARCONI, G. Elect. World. Editorial Comment, v. 38, p.1023, Nova Iorque, 1901.
- [3] ZENNECK, J. About the propagation of electromagnetic plane waves along a conductor plane and their relationship to wireless telegraphy. Annalen der Physik, v.23, p. 846-866, setembro 1907.
- [4] SOMMERFELD, A. The Propagation of Waves in Wireless Telegraphy. Annalen der Physik, v. 28, p. 665-736, março 1909.
- [5] WEYL, H. The Propagation of Electromagnetic Waves over a Plane Conduction, Annalen der Physik, v. 60, p. 481-500, novembro 1919.
- [6] WISE, W.H. The Ground Condenser Antenna Radiation Formula. Proceedings of the IRE, v. 19, p. 1684-1689, setembro 1931.
- [7] VAN DER POL, B.; NIESSEN, K.F. The Propagation of Electromagnetic Waves over a Plane Earth. Annalen der Physik, v. 6, p. 273-294, agosto 1930.
- [8] NORTON, K.A. Propagation of Radio Waves over a Plane Earth. Nature, v. 135, p. 954-955, junho 1935.
- [9] WATSON, G.N. The Diffraction of Electric Waves by the Earth. Proc. of the Royal Society, v. 95, p. 83-89, outubro 1918; v. 96, p. 546-563, julho 1919.
- [10] VAN DER POL, B.; BREMMER, H. The Diffraction of Electromagnetic Waves from an Electrical Point Source Round a Finitely Conducting Sphere with Application to Radiotelegraphy and the Theory of Raibow. Philosophical Magazine, 1ª parte, v. 24, p. 141-175, julho 1937; 2ª parte, v. 24, p. 825-864, novembro 1937.
- [11] VAN DER POL, B.; BREMMER, H. The Propagation of Radio Waves over a Finitely Conducting Spherical Earth. Philosophical Magazine, v. 25, p. 817-834, julho 1938.
- [12] VAN DER POL, B.; BREMMER, H. Further Note on the Propagation of Radio Waves over a Finitely Conducting Spherical Earth. Philosophical Magazine, v. 27, p. 261-271, março 1939.
- [13] SCHELLENG, J.C.; BURROWS, C.R.; FERREL E.B. Ultra-Short Wave Propagation. Proceedings of the IRE, v. 21, p. 427-463, março 1933.
- [14] FOCK, V.A. Eletromagnetic Diffraction and Propagation Problems. Pergamon Press, Oxford, v. 1, 1965.

- [15] MATSUO, S. The Method of Calculating VHF Field Intensity and Research on its Variation. The Electrical Communication Laboratory, Ministry of Telecommunications, Tóquio, Japão, agosto 1950.
- [16] RICE, S.O. Diffraction of Plane Radio Waves by a Parabolic Cylinder. Bell System Tech J., v. 33, p. 417-504, março 1954.
- [17] NORTON, K.A.; RICE, P.L.; VOGLER, L.E. The Use of Angular Distance in Estimating Transmission Loss and Fading Range for Propagation through a Turbulent Atmosphere over Irregular Terrain. Proceedings of the IRE, v. 43(10), p. 1488-1526, outubro 1955.
- [18] WAIT, J. R.; CONDA A.M. Diffraction of Electromagnetic Waves by Smooth Obstacles for Grazing Angles. NBS Journal of Research, v. 63D, p. 181-195, outubro 1959.
- [19] DOUGHERTY, H.T.; MALONEY, L.J. Application of Diffraction by a Convex Surface to Irregular Terrain Solutions. NBS Journal of Research, v. 68D, p. 239-250, fevereiro 1964.
- [20] DOUGHERTY, H.T.; WILKERSON, R.E. Determination of Antenna Height for Protection Against Microwave Diffraction Fading. Radio Science, v. 2, p. 161-165, fevereiro 1967.
- [21] UIT-R. Propagation by Diffraction. Recomendação UIT-R P.526-11, Genebra, outubro 2009.
- [22] CRYSDALE, J.H. Comparison of Some Experimental Terrain Diffraction Losses with Predictions Based on Rice's Theory for Diffraction by a Parabolic Cylinder. IRE Transactions on Antennas and Propagation, v. AP-6, p. 293-295, julho 1958.
- [23] NEUGEBAUER, H.E.J.; BACHYNSKI M.P. Diffraction by Smooth Cylindrical Mountains. Proc. IRE, v. 46, p. 1619-1627, setembro 1958.
- [24] FURUTSU, K. A Systematic Theory of Wave Propagation over Irregular Terrain. Radio Science, v.17(5), p.1037-1059, setembro-outubro 1982.
- [25] MILLINGTON, G.; HEWITT, R.; IMMIRZI, F.S. Double Knife-Edge Obstacle on a Conducting Earth. Radio Science, v. 3, p. 1179-1181, dezembro 1968.
- [26] VOGLER, L.E. An Attenuation Function for Multiple Knife-Edge Diffraction. Radio Science, v. 17, p. 1541-1546, novembro-dezembro 1982.
- [27] BULLINGTON, K. Radio Propagation at Frequencies above 30 Megacycles. Proceedings of the IRE, v. 35, p. 1122-1136, outubro 1947.
- [28] EPSTEIN, J.; PETERSON, D.W. An Experimental Study of Wave Propagation at 850 MC. Proceedings of the IRE, v. 41, p. 595-611, maio 1953.
- [29] DEYGOUT, J. Multiple Knife-edge Diffraction of Microwaves. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. AP-14, p. 480-489, julho 1966.

