EDNA MARGARITA MELO RAYO

Calibração do Modelo de Propagação de Dois Raios com o Modelo de
Okumura–Hata

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

São Paulo
2017

EDNA MARGARITA MELO RAYO

Calibração do Modelo de Propagação de Dois Raios com o Modelo de
Okumura–Hata

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração: Sistemas
Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Silvio E. Barbin

São Paulo
2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 16 de Janeiro de 2017.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Melo Rayo, Edna Margarita

Calibração do Modelo de Propagação de Dois Raios com o Modelo de Okumura-Hata / E. M. Melo Rayo -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
172 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Propagação Ondas Eletromagnéticas 2.Propagação de Ondas de RF
3.Modelo de propagação de Okumura-Hata 4.Modelo de propagação de dois raios I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Dedicada aos meus entes queridos que sempre estiveram presentes no decorrer deste Mestrado, assim como aqueles que partiram mas fazem parte de mim.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Silvio E, Barbin, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Aos professores Luiz Carlos Kretly e Sergio Takeo Kofuji, pelas sugestões apresentadas no Exame de Qualificação.

Agradeço à minha família por sempre estar ao meu lado, por ser a minha inspiração e a minha força, inclusive nos momentos mais difíceis.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Comunicações e Sinais, Euler, Michel, Jarbas, Robson, Diana, Lucas e Daniel, pela companhia e pelas sugestões.

Aos caros amigos que deram apoio e força durante minha pesquisa e ao Rodrigo, à Renata, à Julia e à Anna que também revisaram meu texto nas edições iniciais, sugerindo correções.

Aos meus amigos em São Paulo, Miguel, Juan, Roberto, Ana, Darlan, Marilda, Carol e Emiliano, pelas experiências vividas nesta bela cidade.

Aos meus amigos em Bogotá, Jorge, Laura, Joana, Paula, Andrea, Nicolas, Sergio e Cristian, e ao meu esposo, Daniel Pitt, que teve a paciência de Santo Jó.

Agradeço a todas as pessoas mencionadas e aquelas, ainda que sem a devida menção, sempre estarão no meu coração pelo encorajamento, pelas orações e por acreditarem nos meus sonhos.

RESUMO

Em telecomunicações é utilizada uma grande variedade de modelos de propagação para prever a intensidade do sinal de recepção num enlace de rádio. Os resultados dos modelos empíricos e dos modelos baseados em simplificações do problema eletromagnético apresentam, em geral, grande discrepância entre si, na análise do fenômeno de propagação. Por exemplo, o modelo de dois raios, que prevê atenuação de enlace com variação de 40 dB/década, na região de campo distante da antena de transmissão, quando colocada a uma certa altura da superfície de um solo condutor perfeito. Já o modelo empírico de Okumura-Hata exhibe, para as mesmas condições geométricas, mas para solo de condutividade finita, uma variação da atenuação de enlace de 30 dB/década. Neste trabalho propõe-se uma calibração do modelo de dois raios para aumentar sua aderência aos resultados obtidos por Okumura-Hata num cenário real na faixa de frequências de 450MHz a 1900MHz para comprimentos de enlace entre 1 km e 20 km. Os resultados obtidos com o modelo proposto são comparados com os obtidos através de outros modelos apresentando boa aderência verificada através de uma comparação numérica particularmente com o modelo Okumura-Hata.

Palavras Chaves: Propagação Ondas Eletromagnéticas, Propagação de Ondas de RF, Modelo de propagação de Okumura-Hata, Modelo de propagação de dois raios.

ABSTRACT

In telecommunications, there is a large variety of propagation models in order to predict the intensity of the receiving signal in a communication link. The empirical models and the models based on simplifications of the electromagnetic problem with theoretically obtained results show, in general, a significant disagreement, for the same propagation phenomenon. For example two-ray model predicts a path-loss of 40 dB/decade in the far-field region of a transmission antenna deployed at a certain height of the surface of a perfect conducting soil. On the other hand, the Okumura-Hata empirical model shows, for the same geometrical conditions, but for a real soil, a path-loss of 30 dB/decade. This work proposes a calibration of the Two-Ray model for better adherence to the results obtained by Okumura-Hata in a real scenario for the frequency range 450MHz to 1900MHz and for a radio link length of 1 km to 20 km. The results obtained with the proposed model are compared with other model results showing good adherence through numeric comparison, in particular with the Okumura – Hata model.

Keywords: Electromagnetic waves propagation, RF propagation, Okumura-Hata propagation model, Two Ray Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sinopse dos modelos de propagação.	20
Figura 2: Intensidade de campo segundo Okumura em função da distância, para 453MHz e 922MHz.	22
Figura 3: Atenuação de enlace no Modelo de Okumura-Hata em função da distância, em comparação com a atenuação no espaço livre, parametrizadas em frequência.	25
Figura 4: Atenuação de enlace no modelo de Okumura-Hata em função da distância, parametrizada em frequência, com alturas h_{te} e h_{re} variáveis, em comparação com a atenuação no espaço livre.....	29
Figura 5: Atenuação de enlace no modelo de Okumura-Hata em função da distância, parametrizada em frequência, para alturas h_{re} e h_{te} variáveis, agrupada em frequências	31
Figura 6: Simulação da atenuação de enlace no modelo de Okumura-Hata[2] em função da distância para diversos tipos de ambiente agrupada em alturas h_{te} variáveis.....	34
Figura 7: Atenuação de enlace no modelo COST-231 HATA em função da distância agrupada em frequências.	38
Figura 8: Atenuação de enlace no modelo COST-231 Hata comparado com o modelo HATA em função da distância, parametrizada com as alturas h_{re} e h_{te}	41
Figura 9: Atenuação de enlace no modelo SUI em função da distância, parametrizada segundo o tipo de terreno e agrupada em frequências.....	50
Figura 10: Atenuação de enlace no modelo SUI comparado com o modelo COST-231 HATA em função da distância, parametrizada segundo o tipo de terreno, agrupada em frequências.	53
Figura 11: Atenuação de enlace no modelo ECC-33 em função da distância, parametrizada em h_b , e agrupada em frequências.....	56
Figura 12: Possibilidades dos percursos tomados pela onda consideradas pelo modelo Walfish-Bertoni.	58

Figura 13: Atenuação de enlace no modelo ECC-33 comparado com o modelo SUI em função da distância, parametrizada segundo o tipo de cidade e alturas h_{re} e h_{te} e agrupada em frequências.....	59
Figura 14: Apresentação dos parâmetros do modelo COST-231 WI.....	64
Figura 15: Atenuação de enlace no modelo COST-231 WI em função da distância, parametrizada em ângulo relativo de incidência e altura h_m , agrupada em frequências.	65
Figura 16: Atenuação de enlace no modelo COST-231WI comparado com o modelo COST-231 Hata em função da distância, parametrizada em ângulo relativo de incidência e altura h_m , agrupada em frequências.....	67
Figura 17: Atenuação de enlace no modelo Ericsson em função da distância, parametrizada em altura h_r , agrupada em frequências.....	72
Figura 18: Atenuação de enlace no modelo dois ângulos em função da distância, parametrizada em frequências.....	75
Figura 19: Atenuação de enlace no modelo <i>dual slopes</i> comparado com o modelo de Okumura-Hata, parametrizadas em frequências.....	76
Figura 20: Comparação da atenuação dos modelos apresentados em função da distância, parametrizada para diferentes ambientes e alturas h_{re} 1,5m e h_{te} 30m, agrupada em frequências.	78
Figura 21: Comparação da atenuação nos modelos apresentados em função da distância, parametrizada para diferentes ambientes e alturas h_{re} 3m e h_{te} 30m, agrupada em frequências.	82
Figura 22: Comparação da atenuação nos modelos apresentados em função da distância, parametrizada para diferentes ambientes e alturas h_{re} 1,5m e h_{te} 70m, agrupada em frequências.	86
Figura 23: Comparação da atenuação nos modelos apresentados em função da distância, parametrizada para diferentes ambientes e alturas h_{re} 3m e h_{te} 70m, agrupada em frequências.	90
Figura 24: Apresentação dos parâmetros do modelo de dois raios.	95
Figura 25: Exemplo de curva da intensidade do campo no modelo de dois raios....	97
Figura 26: Coeficiente de transmissão em função do ângulo de incidência parametrizado em permissividade na frequência de 900MHz.	99

Figura 27: Coeficientes de reflexão e transmissão em função do ângulo de incidência, para frequências 900MHz e 1800MHz com espessura $w=20\text{cm}$ e $\epsilon_r = 4,44$...	100
Figura 28: Comparação do coeficiente de reflexão em função do ângulo, parametrizada em espessura do material.	102
Figura 29: Comparação do componente real do coeficiente de reflexão em função do ângulo, parametrizada em espessura do material.	103
Figura 30: Comparação dos coeficientes de reflexão de [33] e do modelo de impedância em função do ângulo de incidência, parametrizado em espessura do material.	109
Figura 31: Coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência parametrizado em frequência, em polarização e em espessura, agrupado por tipo de material.	112
Figura 32: Coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência, parametrizado em polarização e tipo de solo.....	119
Figura 33: Coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência parametrizado em polarização e tipo de solo em 900MHz.	120
Figura 34: Atenuação do enlace no modelo de dois raios comparado com o modelo modificado em função da distância, parametrizada em tipo de solo e agrupada em polarização e altura h_{te}	121
Figura 35: Atenuação de enlace no modelo <i>dual slopes</i> comparado com o modelo modificado de dois raios em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em frequências.	124
Figura 36: Comparação do modelo proposto com o modelo de Hata em função da distância, parametrizada em tipo de solo, e agrupada em frequência.	125
Figura 37: Erro entre o modelo proposto e o modelo de Okumura-Hata em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em altura h_{re} , h_{te} e frequência.	127
Figura 38: Distribuição de corrente para o modelo proposto na segunda modificação.	134
Figura 39: Atenuação de enlace da segunda versão do modelo modificado comparado com o modelo de Okumura-Hata e o Erro em função da distância, parametrizada em tipo de solo agrupado em frequências e altura. $h_e=0$ e $h_s=2*h_{te}$	135