- [30] HUFFORD, G.A. An Integral Equation Approach to the Problem of Wavepropagation over an Irregular surface. *Quarterly Appl. Math.*, v. 9, p. 391-404, janeiro 1952.
- [31] OTT, R.H.; BERRY, L.A. An Alternative Integral Equation for Propagation over Irregular Terrain. *Radio Science*, v. 5, p. 767-771, maio 1970.
- [32] OTT, R.H. An Alternative Integral Equation for Propagation over Irregular Terrain, 2. *Radio Science*, v. 6, p. 429-435, abril 1971.
- [33] HVIID, J.T; ANDERSEN, J.B.; TOFTGÅRD, J.; BØJER, J. Terrain-Based Propagation Model for Rural Area – An Integral Equation Approach. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v.43, p. 41-46, janeiro 1995.
- [34] AKORLI, F.K.; COSTA, E. An Efficient Solution of an Integral Equation Applicable to Simulation of Propagation along Irregular Terrain. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v.49, p. 1033-1036, julho 2001.
- [35] UIT-R. Propagation by Diffraction. Report 715-2, Genebra, outubro 1989.
- [36] RICE, P. L.; LANGLEY, A. G.; NORTON, K. A.; BARSIS, A. P. Transmission Loss Predictions for Tropospheric Communications Circuits. NBS Technical Note 101, v. 2, janeiro 1967.
- [37] KERR .D.E. Propagation of Short Radio Waves. Peter Peregrinus Ltd, 1987, cap. 2.
- [38] ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I.A. Handbook of mathematical functions. Dover Publications, 1972, cap. 10.
- [39] ASSIS, M.S. A Simplified Solution to the Problem of Multiple Diffraction over Rounded Obstacles. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. AP-19, p. 292-295, março 1971.
- [40] DICKSON, F.H.; EGLI, J.J.; HERBSTREIT, J.W.; WICKIZER, G.S. Large Reductions of VHF Transmission and Fading by the Presence of a Mountain Obstacle in Beyond-Line-of-Sight Paths. *Proceedings of the IRE*, v. 41(8), p. 967-969, agosto 1953.
- [41] SOUZA, A.G.; ASSIS, M.S. Radio Wave Propagation over Irregular Terrain. In: *Climatic Parameters and Diffraction Modelling in the Prediction of Radiowave Propagation Characteristics 2003*, Fortaleza, CE, Brasil, novembro 2003.
- [42] ASSIS, M.S.; CERQUEIRA, J. L. R. P. Wave Propagation over Irregular and Inhomogeneous Terrain. In: *Climatic Parameters and Diffraction Modelling in the Prediction of Radiowave Propagation Characteristics 2008*, Boulder, 2008.
- [43] UIT-R. Measurement Data for Improving Recommendation ITU-R P.1812. Document 3K-11, Genebra, maio 2008.
- [44] UIT-R. Comparison of Diffraction Models. Document 3J/175 , Genebra, outubro 2011.