Figura 40: Atenuação de enlace da segunda versão do modelo modificado com distribuições com maior número de discretizações comparado com o modelo de Okumura-Hata, e o erro em função da distância, parametrizada em tipo de solo agrupado em frequências e altura. $h_e \leq 0$ e $h_s \geq h_{te}$	145
Figura 41: Atenuação de enlace da segunda versão do modelo modificado com distribuições com maior número de discretizações comparado com o modelo de Okumura-Hata, e o erro em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em frequências e altura. $h_e = 0$ e $h_s \geq h_1$	149
Figura 42: Atenuação de enlace do modelo modificado otimizado para a faixa de frequência de trabalho comparado com o modelo de Okumura-Hata, e o erro em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em frequência e altura.	151
Figura 43: Comparação da atenuação de enlace do modelo modificado otimizado para a faixa de frequência de trabalho comparado com o modelo de Okumura-Hata, Cost231 Hata e Cost231 WI, em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em frequência e altura.	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-1 - Classificação de parâmetros segundo o tipo de terreno para o modelo SUI.....	49
Tabela 2.1-2 - Constantes para o modelo Ericsson	71
Tabela 2.2-1 - Comparação dos modelos de propagação	77
Tabela 3.2-1 - Valores medidos das características elétricas para os diferentes tipos de solo.	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LOS	Linha de visada <i>(Line of Sight)</i>
ERB/BS	Estação rádio base <i>(Base Station)</i>
PL	Atenuação de enlace. <i>(Path Loss)</i>
AEEL/FSPL	Atenuação de enlace no espaço livre <i>(Free Space Path Loss)</i>
TE	Modo transversal elétrico <i>(Transversal Electric Mode)</i>
TM	Modo transversal magnético <i>(Transversal Magnetic Mode)</i>
OEM	Onda eletromagnética
MPP	Propagação por múltiplos percursos <i>(Multipath propagation)</i>
Z	Impedância
O – H	Modelo de Okumura-Hata

LISTA DE SIMBOLOS

$\vec{E}$	Vetor intensidade de campo elétrico (V/m)
$\vec{H}$	Vetor intensidade de campo magnético (A/m)
$\vec{D}$	Vetor densidade de fluxo elétrico (C/m ²)
$\vec{B}$	Vetor densidade de fluxo magnético (C/m ²)
ϵ_r	Permissividade relativa
ϵ_0	Permissividade no vácuo, 8,854 pF/m
μ_r	Permeabilidade relativa
μ_0	Permeabilidade no vácuo $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)
η	Impedância intrínseca
λ	Comprimento de onda (m)
$\vec{k}$	Vetor direção de propagação de onda
v	Velocidade de fase
c	Velocidade da luz no vácuo $2,99 \times 10^8$ (m/s)
β	Constante de defasagem
Γ	Coeficiente de reflexão
ω	Frequência angular
τ	Coeficiente de transmissão
θ_i	Ângulo de incidência
j	Unidade imaginária $\sqrt{-1}$
∇^2	Operador laplaciano
$\nabla \cdot$	Operador produto escalar
$\nabla \times$	Operador rotacional

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
INTRODUÇÃO	15
1.1. <i>Objetivos</i>	16
1.1.1 Principal.....	16
1.1.2 Específicos	16
1.2. <i>Justificativa</i>	17
1.3. <i>Metodologia</i>	18
CAPÍTULO 2	19
COMPARAÇÃO DOS MODELOS EMPÍRICOS DE ATENUAÇÃO DE ENLACE.....	19
2.1. <i>Modelos de propagação estudados</i>	19
2.1.1 Modelo de Okumura	21
2.1.2 Modelo de Okumura-Hata	24
2.1.3 Modelo COST-231 Hata	37
2.1.4 Modelo Stanford University Interim (SUI)	49
2.1.5 Modelo Hata Estendido ou ECC-33.....	55
2.1.6 Modelo COST-231-Walfish-Ikegami	58
2.1.7 Modelo Ericsson	71
2.1.8 Modelo de dupla inclinação em inglês <i>dual – slopes</i>	74
2.2. <i>Comparação dos modelos de PL</i>	77
2.3. <i>Conclusões</i>	94
CAPÍTULO 3	95
PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO DE DOIS RAIOS	95
3.1. <i>Testes preliminares</i>	98
3.2. <i>Testes para tipos de solo</i>	118
3.3. <i>Primeira Modificação do modelo de dois raios</i>	118
3.4. <i>Segunda Modificação do modelo de Dois Raios</i>	133
3.5. <i>Comparação com outros modelos</i>	163
3.6. <i>Conclusões</i>	163
CAPÍTULO 4	165
DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....	165
REFERÊNCIAS	167

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A modelagem de sistemas de telecomunicações particularmente para os modelos empíricos da intensidade do sinal num enlace de rádio continua a ser um tópico importante na engenharia, para o planejamento, a implementação e o desenvolvimento das redes *wireless*, por atingir características de escalabilidade, ótimo desempenho, médio ou baixo requisito de processamento, baixo custo, dentre outros. Cada um desses modelos empíricos apresenta vantagens e desvantagens que devem ser utilizadas sob considerações específicas. Em quanto, os modelos determinísticos resolvem as equações de Maxwell para situações específicas, com alta requisito de processamento e alto custo.

Um dos modelos empíricos mais relevantes e utilizados em geral, e nesta pesquisa como referencial de comparação é o modelo de Okumura-Hata, que apresenta dados coletados por Okumura [1] na cidade de Tóquio em banda estreita na faixa de frequência de 450MHz a 1900MHz, utilizando uma antena receptora montada no teto de uma van, e estando a antena transmissora disposta nas torres de dois prédios, sendo o modelo precursor dos modelos empíricos práticos. Por sua vez, Hata conseguiu, posteriormente empregando o método dos mínimos quadrados obter uma curva da atenuação de enlace em função da frequência, das alturas das antenas e da distância entre a Estação Base (ERB) e o receptor, com resultados na variação da atenuação do enlace de 30 dB/década. O modelo é definido sem fundamentação

analítica para o fenômeno de propagação. No entanto, este modelo empírico tem-se mostrado ser extremamente útil para várias aplicações [2].

Existem outros modelos, com fundamento teórico, como o modelo de dois raios, que basicamente considera duas ondas chegando no receptor, a primeira correspondente ao raio da linha de visada direta, e a segunda ao raio que chega ao receptor por reflexão no solo, modelado como um condutor perfeito. Isso implica um comportamento de 40 dB/década no declive da atenuação do enlace.

Assim é, que o modelo de Okumura-Hata e o modelo de dois raios distam no espectro de modelos de propagação eletromagnética, propondo uma grande questão científica da diferença entre os modelos com fundamento teórico e os modelos empíricos práticos. Para mostrar as vantagens e desvantagens dos diferentes modelos empíricos de propagação são comparados segundo a atenuação de enlace a fim de se avaliar as condições de aplicabilidade e suas limitações, também, discute-se e questiona-se a proximidade do modelo teórico de dois raios com os dados empíricos proporcionados por Okumura e Hata, finalmente propõe-se um modelo empírico – teórico com fundamento no modelo de dois raios, gerando uma distribuição de corrente da fonte imagem para calibrar o comportamento do modelo de dois raios.

O paper submetido para a conferencia ICAT -2015 com título “Two Ray Based Propagation Model proposal tuned with HATA model for 450MHz to 1900MHz” foi aceito, como resultado parcial da pesquisa, daí que, expõe-se possíveis estudos futuros que esta dissertação pode gerar.

.

1.1. Objetivos

1.1.1 Principal

Calibrar o modelo de dois raios visando obter resultados próximos aos do modelo de Okumura-Hata na faixa de frequência de 450MHz a 1900MHz, para comprimentos de enlace de 1 km a 20 km.

1.1.2 Específicos

- Comparar modelos empíricos de propagação eletromagnética tais como, o modelo de Okumura–Hata, o modelo SUI, o modelo ECC-33, o modelo COST-

231 WI, e o modelo dois ângulos. Avaliar a diferença entre os modelos e analisar os erros.

- Comparar os resultados obtidos pelo modelo de dois raios modificado com os obtidos com o modelo de referência de Okumura-Hata. Avaliar as diferenças e analisar os erros.

1.2. Justificativa

As redes *wireless* têm sido utilizadas há décadas e sua utilização ainda cresce dia a dia. As comunicações de rádio, tais como radiodifusão de TV, Bluetooth, PCS (*Personal Communication System*), roteadores domésticos e redes ad-hoc têm invadido o cotidiano doméstico, comercial e pessoal de um modo geral.

Um exemplo disso é o crescimento constante do número de usuários de telefonia móvel. Como revelam várias fontes bibliográficas [3, 4, 5, 6, 7], 95% da população mundial possui atualmente um aparelho celular e 50% é de usuários de serviços 3G e 4G. O Brasil encontra-se entre os dez países com maior número de usuários. As frequências utilizadas têm variado desde a faixa entre 450 MHz e 900 MHz, utilizada para telefonia móvel e rádio navegação no Brasil [8], 700 MHz até 2.600 MHz, para LTE [9], ou 11 GHz para o padrão IEEE 802.16 [10]. Embora a designação das frequências é própria de cada país [11, 12], a globalização e industrialização dos países tem um efeito de standardização especialmente quando falar de tecnologia, daí, que a faixa de frequências entre 450MHz e 2600MHz tem grande importância.

O planejamento, a manutenção e a melhora de uma rede de rádio dependerão da informação do comportamento do sinal no local, assim como, das características do mesmo, também deverão ser de baixo custo e flexível a possíveis mudanças no ambiente.