- [45] UIT-R. Prediction Procedure for the Evaluation of Interference between Stations on the Surface of the Earth at Frequencies above about 0.1 GHz. Recomendação UIT-R P.452-14, Genebra, outubro 2009.
- [46] UIT-R. A Path-Specific Propagation Prediction Method for Point-to-Area Terrestrial Services in the VHF and UHF Bands. Recomendação UIT-R P.1812-1, Genebra, outubro 2009.
- [47] UIT-R. Discussion Paper Concerning Recommendation ITU-R P.1812 The Bullington Diffraction Model and its Correction. Document 3K/17, Genebra, maio 2008.
- [48] UIT-R. Proposed Modifications to Recommendation ITU-R P.1812. Document 3K/83, Genebra, maio 2009.
- [49] UIT-R. Proposed Modification to Recommendations ITU-R P.1812 and ITU-R P.452-13 Diffraction Prediction. Document 3J/19, Genebra, maio 2009.
- [50] UIT-R. Proposed Modification to Recommendations ITU-R P.1812 AND ITU-R P.452-13 - Hybrid Diffraction Prediction Method. Document 3J/70, Genebra, maio 2009.
- [51] UIT-R. A Proposal to Modify Recommendation ITU-R P.1812 Diffraction Prediction. Document 3J/120, Genebra, outubro 2010.
- [52] UIT-R. A New Approach to Diffraction Modelling for a General Path - The “Delta” Method. Document 3J/64, Genebra, abril 2009.
- [53] UIT-R. Preliminary Draft New - Recommendation ITU-R P.[WRPM]. Document 3M/124, Genebra, outubro 2010.
- [54] UIT-R. Terrain General Diffraction Model Testing the Delta-Bullington Method – Proposal for Effective Heights. Document 3J/112, Genebra, outubro 2010.

Apêndices

APÊNDICE A – Detalhamento do critério complementar para determinação do obstáculo principal, citado na seção 3.1.1

- a) passo 1 – Identificar a amostra principal, ou seja, aquela com maior relação H/R do percurso.
- b) passo 2 – Identificar as amostras do perfil, potencialmente pertencentes a esse obstáculo principal, à direita da amostra principal do perfil, obtidas através do critério definido na seção 3.1.
- c) passo 3 – Subtrair o valor H (obstrução ou folga), de cada amostra em relação a anterior (amostra à esquerda), de forma a obter as distâncias verticais (ΔH) entre todas as amostras adjacentes do lado escolhido.
- d) passo 4 – Identificar se todos ΔH obtidos são negativos. Nesse caso, todas as amostras do perfil, à direita da amostra principal, formam um declive, e o critério da seção 3.1 é suficiente para determinar se essas amostras fazem parte do obstáculo principal.
- e) passo 5 – Se existirem conjuntos de amostras com ΔH positivos, significa que esses formam um aclave, conforme exemplo apresentado na figura 3.5. Nesse caso, deve-se identificar a última amostra em declive (com ΔH negativo), e medir a distância vertical entre essa e a última amostra em aclave (com ΔH positivo) desse conjunto. Se esse ΔH medido for menor que o raio de Fresnel máximo dessa visada, esse conjunto de amostras está confirmado como pertencente a esse obstáculo principal. Caso contrário, todas as amostras à direita daquela última amostra em declive serão desconsideradas na formação desse obstáculo principal, conforme mostrado no exemplo da figura 3.6.
- f) passo 6 – repetir os passos de 2 a 5 para as amostras do perfil, potencialmente pertencentes a esse obstáculo principal, à esquerda da amostra principal do perfil, obtidas através do critério definido na seção 3.1. Ressaltando que não existe diferença entre iniciar a análise pelas amostras a esquerda ou à direita da amostra principal do percurso.