Há grandes discrepâncias entre os modelos teóricos e empíricos, e esta é uma das grandes motivações assim como a referência [13]. Alguns modelos por não contar com toda a informação de procedimento das medidas, ou por ter faixas de frequência dispares, entre outros muitos parâmetros a serem considerados. Neste contexto, este trabalho de pesquisa pretende definir as condições para aplicar o modelo proposto de maneira a obter melhores resultados, visando uma aproximação de um modelo modificado que se aproxima com os resultados de um modelo empírico.

1.3. Metodologia

A metodologia utilizada nesta pesquisa contempla três fases: na primeira foi realizado um estudo aprofundado dos modelos de atenuação na propagação eletromagnética, sua utilização e suas limitações, assim como também uma análise das medidas obtidas e apresentadas na literatura.

Foram selecionados os modelos empíricos mais relevantes, para serem comparados, sob certas condições específicas.

Para comparar quantitativamente os modelos empíricos, foi preciso elaborar um código fonte no software MATLAB®, amplamente utilizado em estudos científicos. [14, 15] Posteriormente, foram comparados os resultados obtidos nas simulações com resultados de outros estudos.

Na segunda fase formulou-se a hipótese da modificação do modelo de dois raios. A comprovação foi feita mediante simulações também no software MATLAB®, comparando os resultados por inspeção.

Finalmente, o modelo modificado foi comparado com o modelo de Okumura–Hata e foram analisadas as diferenças.

Capítulo 2

COMPARAÇÃO DOS MODELOS EMPÍRICOS DE ATENUAÇÃO DE ENLACE

2.1. Modelos de propagação estudados

Os modelos empíricos de propagação são oriundos de dados e medidas realizadas em cenários reais. Esses modelos utilizam em geral o atraso na propagação, a posição das estações de transmissão e recepção, a elevação e a distância dentre outras variáveis. Os modelos empíricos são amplamente usados em projetos de rádio enlaces e utilizam medidas da potência recebida em banda estreita por uma estação móvel em função de sua distância a uma estação fixa.

Os modelos determinísticos baseiam-se na determinação analítica ou numérica do campo elétrico recebido, por solução das equações de Maxwell aplicadas ao problema em questão. Para resolver problemas de propagação, é preciso um conjunto de informações específicas do local como, por exemplo, as formas e os materiais que constituem os obstáculos. Esses modelos determinísticos demandam processamento computacional elevado e são pouco escaláveis.

A Figura 1 apresenta uma sinopse dos diferentes modelos de propagação atualmente existentes. Nela, os modelos utilizados neste trabalho encontram-se destacados.

Diversos modelos empíricos são analisados e seus desempenhos são apresentados a seguir.

Figura 1: Sinopse dos modelos de propagação.

Fonte: SARKAR (2003) [16]

A seguir serão apresentados os modelos empíricos de maior importância, serão comparados, e avaliaremos as vantagens e desvantagens entre eles.

2.1.1 Modelo de Okumura

O modelo de Okumura é um modelo precursor dos modelos empíricos, daí a sua importância. Este modelo foi concebido por Okumura na cidade de Tóquio no Japão, onde as medidas foram realizadas. Foram coletados dados em duas fases: a primeira, no centro da cidade com um transmissor de 1kW (ERP) posicionado de 10 m e a 1.000 m de altura para uma região de terreno plano; na segunda, foi selecionada uma rota com colinas e ladeiras. Em ambas as fases foram escolhidas quatro frequências diferentes e polarização vertical para a onda eletromagnética, conforme mostrado a seguir.

- Primeiro teste: 453MHz, 922MHz, 1310MHz e 1920MHz
- Segundo teste: 453MHz, 922MHz, 1317MHz e 1430MHz.

Utilizaram-se duas antenas receptoras no teto de um veículo, a 1,5m e a 3m de altura. O veículo viajava geralmente a 30 km/h, porém, quando haviam irregularidades no caminho, a velocidade era diminuída para 15 km/h.

Este modelo denomina uma região plana como terreno “*quasi-smooth*”, ou seja, quase suave; isto significa que não há uma diferença de altura maior que 20m, tanto para cima como para baixo em relação à altura média do terreno. Os terrenos que não correspondem a esta característica são considerados irregulares, e estão divididos em “*rolling hilly terrain*” ou terreno montanhoso, “*isolated mountain*” ou terreno com montanha isolada, “*general sloping terrain*” ou terreno inclinado geral e “*mix land sea path*” ou região mista de terra e água.

Também, foram classificados os tipos de áreas na cidade. Para isto, dividiu-se o modelo para áreas abertas, suburbanas e urbanas, as primeiras com pouca presença de árvores altas, prédios ou outros obstáculos, por mais de 400m. Já em áreas suburbanas, há prédios e casas, alguns carros, avenidas e árvores, que causam espalhamento. Esse tipo de área não apresenta muito adensamento de obstáculos, nem é muito congestionado. Já as áreas urbanas são repletas de grandes prédios, árvores e casas, dentre outros obstáculos.

Na Figura 2, são mostrados os dados apresentados em [1] por tipo de área urbana para frequências de 453MHz e 922MHz. Nos gráficos dessa figura, são também apresentadas curvas médias dos dados que aparecem representados ao seu redor.

Figura 2: Intensidade de campo segundo Okumura em função da distância, para 453MHz e 922MHz.

Fig. 10 (a) 453 MHz

Fig. 10 (b) 922 MHz

Fonte: OKUMURA (1968) [1]

Nessas condições, foram determinadas as equações das curvas que modelam o comportamento da intensidade de campo elétrico recebido em função da distância, para uma potência efetivamente radiada de 1KW. O modelo para zona urbana quase suave resulta em

$$E_{mu} = E_{fs} - A_{mu}(f, d) + H_{tu}(h_{te}, d) + H_{ru}(h_{re}, f) - G_{AREA} \quad (1)$$

onde, E_{mu} é a intensidade média do campo para zonas quase suaves e urbanas; E_{fs} é a intensidade do campo no espaço livre; $A_{mu}(f, d)$ é a atenuação média, em função da frequência, f , e da distância, d , para h_{te} 200m, e h_{re} 3m. Os fatores $H_{tu}(h_{te}, d)$ e $H_{ru}(h_{re}, f)$ são os fatores de correção para as alturas da antena de transmissão, h_{te} , e recepção, h_{re} , respectivamente. Finalmente, G_{AREA} é um ganho atribuído para o tipo de área.

Nas equações apresentadas,

$$G(h_{te}) = 20 \log\left(\frac{h_{te}}{200}\right) \quad 1000m > h_{te} > 30m \quad (2)$$

$$G(h_{re}) = \begin{cases} 10 \log\left(\frac{h_{re}}{3}\right) & h_{te} < 3m \\ 20 \log\left(\frac{h_{re}}{3}\right) & 10m > h_{re} > 3m \end{cases} \quad (3)$$

Fonte: OKUMURA (1968) [1]

2.1.2 Modelo de Okumura-Hata

Este modelo é resultado de uma análise estatística multivariada dos dados coletados por Okumura [2]. Dessa análise resulta, para a atenuação de enlace

$$L(dB) = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log R \quad (4)$$

onde, f_c é a frequência em MHz que pode variar entre 150MHz e 1500MHz, com limites no modelo que fazem variar o valor de $a(h_{re})$, pois tem uma frequência de trabalho, f_M , e h_{re} e h_{te} são as alturas da antena receptora e transmissora em metros, onde h_{te} está na faixa de 30m até 200m, R é a distância entre o transmissor e o receptor, entre 1 e 20 km. Finalmente, $a(h_{re})$ é o fator de correção da altura do receptor, sendo que para $h_{re}=1,5m$ será 0 dB.

Para grandes cidades tem-se:

$$a(h_{re}) = \begin{cases} 8,29(\log 1,54h_{re})^2 - 1,10 & f_M \leq 200MHz \\ 3,2(\log 11,75h_{re})^2 - 4,97 & f_M \geq 400MHz \end{cases} \quad (5)$$

Para cidades médias tem-se:

$$a(h_{re}) = (1,1 \log f_M - 0,7)h_{re} - (1,56 \log f_M - 0,8) \quad (6)$$

Finalmente, os fatores de correção para zonas suburbanas e abertas são os seguintes:

$$L_{ps} = L_p\{Zonas Urbanas\} - 2(\log_{10} f_c/28)^2 - 5,4 \quad (7)$$

$$L_{po} = L_p\{Zonas Urbanas\} - 4,78(\log_{10} f_c)^2 + 18,33 \log_{10} f_c - 40,94 \quad (8)$$

onde L_{ps} é a atenuação da potência para cidades suburbanas, L_{po} para espaços abertos, e L_p é o valor referencial do modelo, quando aplicado a cidades urbanas. Validando-se o modelo, obtém-se os resultados a seguir:

Figura 3: Atenuação de enlace no Modelo de Okumura-Hata em função da distância, em comparação com a atenuação no espaço livre, parametrizadas em frequência.

Fig. 9. Propagation loss in an urban area (1).

Fig. 10. Propagation loss in an urban area (2).

Fonte: HATA (1980) [2]

Na Figura 3, o primeiro gráfico apresenta o modelo de Hata [2] para as frequências de 1900MHz, 1500MHz, 900MHz, 450MHz e 150MHz com uma altura da ERB de 70m e 1,5m no receptor; no segundo gráfico vê-se uma comparação com a atenuação do enlace no espaço livre (AEEL), que são as linhas pontilhadas da mesma cor, com as mesmas condições. Fica evidente que a principal característica do modelo é o coeficiente angular de 30 dB/década. O segundo gráfico da figura 3 apresenta a curva optida das equações suministrada por Hata no modelo, onde é visível que a curva não apresenta o comportamento de mudança no declive para valores maiores de 20Km de distância de enlace.