APÊNDICE B – Descrição dos modelos utilizados para comparação na seção 4.4.2

Neste apêndice são descritos sucintamente os modelos citados no documento 3J/175 da UIT-R [44], e cujos resultados são utilizados para comparação com o modelo desta dissertação.

B.1 Modelo sequência de gumes de faca (*cascaded knife-edge*)

Conforme descrito na seção 4.4.2 da Rec. UIT P.526-11 [21], inicialmente deve-se encontrar a amostra do perfil com maior valor do parâmetro ν , ou seja, maior relação H/R , entre os terminais transmissor (Tx) e receptor (Rx), O parâmetro ν da amostra principal P desse percurso, calculado por (2,78) é denominado ν_p , e a atenuação correspondente, avaliada através da equação (2.79), denominada $J(\nu_p)$. Se $\nu_p > -0,78$ ($H/R > -0,55$) esse procedimento é aplicado mais duas vezes, conforme descrito abaixo:

- a) entre Tx e a amostra principal, obtendo ν_t , e assim $J(\nu_t)$;
- b) entre a amostra principal e Rx, obtendo ν_r , e assim $J(\nu_r)$.

A atenuação total do percurso é dada então por:

$$L = J(\nu_p) + T [J(\nu_t) + J(\nu_r) + C] \quad \text{para } \nu_p > -0,78 \quad (\text{A.1})$$

$$L = 0 \quad \text{para } \nu_p \leq -0,78$$

Onde:

$$C = 10 + 0,04d \quad (\text{A.2})$$

sendo,

d – distância total do enlace (km).

e,

$$T = 1 - \exp[-J(\nu_p)/6] \quad (\text{A.3})$$

Pode-se observar que o procedimento acima, para percursos além do horizonte, é baseado no método Deygout [29] limitado a, no máximo, três obstáculos. Entretanto, para percursos com linha de visada, esse procedimento difere do método Deygout porque a contribuição dos obstáculos das visadas secundárias $Tx-P$ e $P-Rx$, são sempre consideradas quando $J(\nu_p) \neq 0$.

B.2 Modelo Bullington com correção C2

No método de Bullington [27] original, a atenuação causada por um determinado relevo, denominada L_e , é definida pelo modelo gume de faca da equação (2.79), sendo o parâmetro ν , obtido através de (2.78), calculado sobre a amostra do perfil localizada no ponto de Bullington, cuja localização é obtida de acordo com as situações descritas abaixo:

- com linha de visada – o ponto de Bullington equivale a amostra com maior relação H/R do perfil, conforme figura A.1;
- sem linha de vida e com horizontes dos terminais definidos no mesmo ponto – nesse caso, o ponto de Bullington é o ponto de coincidência dos horizontes, conforme figura A.2;
- sem linha de visada com horizontes dos terminais definidos em pontos diferentes – nessa situação, os horizontes de cada terminal são estendidos até se cruzarem, sendo a amostra localizada sob o cruzamento, o ponto de Bullington, conforme a figura A.3.

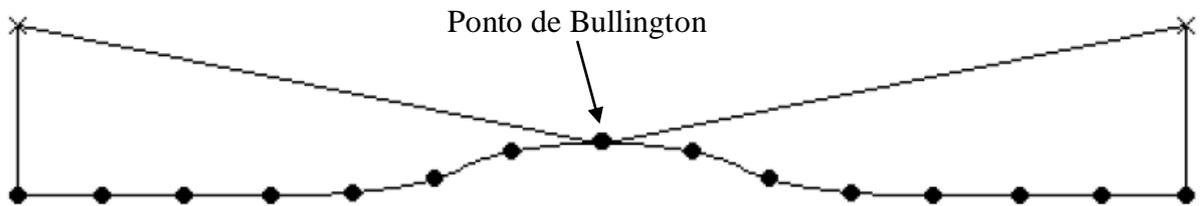


Figura A.1 – Ponto de Bullington para situação com linha de visada.

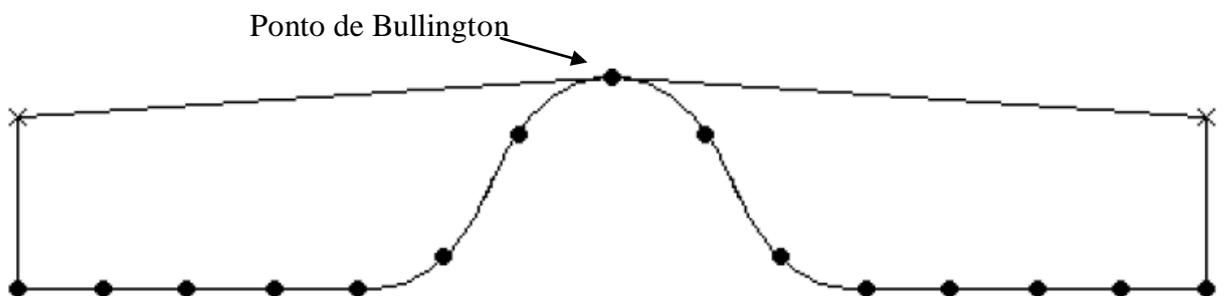


Figura A.2 – Ponto de Bullington para situação sem linha de visada e com horizontes dos terminais definidos no mesmo ponto.

Ponto de Bullington →

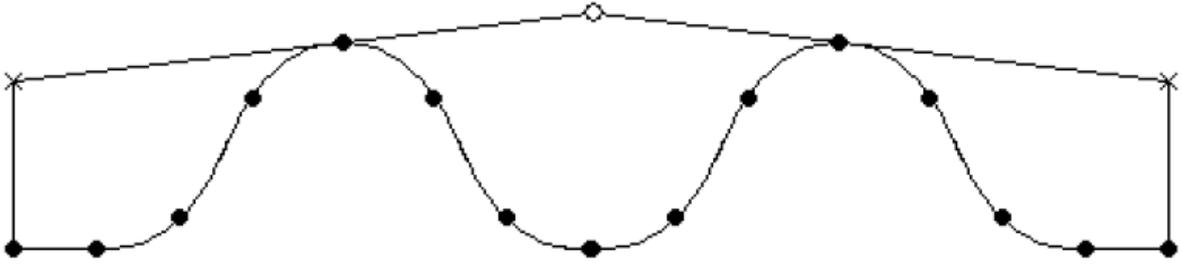


Figura A.3 – Ponto de Bullington para situação sem linha de visada e com horizontes dos terminais definidos em pontos diferentes.

B.2.1 Correção empírica e correção “taper”

A atenuação calculada pelo método Bullington foi posteriormente aprimorada com a inclusão de duas correções, conforme descrito na equação A.4. O primeiro fator do segundo termo é uma correção empírica e o segundo fator é uma correção “taper” para reduzir a correção do primeiro fator suavemente até zero, quando L_e for zero.

$$L_d = L_e + (10 + 0,02d) \cdot (1 - \exp(-L_e/6,03)) \text{ dB} \quad \text{A.4}$$

Onde,

L_d – atenuação pelo método Bullington corrigida;

d – distância total do enlace em km;

L_e – atenuação básica pelo método de Bullington.

B.2.2 Correção C2

O modelo Bullington básico possui um erro médio que aumenta com o tamanho do percurso. Para reduzir esse erro, diversas correções foram propostas. O anexo três do documento 3K/17 da UIT [47] descreve duas correções, sendo que a segunda, chamada de correção C2, apresenta os melhores resultados. O valor de C2, em dB, é determinado através dos parâmetros abaixo.