Os testes do modelo de Okumura–Hata podem ser sumarizados em três tipos de variáveis. O comportamento da atenuação do enlace modifica de acordo com a

frequência, a altura da ERB, a altura do receptor, as diferentes zonas e a distância de enlace.

Na Figura 4, a linha pontilhada é a curva da atenuação no espaço livre, a linha continua é o modelo para grandes cidades e a linha tracejada é para as áreas suburbanas. Delas pode-se concluir que há uma grande similaridade do modelo entre grandes cidades e cidades médias, a exceção de valores maiores da altura da ERB, há um *offset* que acrescenta ao acrescentar a altura do receptor e a frequência.

No primeiro gráfico da figura 4 apresenta-se o comportamento para uma altura da ERB de 30m, e no segundo para uma altura ERB de 70dB. Pelos marcadores, podemos visualizar que o declive está ao redor dos 30dB/década até 34dB/década.

Para verificar melhor esse efeito, são mostradas na figura 5, as curvas de atenuação de enlace, agrupadas por frequências.

Figura 4: Atenuação de enlace no modelo de Okumura-Hata em função da distância, parametrizada em frequência, com alturas h_{te} e h_{re} variáveis, em comparação com a atenuação no espaço livre.

hte70 m

Figura 5: Atenuação de enlace no modelo de Okumura-Hata em função da distância, parametrizada em frequência, para alturas h_{re} e h_{te} variáveis, agrupada em frequências

Na Figura 5, faz uma melhor diferenciação do comportamento, em especial entre grandes e médias cidades, para alturas no ERB maiores. Na figura 5 e diante, GC representa as grandes cidades e CM representa as cidades médias.

Também se mostrou a linha continua para cidades grandes e os “+” mostraram o comportamento para cidades médias. Finalmente um resumo da classificação das cidades e o comportamento.

Sobre os primeiros gráficos da figura 5, para uma altura da ERB podemos ver um declive de 35.23dB/década, e diferença de *offset* de até 15dB para as alturas de receptor e frequências maiores. Para o segundo gráfico vemos um declive de 32.81dB/década com o mesmo *offset*.

Das curvas da figura 6 cabe estabelecer que todas comportam-se com um declive ao redor de 30 dB/ década, assim como confirmado em [13]. Também, evidencia uma perda maior para cidades grandes e intermediárias, do que nas áreas suburbanas e nas rurais. As cores azul, verde, vermelho e ciano correspondem com as frequências 450MHz, 900MHz, 1500MHz e 1900MHz, respetivamente.

Para valores de hte e hre 30m e 3m respetivamente o declive para todas as áreas é de 35.22 dB/década e um *offset* de até 35dB para zonas rurais em comparação com cidades médias. Quando a altura hte aumentar a 70m ou 100m, o declive diminui até 32,81dB/década e 31,8dB/década, com os mesmos *offsets* dos valores de alturas primeiras. As diferenças de *offset* entre os tipos de áreas são maiores para valores de frequência maior.

Figura 6: Simulação da atenuação de enlace no modelo de Okumura-Hata[2] em função da distância para diversos tipos de ambiente agrupada em alturas h_{te} variáveis.

2.1.3 Modelo COST-231 Hata

O grupo COST-231 gerou, posteriormente, um modelo baseado no modelo de Okumura-Hata para frequências na faixa de 1,5GHz a 2GHz [17]:

$$L(dB) = 46,3 + 33,9 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log R + C_m \quad (9)$$

$$a(h_{re}) = \begin{cases} (1,1 \log f - 0,7)h_{re} - (1,56 \log f - 0,8) & \text{SubUrb e Rurais} \\ 3,2(\log 11,75h_{re})^2 - 4,97 & \text{Urbanas} \end{cases} \quad (10)$$

onde, C_m é o fator de correção definido com um valor de 0 dB para cidades de médio porte e áreas suburbanas e, 3 dB para centros metropolitanos [17] [18]. Esse modelo tem as seguintes restrições de operação:

$$\begin{aligned} 1500MHz \leq f \leq 2000MHz & \qquad 1m \leq h_{re} \leq 10m \\ 30m \leq h_{te} \leq 200m & \qquad 1Km \leq R \leq 20Km \end{aligned}$$

Este modelo pode ser utilizado para grandes e pequenas macro células. Já para micro células o modelo de Okumura-Hata convencional deve ser utilizado.

Ainda com uma faixa um pouco acima da frequência de trabalho do modelo de Okumura-Hata (até 1900MHz), o modelo pode ser aplicado para cidades médias e grandes cidades, pois é o menos discrepante quanto o modelo COST-231 (até 2000MHz), como está na figura 8.

Este modelo, como já foi mencionado, apresenta um declive de 35,22dB/década, 32,81dB/década e 31,8 dB/década na atenuação para 30m, 70m e 100m respetivamente, de forma similar ao modelo de Okumura-Hata, inclusive para uma frequência maior, porém, menos variante segundo a frequência. Há um *offset*, ou nível de deslocamento, quando proporcional com a altura da ERB e a frequência, o erro é maior para zonas suburbanas e áreas abertas de até 35 dB.

Figura 7: Atenuação de enlace no modelo COST-231 HATA em função da distância agrupada em frequências.

hte70m

hte100m

Figura 8: Atenuação de enlace no modelo COST-231 Hata comparado com o modelo HATA em função da distância, parametrizada com as alturas h_{re} e h_{te} .

Modelo COST-231 Hata Vs Hata para Cidades Grandes com hte30m

Modelo COST-231 Hata Vs Hata para Áreas Suburbanas com hte30m

Modelo COST-231 Hata Vs Hata para Áreas Abertas com hte30m

Modelo COST-231 Hata Vs Hata para Cidades Grandes com hte70m

Modelo COST-231 Hata Vs Hata para Cidades Médias com hte70m

Modelo COST-231 Hata Vs Hata para Áreas Suburbanas com hte70m

Modelo COST-231 Hata Vs Hata para Áreas Abertas com hte70m

2.1.4 Modelo Stanford University Interim (SUI)

Modelo desenvolvido pela Universidade de Stanford para frequências de até 11GHz. É utilizado para MMDS (*Multipoint Microwave Distribution System*) em 2,5 GHz até 2,7GHz [19, 20, 21].

A altura da ERB, h_{br} , é definida entre 10 m e 80 m, a altura do receptor, h_r , é definida entre 2 m e 10 m e o raio da célula está entre 0,1 km e 8 km. Não há uma definição de ambiente específico, porém, há três tipos de terreno: “terreno A”, utilizado para áreas com colinas e vegetação densa “terreno B”, utilizado para áreas com colinas e vegetação rara, ou áreas planas com vegetação densa e, finalmente, “terreno C”, onde se considera áreas planas com pouca vegetação. A atenuação é dada por:

$$L(dB) = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s \quad d > d_0 \quad (11)$$

onde d é a distância entre a ERB e o receptor, d_0 é 100m, X_f é o fator de correção para frequência superior a 2GHz, X_h é o fator de correção da altura do receptor, s é o fator de correção do *shadowing* ou sombreamento, que se comporta como uma distribuição normal com valores entre 8,2 dB e 10,6 dB e finalmente, γ é o expoente de perda.

$$\begin{aligned} A &= 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \\ X_f &= 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \\ X_h &= \begin{cases} -10,8 \log\left(\frac{h_r}{2000}\right) & TA \text{ e } TB \\ -20,0 \log\left(\frac{h_r}{2000}\right) & TC \end{cases} \\ \gamma &= a - bh_b + \frac{c}{h_b} \end{aligned} \quad (12)$$

Tabela 2.1-1 - Classificação de parâmetros segundo o tipo de terreno para o modelo SUI.

Parâmetro	Terreno A	Terreno B	Terreno C
a	4,6	4,0	3,6
b(m ⁻¹)	0,0075	0,0065	0,005
c (m)	12,6	17,1	20

Fonte: ERCEG (2001) [19]

Para este caso específico encontraram-se grandes discrepâncias com os modelos anteriores.

Figura 9: Atenuação de enlace no modelo SUI em função da distância, parametrizada segundo o tipo de terreno e agrupada em frequências.

hte de 70m

hte100m

Figura 10: Atenuação de enlace no modelo SUI comparado com o modelo COST-231 HATA em função da distância, parametrizada segundo o tipo de terreno, agrupada em frequências.

Modelo SUI Vs COST-231 Hata com hte70m

CHLC hre1.5 CHLC hre3 CHSC hre1.5 CHSC hre3 LA hre1.5 LA hre3 LB hre1.5 LB hre3 LC hre1.5 LC hre3 AEEL

Em especial para este caso, o declive da atenuação é maior, e para os coeficientes A e B existe uma distância de até 20 dB/década, o declive não é proporcional com a altura do receptor e a frequência, porém, quanto menor a altura da ERB maior será o erro no declive. O coeficiente C aproxima-se aos resultados esperados. Foi mostrado que a faixa frequência de trabalho é diferente, assim como, a faixa de distância.

2.1.5 Modelo Hata Estendido ou ECC-33

Depois da recomendação ITU-R Recommendation P.529 [22], estendeu-se o modelo de Okumura-Hata até 3,5GHz. Está postulado como a seguir:

$$\begin{aligned}
 PL &= A_{fs} + A_{bm} - G_b - G_r \\
 A_{fs} &= 92,4 + 20 \log d + 20 \log f \\
 A_{bm} &= 20,41 + 9,83 \log d + 7,894 \log f + 9,56(\log f)^2 \\
 G_b &= \log\left(\frac{h_b}{200}\right) [13,958 + 5,8(\log d)^2] \\
 G_r &= \begin{cases} [42,57 + 13,7 \log f][\log h_r - 0,585], & \text{cidades de médio porte} \\ 0,759h_r - 1,862, & \text{cidades maiores} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{13}$$

A_{fs} é a atenuação no espaço livre, A_{bm} é a perda média, G_b e G_r fator de correção pela altura da ERB e o receptor respectivamente. Este modelo está baseado no modelo SUI modificado em [19], o qual estuda os tipos de regiões, assim como, a porcentagem de *shadowing*, esta última segundo o modelo estatístico em [22]. Também, cabe notar que o tamanho da macro-célula medida é menor. Na figura 11 as curvas obtidas.

Este modelo foi comparado com o modelo SUI para ter uma faixa de frequência comum.

Figura 11: Atenuação de enlace no modelo ECC-33 em função da distância, parametrizada em hb, e agrupada em frequências.

hte de 70

Pela faixa de frequência de operação, o modelo será comparado com o modelo SUI como na figura 13. A diferença entre os dois modelos não é muito evidente no declive, porém há diferença para valores de distância menores. Há uma grande diferença no *offset*, que depende ou melhor é proporcional com a altura do receptor e da frequência.

Entre os modelos, as curvas que mais se assemelham por comportamentos de declive e *offset* são as do tipo de terreno C para o modelo SUI com a curva para grandes cidades do modelo ECC-33.

2.1.6 Modelo COST-231-Walfish-Ikegami

Utiliza o modelo teórico do Walfish-Bertoni [23]. Propõe modelar as filas de prédios como obstáculos cilíndricos, baseado na hipótese que, mesmo sem linha de visada ou LOS (*Line of Sight*), a estação remota receberá sinal do transmissor, pois, o sinal sofrerá difrações e reflexões nos tetos dos prédios e entre eles, como é apresentado na figura 12.

Figura 12: Possibilidades dos percursos tomados pela onda consideradas pelo modelo Walfish-Bertoni.

Fonte: WALFISH-BERTONI (1988) [24]

Figura 13: Atenuação de enlace no modelo ECC-33 comparado com o modelo SUI em função da distância, parametrizada segundo o tipo de cidade e alturas h_{re} e h_{te} e agrupada em frequências.

Modelo ECC-33 Vs SUI com hte70m

Erro ECC-33 Vs SUI com hte30m

Erro ECC-33 Vs SUI com hte70m

Descrito conforme a seguir:

$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd} & \text{for } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & \text{for } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

onde, L_0 é a perda no espaço livre. L_{rts} vem das palavras em inglês *Roof-top-to-street* é a perda por difração e espalhamento desde o teto até o piso. Por último, L_{msd} *multi-screen diffraction* é a perda por difração de percursos múltiplos. Estas perdas estão definidas assim:

$$\begin{aligned} L_0 &= 32,4 + 20 \log d + 20 \log f \\ L_{rts} &= -16,9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h + L_{Ori} \\ L_{msd} &= L_{bsh} + k_a + k_b \log d + k_f \log f - 9 \log b \end{aligned} \quad (15)$$

$$L_{Ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\phi & 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\phi - 35) & \text{for } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\phi - 55) & 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases}$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{BASE}) & h_{BASE} > h_{Roof} \\ 0 & h_{BASE} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_{BASE} > h_{Roof} \\ 54 - 0,8\Delta h_{BASE} & \text{for } d \geq 0,5\text{km} \text{ \& } h_{BASE} \leq h_{Roof} \\ 54 - 1,6\Delta h_{BASE}d & d < 0,5\text{km} \text{ \& } h_{BASE} \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (16)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & h_{BASE} > h_{Roof} \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_{BASE}}{h_{Roof}} & h_{BASE} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{suburban centers} \\ -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{metropolitan centers} \end{cases}$$

onde d é a distância entre o transmissor (BS) e o receptor, f é a frequência, w é a largura da rua em metros. Δh é a diferença entre a altura do teto e a altura da ERB, bem como, a altura do receptor. ϕ é o ângulo relativo de incidência. b é a distância entre os prédios ao longo do percurso do sinal. L_{bsh} e k_a representam o incremento de perda pela diferença da altura da antena.

Para explicar um pouco melhor, tem-se o gráfico a seguir:

Figura 14: Apresentação dos parâmetros do modelo COST-231 WI.

Fonte: SHAHAJAHAM (2001) [25]

O comportamento da simulação para o Modelo COST-231 WI, para h_b de 30m e 70m sob três ângulos diferentes.

Em comparação com [26] detecta-se o comportamento similar ao mencionado. Comparando-se o comportamento desse modelo com o modelo de Okumura-Hata tem-se as curvas como apresentado na figura 16.

A linha continua representa o modelo COST-231 WI com ângulo ϕ de 90° , a linha descontinua representa o modelo COST-231 WI com ângulo ϕ de 30° , a linha pontilhada representa o modelo COST-231 WI com ângulo ϕ de 45° , a linha com o símbolo '+' representa o modelo COST-231 HATA para cidades intermediárias, e finalmente, a linha com o símbolo de 'x' representa o modelo COST-231 Hata para grandes cidades.

Há um *offset* de diferença entre os modelos, porém o declive é similar, entre 3dB/década e 5dB/década. Detecta-se que a diferença devido ao ângulo ϕ , é menor do que a diferença com o modelo COST-213 Hata.

Figura 15: Atenuação de enlace no modelo COST-231 WI em função da distância, parametrizada em ângulo relativo de incidência e altura hm, agrupada em frequências.

COST231 WI com hte de 70m

Figura 16: Atenuação de enlace no modelo COST-231WI comparado com o modelo COST-231 Hata em função da distância, parametrizada em ângulo relativo de incidência e altura hm, agrupada em frequências.

Modelo COST231 WI vs HATA com hte de 70m

Erro COST231 WI vs HATA com hte de 30m

Erro COST231 WI vs HATA com hte de 70m

2.1.7 Modelo Ericsson

Modelo da empresa Ericsson [25, 27]. Modificou o modelo de Okumura-Hata para adaptar aos parâmetros, conforme a seguir:

$$\begin{aligned}
 PL &= a_0 + a_1 \log d + a_2 \log h_b + a_3 \log h_b \log d - 3,2(\log(11,75h_r))^2 \\
 &\quad + g(f) \\
 g(f) &= 44,49 \log(f) - 4,78(\log f)^2
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

As constantes estão dadas por:

Tabela 2.1-2 - Constantes para o modelo Ericsson

Ambiente	a_0	a_1	a_2	a_3
Urbana	36,2	30,2	12	0,1
Suburbana	43,20	68,93	12	0,1
Rural	45,95	100,6	12	0,1

Fonte: SIMI (2001) [27]

O comportamento da simulação para o Modelo Ericsson apresenta-se na figura 17. O comportamento evidentemente é diferente com as curvas do modelo HATA, o declive muda drasticamente segundo o tipo de região.

Figura 17: Atenuação de enlace no modelo Ericsson em função da distância, parametrizada em altura hr, agrupada em frequências.

Modelo Ericsson com hte70m

2.1.8 Modelo de dupla inclinação em inglês *dual – slopes*

Baseado no modelo de dois raios, este modelo contempla os dois componentes de uma onda esférica em um ambiente onde há solo [28]. A função divide-se em duas componentes segundo a distância:

$$L(d) = L_b + \begin{cases} 10n_1 \log d + P_1 & 1 < d < d_{brk} \\ 10(n_1 - n_2) \log d_{brk} + 10n_2 \log d + P_1 & d \leq d_{brk} \end{cases}$$

$$d_{brk} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(\Sigma^2 + \Delta^2)^2 - 2(\Sigma^2 + \Delta^2) \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^4}$$

$$\Sigma = h_1 + h_2, \Delta = h_1 - h_2$$
(18)

Fonte: FEUERSTEIN (1994) [29]

Pode ser aproximado, por uma regressão linear para:

$$d = \frac{4h_1h_2}{\lambda}$$

$$P_1 = P(d = d_0 = 1m) = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)$$
(19)

Fonte: XIA (1993) [28]

P_1 é a perda de propagação segundo a distância. d_{brk} representa o ponto de quebra, geralmente o ponto da região Fresnel. L_b é a perda da propagação que depende da frequência e a altura da antena, n_1 e n_2 representam o melhor comportamento para a ladeira [30, 28].

O comportamento da simulação para o Modelo de dos ângulos apresentado na figura 18.

Este modelo apresenta discrepâncias no declive, como já expressado em outros modelos. Os coeficientes de parametrização encontrados na literatura foram utilizados pelos autores, como descrito nas referências [30] [29]. Apresenta grandes diferenças, inclusive no declive.

Figura 18: Atenuação de enlace no modelo dois ângulos em função da distância, parametrizada em frequências.

Figura 19: Atenuação de enlace no modelo *dual slopes* comparado com o modelo de Okumura-Hata, parametrizadas em frequências.

Na Figura 19 apresenta-se o modelo de Okumura-Hata com a linha pontilhada na parte superior do enlace. As curvas da parte inferior do gráfico são as mais próximas segundo as constantes avaliadas.

2.2. Comparação dos modelos de PL

Como foi expresso anteriormente, há várias faixas de frequências e tipos de ambientes. Pelo qual foi decidido definir as condições idênticas e padrão para comparar as diferenças entre os modelos. As condições escolhidas são:

$$450\text{MHz} \leq f \leq 1500\text{MHz}$$

$$1,5\text{m} \leq h_{re} \leq 3\text{m}$$

$$10\text{m} \leq h_{te} \leq 80\text{m}$$

$$1\text{Km} \leq R \leq 20\text{Km}$$

Os resultados são comparados com o trabalho em [20]. No entanto, esses resultados não puderam ser comparados com o modelo ECC-9999, pois, a frequência de trabalho está fora da faixa de frequências quando comparado com outros modelos. Por exemplo, no caso do Modelo Ericsson foi comparado com [18].

Para se determinar os parâmetros e esclarecer as razões das condições propostas, apresenta-se a tabela 2.2-1.