Se o enlace possui linha de visada, ou seja, se $(d_{sh1} + d_{sh2}) > d$, onde:

$$d_{sh1} = \sqrt{0,002a_e h_{tc}} \quad \text{A.5}$$

$$d_{sh2} = \sqrt{0,002a_e h_{rc}} \quad \text{A.6}$$

$$C2 = \left(1 - \exp\left[\frac{-L_{dsm}}{6}\right]\right) (L_{dst} + L_{dsr} + 0,02d) \text{ (dB)} \quad \text{A.7}$$

Sendo,

h_{tc} / h_{rc} – altura máxima das antenas sobre o nível do mar (m);

d – distância total do enlace em km;

a_e – raio equivalente da Terra;

L_{dsm} – atenuação pelo modelo gume de faca para a posição da terra esférica com maior relação H/R , chamado de ponto principal, dado por:

$$L_{dsm} = J(v_{sm}) \text{ (dB);}$$

onde,

$$v_{sm} = \left[\frac{d_{sm1} \cdot d_{sm2}}{2a_e} - \frac{h_{tc} \cdot d_{sm2} + h_{rc} \cdot d_{sm1}}{1000d} \right] \left[\frac{2000}{\lambda} \left(\frac{1}{d_{sm1}} + \frac{1}{d_{sm2}} \right) \right]^{0,5} \quad \text{A.8}$$

sendo,

d_{sm1} – distância do transmissor ao ponto principal da terra esférica, dada por;

$$d_{sm1} = 0,5 d (1 + b_{sm}) \text{ (km)} \quad \text{A.9}$$

$$b_{sm} = 2 \sqrt{\left(\frac{m_{sm} + 1}{3m_{sm}}\right)} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left[\frac{3c_{sm}}{2} \sqrt{\frac{3m_{sm}}{(m_{sm} + 1)^3}} \right] \right\} \quad \text{A.10}$$

$$m_{sm} = \frac{250d^2}{a_e(h_{tc} + h_{rc})} \quad \text{A.11}$$

$$c_{sm} = \frac{h_{tc} - h_{rc}}{h_{tc} + h_{rc}} \quad \text{A.12}$$

d_{sm2} – distância entre o ponto principal da terra esférica e o receptor, definida por:

$$d_{sm2} = d - d_{sm1} \text{ (km)} \quad \text{A.13}$$

Se $v_{sm} < -0,78$;

$$C2 = 0.$$

L_{dst} – atenuação pelo modelo gume de faca a posição da terra esférica com maior relação H/R , entre o transmissor e ponto principal, chamado de ponto auxiliar do transmissor, dado por:

$$L_{dst} = J(v_{st}) \text{ (dB);}$$

onde,

$$v_{st} = \left[\frac{d_{st1} \cdot d_{st2}}{2a_e} - \frac{h_{tc} \cdot d_{st2} + d_{st1}}{1000d_{sm1}} \right] \left[\frac{2000}{\lambda} \left(\frac{1}{d_{st1}} + \frac{1}{d_{st2}} \right) \right]^{0,5} \quad \text{A.14}$$

sendo,

d_{st1} – distância do transmissor ao ponto auxiliar do transmissor, dada por:

$$d_{st1} = 0,5 d_{sm1} (1 + b_{st}) \text{ (km)} \quad \text{A.15}$$

$$b_{st} = 2 \sqrt{\left(\frac{m_{st} + 1}{3m_{st}}\right)} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left[\frac{3c_{st}}{2} \sqrt{\frac{3m_{st}}{(m_{st} + 1)^3}} \right] \right\} \quad \text{A.16}$$

$$m_{st} = \frac{250d_{sm1}^2}{a_e(h_{tc} + 1)} \quad \text{A.17}$$

$$c_{st} = \frac{h_{tc} - 1}{h_{tc} + 1} \quad \text{A.18}$$

d_{st2} - distância entre o ponto auxiliar do transmissor e o ponto principal da terra esférica, definida por:

$$d_{st2} = d_{sm1} - d_{st1} \text{ (km)}$$

L_{dsr} – atenuação pelo modelo gume de faca para a posição da terra esférica com maior relação H/R , entre o ponto principal da terra esférica e o receptor, chamado de ponto auxiliar do receptor, dado por:

$$L_{dsr} = J(v_{sr}) \text{ (dB)};$$

onde,

$$v_{sr} = \left[\frac{d_{sr1} \cdot d_{sr2}}{2a_e} - \frac{d_{sr2} + h_{rc} \cdot d_{sr1}}{1000d_{sm2}} \right] \left[\frac{2000}{\lambda} \left(\frac{1}{d_{sr1}} + \frac{1}{d_{sr2}} \right) \right]^{0,5} \quad \text{A.19}$$

sendo,

d_{sr1} – distância do ponto principal da terra esférica ao ponto auxiliar do receptor, dada por:

$$d_{sr1} = 0,5 d_{sm2} (1 + b_{sr}) \text{ (km)} \quad \text{A.20}$$

$$b_{sr} = 2 \sqrt{\left(\frac{m_{sr} + 1}{3m_{sr}}\right)} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left[\frac{3c_{sr}}{2} \sqrt{\frac{3m_{sr}}{(m_{sr} + 1)^3}} \right] \right\} \quad \text{A.21}$$

$$m_{sr} = \frac{250d_{sm2}^2}{a_e(h_{rc} + 1)} \quad \text{A.22}$$

$$c_{sr} = \frac{1 - h_{rc}}{1 + h_{rc}} \quad \text{A.23}$$

d_{sr2} - distância entre o ponto auxiliar do receptor e o receptor, definida por:

$$d_{sr2} = d_{sm2} - d_{sr1} \text{ (km)} \quad \text{A.24}$$

Se o enlace não possui linha de visada, ou seja, se $(d_{sh1} + d_{sh2}) \leq d$:

$$C2 = L_{ds1} - L_{ds2} \text{ (dB)} \quad \text{A.25}$$

onde,

$$L_{ds1} = L_{dsm} + \left(1 - \exp\left[\frac{-L_{dsm}}{6}\right]\right) (L_{dst} + L_{dsr} + 10 + 0,04d) \text{ (dB)} \quad \text{A.26}$$

$$L_{ds2} = L_{dsv} + \left(1 - \exp\left[\frac{-L_{dsv}}{6}\right]\right) (10 + 0,02d) \text{ (dB)} \quad \text{A.27}$$

Sendo,

L_{dsv} – atenuação pelo modelo gume de faca para uma determinada posição da terra esférica, chamada de ponto virtual, dado por:

$$L_{dsv} = J(v_{sv}) \text{ (dB)};$$

onde,

$$v_{sv} = \left[\frac{h_{sv}}{1000} - \frac{h_{tc} \cdot d_{sv2} + h_{rc} \cdot d_{sv1}}{1000d} \right] \left[\frac{2000}{\lambda} \left(\frac{1}{d_{sv1}} + \frac{1}{d_{sv2}} \right) \right]^{0,5} \quad \text{A.28}$$

sendo,

h_{sv} – altura da ponto virtual em relação a uma linha reta ligando o nível do entre o transmissor e o receptor, dado por:

$$h_{sv} = h_{tc} + s_1 \cdot d_{sv1} \text{ (m)} \quad \text{A.29}$$

sendo,

d_{sv1} – distância do transmissor ao ponto virtual, dada por:

$$d_{sv1} = \frac{h_{rc} - h_{tc} + s_2 d}{s_1 + s_2} \text{ (km)} \quad \text{A.30}$$

onde,

$$s_1 = \frac{b_{sh1} - h_{tc}}{d_{sh1}} \text{ (m/km)} \quad \text{A.31}$$

$$s_2 = \frac{b_{sh2} - h_{rc}}{d_{sh2}} \text{ (m/km)} \quad \text{A.32}$$

$$b_{sh1} = \frac{500d_{sh1}(d - d_{sh1})}{a_e} \text{ (m)} \quad \text{A.33}$$

$$b_{sh2} = \frac{500d_{sh2}(d - d_{sh2})}{a_e} \text{ (m)} \quad \text{A.34}$$

d_{sv2} - distância entre o ponto virtual e o receptor, definida por:

$$d_{sv2} = d - d_{sv1} \text{ (km)} \quad \text{A.35}$$

B.3 Modelo Delta-Bullington

Esse método foi desenvolvido para obter resultados satisfatórios em qualquer tipo de terreno, cobrindo desde os mais irregulares aos mais lisos. Adicionalmente, não apresenta os problemas usuais das soluções híbridas, como, por exemplo, as discontinuidades. Pode ser utilizado com quaisquer dos modelos, a seguir relacionados, para o cálculo da difração:

- um modelo para terrenos com qualquer grau de irregularidade;
- um modelo para terra esférica formulado para o terreno completamente liso.