Tabela 2.2-1 - Comparação dos modelos de propagação

Modelo	Divisão zonal	Frequência (MHz)	h_{te} (m.)	h_{re} (m.)	R (km.)
Hata	Sim/3	150 -1500	30 - 200	1-10	1-20
COST-231 Hata	Sim/3	1500 -2000	30 - 200	1-10	1-20
Hata estendido ECC-33	Sim/2	1500-3500	30 - 200	1-10	1-20
SUI	Sim/3	>11000	10-80	2-10	0,1-8
COST-231WI	Sim/3	600 -1200	30 - 200	NA	NE
Ericsson	Sim/3	1500-3500	30 - 200	1-30	1-20
Dois ângulos	Não	NE	NE	NE	NE

Comparação para Cidades grandes, hte30m e hre1.5m

Comparação para Zonas Suburbanas, hte30m e hre1.5m

Comparação para Zonas Rurais, hte30m e hre1.5m

Figura 21: Comparação da atenuação nos modelos apresentados em função da distância, parametrizada para diferentes ambientes e alturas h_{re} 3m e h_{te} 30m, agrupada em frequências.

Comparação para Cidades médias, h_{te} 30m e h_{re} 3m

Comparação para Cidades grandes, hte30m e hre3m

Comparação para Zonas Suburbanas, hte30m e hre3m

Comparação para Zonas Rurais, hte30m e hre3m

Figura 22: Comparação da atenuação nos modelos apresentados em função da distância, parametrizada para diferentes ambientes e alturas h_{re} 1,5m e h_{te} 70m, agrupada em frequências.

Comparação para Cidades médias, $h_{te}70m$ e $h_{re}1.5m$

Comparação para Cidades grandes, hte70m e hre1.5m

Comparação para Zonas Suburbanas, hte70m e hre1.5m

Comparação para Zonas Rurais, hte70m e hre1.5m

Figura 23: Comparação da atenuação nos modelos apresentados em função da distância, parametrizada para diferentes ambientes e alturas h_{re} 3m e h_{te} 70m, agrupada em frequências.

Comparação para Cidades médias, h_{te} 70m e h_{re} 3m

Comparação para Cidades grandes, hte70m e hre3m

Comparação para Zonas Suburbanas, hte70m e hre3m

Comparação para Zonas Rurais, hte70m e hre3m

2.3. Conclusões

- Os modelos apresentados são empíricos, definidos com base em medidas tomadas segundo várias condições e tipos de região. A característica geral é um coeficiente angular ao redor de 30 dB/década, com exceção do modelo Ericsson e o modelo de dois ângulos.
- Observou-se como a faixa de frequência, a altura da ERB e do receptor, assim como a distância total do raio de enlace são determinísticos para os modelos, e são as variáveis a serem consideradas no modelo proposto.
- O modelo que apresenta maior informação é o modelo de Okumura-Hata, pois as condições das medidas são bem definidas. Foi tomado como referência para comparação com outros modelos. Este modelo mostra o comportamento do declive de 30dB/década.
- Os modelos empíricos apresentam um comportamento parecido com o trabalho realizado em [20]. No caso do modelo Ericsson, os resultados foram comparados com os do trabalho de [18], confirmando que o algoritmo implementado em MATLAB® representa adequadamente a programação. Foi realizada uma comparação com um resultado externo, pois o modelo é o que apresenta maior discrepância entre os modelos apresentados.
- Há uma diferença no declive da curva do modelo SUI em comparação com os outros modelos simulados, porém, todos tiveram um comportamento parecido. Para zonas suburbanas o modelo Ericsson tem um comportamento único, enquanto que, o SUI aproxima-se ao comportamento dos outros modelos. Finalmente, para zonas rurais o comportamento do modelo Ericsson tem uma defasagem de quase 70 dB para distâncias ao redor de 20 km, por enquanto, os modelos SUI COST-231 WI e COST-231 HATA chegaram a um comportamento muito próximos.
- O modelo de dupla inclinação apresenta um declive diferente ao modelo de Okumura-Hata, inclusive com o coeficiente de parametrização, na faixa de distância escolhida.
- O modelo SUI no terreno C é mais parecido com o modelo de Okumura-Hata e os outros. Para frequências mais elevadas, o modelo SUI apresenta um erro maior.

Capítulo 3

PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO DE DOIS RAIOS

Este modelo é baseado na premissa que o campo no receptor provém principalmente de duas fontes. A primeira é o raio da linha de visada (LOS) e a segunda é a reflexão do sinal no solo, como interface dielétrica. Teremos uma estrutura como a seguir:

Figura 24: Apresentação dos parâmetros do modelo de dois raios.

O transmissor da ERB está localizado à esquerda na figura 24, a uma altura h_1 , e o receptor está localizado à direita na mesma figura, a uma altura h_2 . A distância do

nível do solo entre o transmissor e o receptor é R , e a distância entre a antena transmissora e a antena receptora será r_1 assim como r_2 é a distância total que o sinal refletido percorre, e os ângulos θ_1 e θ_2 são os ângulos dos trajetos, o primeiro conseqüência da diferença de alturas entre a ERBe o receptor, e o segundo é o ângulo de reflexão..

Supõe-se que a onda esférica se propaga em uma família de raios que ao atingirem o solo são refletidos segundo a lei de Snell [23], resumida a seguir:

$$P_R = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| f_1(\theta_1) f_2(\theta_1) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \Gamma(\theta_2) f_1(\theta_2) f_2(\theta_2) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right|^2 \quad (20)$$

onde f_1 e f_2 são as funções normalizadas do diagrama de radiação das antenas, Γ é o coeficiente de reflexão, r_1 e r_2 é a separação horizontal.

$$r_{1,2} = \sqrt{R^2 + (h_1 \mp h_2)^2} \quad (21)$$

Como exemplo, nas condições a seguir, teremos um resultado apresentado na figura 25, $f_1 = f_2 = 1$; $h_1 = 8,7m$; $h_2 = 1,8m$; $R = 100m$; $\theta_1 \cong 90^\circ$; $\theta_2 \cong 90^\circ$; $f = 900MHz$. Obteremos:

$$PG = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \Gamma(\theta_2) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right|^2 \quad (22)$$

Figura 25: Exemplo de curva da intensidade do campo no modelo de dois raios.

Em particular para o modelo de *dual-slopes* baseado no modelo de dois raios ou *Two-Ray*, apresentado no capítulo anterior, especialmente na Figura 18, verifica-se uma grande diferença no declive da curva. Porém, dos modelos apresentados este é o único que tem uma relação de proximidade com o fenômeno de propagação.

3.1. Testes preliminares

O cenário mais simples mostra a diferença entre o comportamento do coeficiente de reflexão em função da polarização, e a permissividade, numa mesma frequência entre o ar e um sólido como mostrado na Figura 26.

Verifica-se que o comportamento é diferente segundo a polarização. Quando o ângulo aumenta, o comportamento discrepa segundo a polarização, especialmente no caso da polarização TM, que mostra um mínimo na curva, que diminui em função do ângulo ao aumentar a constante elétrica do material. Este teste foi necessário para mostrar o comportamento assintótico.

Para ter um ponto de comparação com outros estudos, que também compararam resultados obtidos de medidas, será apresentado o índice de transmissão da potência.

Utilizando-se uma amostra dos resultados já obtidos para 900MHz e 1800MHz, sendo $\epsilon_r = 4,44$ e $w = 20\text{cm}$, conseguiu-se reproduzir o resultado obtido em [23], como mostrando na Figura 27.

Figura 26: Coeficiente de transmissão em função do ângulo de incidência parametrizado em permissividade na frequência de 900MHz.

Figura 27: Coeficientes de reflexão e transmissão em função do ângulo de incidência, para frequências 900MHz e 1800MHz com espessura $w=20\text{cm}$ e $\epsilon_r = 4,44$.

onde, observa-se o comportamento da impedância de entrada, que está definindo como função do coeficiente de transmissão, $1/|\Gamma|^2$, obtemos nesse cenário as curvas da Figura 27, considerando que o sistema não apresenta perdas.

Assim, confirma-se o fato que o comportamento da reflexão depende da frequência, da permissividade, do ângulo e da espessura do material. Em [31], compararam-se as medidas parecidas com o modelo, medindo uma parede de tijolo, de espessura de 30 cm, com resultados de $\epsilon'=4$ e $\epsilon''=0,1$. O comportamento segundo a inclinação da irradiação é apresentado na figura 28.

O comportamento assintótico mostrado na Figura 28, altera rapidamente, quer dizer, entre uma espessura de 2m e 100m tem uma diferença máxima da ordem de 10^{-5} , entre 1m e 2m tem uma diferença máxima de 10^{-3} .

Assim é proposto que para espessuras maiores que um metro pode-se utilizar o comportamento assintótico ao comportamento do mesmo material com permissividade real, como mostrado na Figura 29.

Figura 28: Comparação do coeficiente de reflexão em função do ângulo, parametrizada em espessura do material.

Figura 29: Comparação do componente real do coeficiente de reflexão em função do ângulo, parametrizada em espessura do material.

Coefficiente de reflexão na frequência 1.8GHz

Coeficiente de reflexão na frequência 0.9 GHz

Coefficiente de reflexão na frequência 0.45GHz

Pode-se dizer então que assim que aumentar a frequência, mesmo com uma espessura menor, a camada de material comporta-se como um volume maior do material, quer dizer, como se a espessura fosse maior, e sem perdas, tendo um comportamento assintótico. A frequência faz grande diferença entre utilizar o comportamento assintótico ou não.

Assim, três caminhos podem ser utilizados para seguir os testes. O primeiro é comprovar o comportamento dos materiais de espessura menor com outros métodos. O segundo é comprovar o comportamento dos materiais de grande espessura com outros materiais dentro deles ou estruturas mais complexas compostas por múltiplos materiais, o qual está fora do escopo deste estudo. Finalmente, o terceiro é considerar que estruturas como o solo com um comportamento assintótico.

Tomando como referência para o primeiro tipo de testes o método do *Ray Tracing* [32, 33], que apresenta medições com curvas semelhantes com os resultados, porém tem suposições que precisariam estudos posteriores, e que não cabem dentro do escopo desta dissertação. Especialmente, é necessário mencionar à aproximação que prevê não ter diferença no comportamento segundo a espessura, fato que tem se demonstrado nas simulações apresentadas nas figuras 28 e 29.

Nesse estudo, também dever-se-ia levar a conta a condição de contorno expressa em [34] onde consta que as perdas devem ser $\sigma_2 > \sigma_1$, e no caso de $z=d$, quer dizer, quando a onda atravessar o segundo limite do material, as características elétricas do material e do ar não cumprem esta condição.

Observou-se uma diferença significativa segundo a frequência quando é usada a expressão de *Ray Tracing*.

$$\Gamma_g = \Gamma - (1 - \Gamma^2) \frac{\Gamma e^{-j2ks} e^{-2\alpha s} e^{-jk_0 d \cos \psi}}{1 - \Gamma^2 e^{-j2ks} e^{-2\alpha s} e^{-jk_0 d \cos \psi}} \quad (23)$$

Fonte: CORREIA (1995) [33]

Figura 30: Comparação dos coeficientes de reflexão de [33] e do modelo de impedância em função do ângulo de incidência, parametrizado em espessura do material.

Frequência 60GHz $\epsilon = 11.56 - 0.0774508ie$ $\tan(\delta) = 0.0067$

Na Figura 30, destacam-se os resultados a seguir:

- O máximo erro aumenta nos ângulos incidentes menores, como esperado.
- A frequência de trabalho no modelo mencionado é apresentada em [30] é ampla sempre que a espessura for menor. Quando a espessura aumenta, o modelo tem uma maior discrepância, particularmente nos valores menores de ângulos de incidência.
- Ainda com frequência baixa, é possível ter um resultado favorável se a espessura for menor.

Existem discrepâncias entre os valores das constantes elétricas para vários materiais medidos por outros autores [23, 35, 31, 32]

A Figura 31 evidencia que:

- Quanto maior a frequência e/ou a espessura, mais fácil prever o comportamento do material.
- A tendência assintótica do comportamento é mais rápida quando a frequência aumenta.
- Alguns autores como em [36] descreve sobre modelagem em “Reflexão espetacular”, porém, é um fenômeno que acontece somente sob condições muito específicas, como no caso do Ângulo de Brewster.

Estudos posteriores deverão entrar no detalhe do comportamento de arranjos de materiais, ou conjunto com vários tipos de materiais, e estruturas, que podem filtrar ou absorver como, por exemplo, os apresentados nas referências [37, 38].

Figura 31: Coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência parametrizado em frequência, em polarização e em espessura, agrupado por tipo de material.

Coeficiente de reflexão 1.9 GHz

Coeficiente de reflexão4 GHz

Coefficiente de reflexão0.9 GHz

Coefficiente de reflexão1.9 GHz

Coeficiente de reflexão 4 GHz

3.2. Testes para tipos de solo

Utilizando os valores de vários tipos de solo medidos em [13, 39, 40] diferenciados pelas condições atmosféricas, resumidos na tabela a seguir:

Tabela 3.2-1 - Valores medidos das características elétricas para os diferentes tipos de solo.

Tipo de Solo	ϵ_r	σ
Solo fraco	4	0,001
Solo comum	15	0,005
Solo superior	25	0,02
Água fresca	81	0,01
Água salgada ou marinha	81	0,5

Podem-se obter as simulações para o coeficiente de reflexão, utilizando as equações a seguir

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad \left| \quad \tau_{\parallel} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (24)$$

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad \left| \quad \tau_{\perp} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (25)$$

Podemos observar que para qualquer frequência o comportamento não altera, pois só haverá diferenças na fase, o que está em sintonia com o comportamento assintótico, tanto a água fresca como a água do mar têm o mesmo comportamento.

3.3. Primeira Modificação do modelo de dois raios

Utilizando a definição do modelo de dois raios exposto anteriormente representado pela equação 21, podemos obter os valores a seguir para os solos com as características elétricas mencionadas na Tabela 3.2-1.

Figura 32: Coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência, parametrizado em polarização e tipo de solo.

Figura 33: Coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência parametrizado em polarização e tipo de solo em 900MHz.

Como foi mencionado, a frequência de interesse para comparar com o modelo de Okumura-Hata está na faixa de 450MHz e 1900MHz, e a distância de rádio de enlace está limitada entre 1 km e 20 km o que filtra o escopo do declive que se procura.

Na mesma equação a potência está sendo adicionada como se fosse um produto linear, porém, a potência só pode ser adicionada algebricamente quando no formato comparativo. Isso significa que, a equação foi mudada como apresentado a seguir:

$$LP = -10 \log \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| f_1(\theta_1) f_2(\theta_1) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \right|^2 \right) - 10 \log \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \Gamma(\theta_2) f_1(\theta_2) f_2(\theta_2) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right|^2 \right) - K \quad (26)$$

Supondo de que f_1 e f_2 são as funções normalizadas do padrão de campo que para o caso do modelo de Okumura-Hata, foi normalizada, pelo qual escolheremos o valor unitário. A constante K será o parâmetro de *offset*.

Utilizando-se as constantes elétricas da tabela 3.2-1, e os valores de Γ são expostos segundo a polarização, nas equações 24 e 25 obtém-se os resultados com discrepâncias entre o modelo de dois raios original, o modelo *Dual Slopes* e o modelo de Okumura-Hata como é apresentado na Figura 34.

Na figura 34, as letras DRO significam "Dois Raios Original" e fazem referência à simulação do modelo original. DRP significa "Dois Raios Proposto" e que fazem referência as curvas do modelo proposto segundo o tipo de solo. As siglas SF, SC e SS significam Solo Fraco, Solo Comum e Solo Superior, respectivamente. Cabe notar, que os resultados para polarizações TM (ou Transversal Magnética) e TE (ou Transversal Elétrica) são iguais.

Figura 34: Atenuação do enlace no modelo de dois raios comparado com o modelo modificado em função da distância, parametrizada em tipo de solo e agrupada em polarização e altura hte.

Frequencia 900MHz e h=1.5 m

Das curvas anteriores, observa-se várias condições:

- O comportamento para polarização TE e TM é igual na atenuação do enlace, como o modelo empírico de Okumura-Hata também confirma, ainda quando foi realizado com medidas de polarização vertical.
- O declive da curva do modelo original é de 20 dB/década, o modelo modificado apresenta um declive mais próximo ao esperado, com 40 dB/década.
- A atenuação de altura na ERB não muda o modelo, o que é contrário às medições do modelo de Okumura-Hata.

A seguir, uma comparação entre o modelo *Dual Slopes* e o modelo modificado é apresentada.

Há grandes discrepâncias entre as curvas, A primeira delas é o declive, a segunda é que o modelo modificado não está mudando ao mudar-se a altura da ERB.

O procedimento a seguir é encontrar a parametrização com o modelo Hata. Para os primeiros testes definimos as seguintes condições:

$$450MHz \leq f \leq 1900MHz$$

$$1,5m \leq h_{re} \leq 3m$$

$$30m \leq h_{te} \leq 80m$$

$$1Km \leq R \leq 20Km$$

Os primeiros testes foram gerados com um valor de h_{re} e h_{te} fixo de 8,7m e 1,8m, respectivamente.

Da Figura 36 pode-se dizer que as curvas são muito próximas, porém há uma grande discrepância no declive como mostrado a seguir ao validar-se o erro.

Da Figura 37 pode-se concluir que:

- Além de um *offset*, há uma diferença no declive, que varia entre 2 dB/década e 8 dB/década.
- Também há um *offset* de erro que varia segundo a frequência.
- Quando a altura da ERB for maior, o erro do declive aumenta.

Figura 35: Atenuação de enlace no modelo *dual slopes* comparado com o modelo modificado de dois raios em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em frequências.

$$450MHz \leq f \leq 1900MHz \quad 30m \leq h_{te} \leq 80m \quad 1,5m \leq h_{re} \leq 3m \quad 1Km \leq R \leq 20Km$$

Figura 36: Comparação do modelo proposto com o modelo de Hata em função da distância, parametrizada em tipo de solo, e agrupada em frequência.

Figura 37: Erro entre o modelo proposto e o modelo de Okumura-Hata em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em altura hre, hte e frequência.

Frequência 450MHz e hre 3 m

Frequência 900MHz e hre 1.5 m

Frequência 900MHz e hre 3 m

Frequência 1900MHz e hr e1.5 m

Frequência 1900MHz e hre 3 m

3.4. Segunda Modificação do modelo de Dois Raios

Dos testes anteriores podemos observar que há diferenças no declive do comportamento da perda de percurso, embora o modelo de dois raios aproxima-se melhor, o resultado pode ainda ser melhorado, e sugere que uma distribuição de corrente diferente nos aproximara ao resultado esperado. Outros estudos mostram que o comportamento da imagem é melhor representado por uma distribuição de corrente infinita. Os testes a seguir mostram a diminuição do erro segundo as distribuições de corrente na imagem.

Como é mencionado em [13], é complicado demonstrar que a terra se comporta como o modelo de dois raios prevê.

Propõe-se assim, uma distribuição de corrente simples na “imagem”. É admitida uma distribuição de corrente uniforme buscando validá-la para vários cenários visando encontrar um comportamento que melhor se assemelhe ao resultado esperado.