A figura A.4 ilustra o princípio do método Delta, que é dividido em três partes:

- na primeira, o perfil do relevo, com todos os parâmetros associados, como frequência e altura das antenas, são inseridos num modelo de análise de difração em terrenos com qualquer grau de irregularidade. A atenuação obtida é chamada de L_{da} ;
- na segunda, um perfil liso, obtido do perfil real sem as informações de altura das amostras, mas com os mesmos parâmetros associados, é inserido no mesmo modelo. As alturas das antenas são as mesmas, colocadas sobre o perfil liso, nas mesmas localizações do perfil real. A atenuação obtida é chamada de L_{ds} ;
- Os parâmetros necessários, incluindo as características elétricas do solo, são introduzidos no modelo de terra esférica. A atenuação obtida é chamada de L_{sph} .

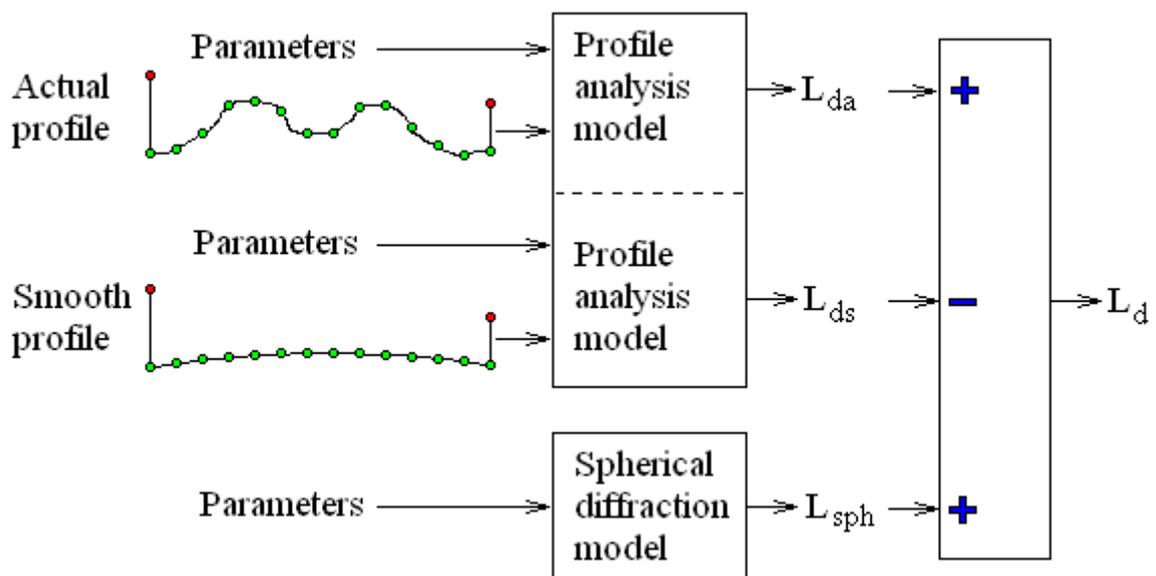


Figura A.4 – Estrutura do método Delta.

A atenuação total é dada então por:

$$L_d = L_{da} - L_{ds} + L_{sph} \quad \text{A.36}$$

No caso especial, onde o perfil real é totalmente liso, os dois primeiros termos da equação A.36 se cancelam. Como resultado $L_d=L_{sph}$, que é o resultado do modelo de terra esférica.

No documento 3J/64 da UIT-R [52], o método Delta foi implementado com o modelo Bullington, para terrenos de qualquer grau de irregularidade, e com o modelo de terra esférica descrito nas seções 3.1.1 e 3.2 da Recomendação P.526-11.