Foi utilizada uma distribuição de corrente uniforme com um valor único de coeficiente de cada elemento, supondo a imagem entre as alturas h_e e h_s , como apresentado na Figura 38

Utilizando então a equação

$$\begin{aligned}
 LP = & -10 \log \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| f_1(\theta_1) f_2(\theta_1) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \right|^2 \right) \\
 & - 10 \log \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \sum_i \Gamma(\theta_i) f_1(\theta_i) f_i(\theta_i) \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \right|^2 \right) - K
 \end{aligned} \tag{27}$$

Figura 38: Distribuição de corrente para o modelo proposto na segunda modificação.

A pergunta seria, quais são as alturas mais convenientes para o modelo? Temos três opções entre o limite da superfície e a altura da antena imagem, entre a altura da antena imagem e uma altura superior, ou uma combinação das duas opções anteriores.

Inicia-se com uma distribuição de corrente discreta em quatro imagens elementares discretas ou IED distribuídas entre $0 \leq h_f \leq h_1$. Em particular foi utilizado $h_e=0$ e $h_s=2 \cdot h_{te}$. Os resultados obtidos são mostrados na figura 39.

Figura 39: Atenuação de enlace da segunda versão do modelo modificado comparado com o modelo de Okumura-Hata e o Erro em função da distância, parametrizada em tipo de solo agrupado em frequências e altura. $h_e=0$ e $h_s=2 \cdot h_{te}$.

Comparação dos modelos com hre3m, hte70m, hs140m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte100m, hs200m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte30m, hs60m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte70m, hs140m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte100m, hs200m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte30m, hs60m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte70m, hs140m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte100m, hs200m e he0m

Embora o declive assemelha-se com o resultado esperado, apresenta um *offset* que varia segundo a frequência. Para as curvas da Figura 39 foi utilizado um *offset* até de -60 dB, menor do que o utilizado com a primeira modificação do modelo. Também foi apresentado o erro comparado entre a segunda modificação do modelo com as condições mencionadas anteriormente pelo modelo de Okumura-Hata. Este erro apresenta um comportamento parecido no declive para diferentes frequências, com um *offset* de correção.

Os testes anteriores permitem várias anotações importantes. A primeira, confirma que o ripple é maior para alturas de ERB maiores. Este fenómeno era esperado, pois ao ser maior a altura do transmissor procurasse ter um comportamento menos semelhante com a distribuição de corrente proposta. Também, podemos observar que o comportamento da atenuação no percurso é oscilante em torno da curva do modelo de Okumura-Hata. Porém o modelo de Okumura-Hata é baseado em uma regressão exponencial das medidas de Okumura, o que suavizou as oscilações das medidas para a atenuação no do percurso. O *offset* é maior para uma altura maior do transmissor, pelo qual continuaremos a testar alturas entre 30 e 70m.

Vimos em particular que a diferença é maior para alturas de ERB maiores. O declive tem um erro menor, 2 dB/década, no pior dos casos embora com flutuações.

Quanto mais fina seja a discretização da imagem menor será o *offset* de compensação necessário para o modelo proposto assemelha-se com o modelo de Okumura-Hata.

Foi aumentado o número de imagens elementares discretas na distribuição de corrente, utilizando-se a mesma frequência e as mesmas alturas do transmissor e do receptor. A frequência de trabalho foi de 900 MHz, a altura da ERB de 70m e a altura do receptor de 3m.

Figura 40: Atenuação de enlace da segunda versão do modelo modificado com distribuições com maior número de discretizações comparado com o modelo de Okumura-Hata, e o erro em função da distância, parametrizada em tipo de solo agrupado em frequências e altura. $h_e \leq 0$ e $h_s \geq h_{te}$.

Comparação dos modelos com $h_{re}3m$, $h_{te}70m$, h_s280m e h_e0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte70m, hs280m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte70m, hs280m e he0m

Na Figura 40 é evidente que o *offset* diminui quando aumenta o número de discretizações da distribuição de corrente da imagem. O número de discretizações é de 5000 amostras para reduzir o *offset* a um valor aceitável.

Para o próximo teste é utilizada uma frequência de trabalho de 900MHz, a altura da ERB de 30 e 100m, a do receptor de 3m, uma discretização da distribuição de corrente de 5000 amostras, e uma distribuição de corrente entre $h_e=2h_{re}$ e $h_s=9*h_{te}$.

Dos resultados obtidos na figura 41 podemos ver que, quando aumentar o número de amostras o *offset* diminui, aumenta o tempo de processamento y melhora o *ripple* quando aumentar o tamanho da distribuição de corrente, melhorara o declive e aumenta o processamento.

Dos valores obtidos podemos concluir que os valores ótimos para conseguir melhor aderencia com o modelo de Okumura – Hata são como a seguir.

Amostras: 1000-5000	Faixas
$h_e = 0 - 3 h_r$	450 -1900 MHZ
$h_s = 5 h_t - 10 h_t$	$30m < h_{te} < 100m$
	$1.5m < h_{re} < 3m$
	$1Km < R < 20Km$

Podemos também validar que o número de amostras dependera do h_s escolhido e é proporcional com a altura da ERB e também depende da frequência.

Figura 41: Atenuação de enlace da segunda versão do modelo modificado com distribuições com maior número de discretizações comparado com o modelo de Okumura-Hata, e o erro em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em frequências e altura. $h_e=0$ e $h_s\geq h_1$

Comparação dos modelos com hre3m, hte70m, hs700m e he0m

Figura 42: Atenuação de enlace do modelo modificado otimizado para a faixa de frequência de trabalho comparado com o modelo de Okumura-Hata, e o erro em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em frequência e altura.

Comparação dos modelos com hre3m, hte70m, hs700m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte30m, hs300m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte70m, hs700m e he0m

Comparação dos modelos com hre3m, hte30m, hs300m e he0m

offset=9
No.IED=28501
Freq=1900MHz

Comparação dos modelos com hre3m, hte70m, hs700m e he0m

Figura 43: Comparação da atenuação de enlace do modelo modificado otimizado para a faixa de frequência de trabalho comparado com o modelo de Okumura-Hata, Cost231 Hata e Cost231 WI, em função da distância, parametrizada em tipo de solo, agrupada em frequência e altura.

Na Figura 42 vemos que os valores utilizados apresentam uma boa aderência com a curva do modelo de Okumura – Hata. Há ainda um pequeno erro de até 5dB/década. Comparado com o modelo de Okumura-Hata para cidades médias

3.5. Comparação com outros modelos

Comparando com os modelos apresentados no capítulo anterior teremos os resultados obtidos na Figura 43.

3.6. Conclusões

Os diferentes tipos de solo mostram que há um comportamento diferenciado segundo a frequência, isto é o causante da diferença entre os tipos de cidade, apresentados no modelo de Okumura-Hata.

Com o modelo proposto, assim como, o modelo original, as curvas são as mesmas na distância e na frequência do escopo.

O modelo com a primeira modificação comporta-se aproximado aos resultados do modelo de Okumura-Hata dentro do escopo, com as observações a seguir

- Os valores de alturas estão fora do escopo para o modelo Okumura –Hata o que demonstra que a primeira variação é necessária porém não suficiente para encontrar uma distribuição adequada.
- Ao aumentar a h_{re} ou altura do receptor, detecta-se aumento do erro em particular para o ‘Solo fraco’, quando aumentar a altura do receptor o componente entre Grandes cidades e cidades médias varia. Isto gera a discrepância do erro. Na literatura estima-se que o modelo funcione melhor só para alturas maiores no ERB.
- Conforme o esperado, ao aumentar a frequência o comportamento do solo mudaria, e 1900MHZ está no limite da faixa da frequência de trabalho, tanto para o modelo proposto quanto para as medidas feitas por Okumura. Como foi explicado no capítulo 2, os materiais mudam seu comportamento segundo a frequência da onda incidente.
- Com alturas h_{re} menores o erro do modelo com o Hata para grandes cidades e cidades médias é quase igual.

Segundo a segunda variante proposta vemos que o escopo de altura melhora, e o ajuste desaparece. Concluimos que a melhor distribuição de corrente testada é uma distribuição uniforme entre $h_e=0$ e $h_s=2h_1$, com uma discretização de 1000 nesta distância. No entanto, o estudo está aberto a testar outras distribuições de corrente para estudos posteriores.

Também pode-se concluir que o solo interfere no *offset* e os testes para cada cidade deveriam ser especificados os tipos de solos onde precisam medições. Porém o modelo do Solo Comum aproxima-se melhor as curvas segundo as medidas de Okumura. Posteriores estudos poderão continuar melhorando esta proposta utilizando terrenos mistos compostos de espaços com água.

Também se evidencia que assim que aumentar o número de amostras um processamento maior se faz necessário. Pelo que o modelo proposto se situa entre o nível de processamento e a proximidade com as medidas do modelo de Okumura-Hata. Próximos estudos deverão comprovar o modelo com medidas.

As medições de Okumura, apresentadas no artigo original, confirmam que a curva proporcionada tem um erro até de 10 dB entre a primeira aproximação e a curva obtida por minimização de erro, e o modelo de Hata é comprovado com as curvas de Okumura.

O modelo proposto consegue atingir um comportamento semelhante de 30 dB/década, ainda com erro, que como já foi visto com vários modelos é o comportamento da onda.

Capítulo 4

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A discussão proposta consta de vários itens:

- Há diferenças significativas entre os modelos de propagação de grande distância, particularmente para o caso do modelo SUI e do modelo Ericsson.
- Os resultados preliminares da comparação dos modelos empíricos têm um comportamento parecido com o trabalho feito por Abhayawardhana [20], já no caso do modelo Ericsson, foi comparado com o documento [18] para comparar os resultados das simulações.
- Há diferenças significativas entre os modelos de propagação estudados, particularmente entre os modelos SUI e Ericsson.
- O modelo SUI apresenta grande diferença no declive da atenuação de enlace em comparação com os outros modelos simulados para zonas urbanas em cidades grandes e médias.
- Para zonas suburbanas, o modelo Ericsson tem um comportamento diferente dos outros, enquanto que o SUI se aproxima mais ao comportamento dos outros modelos.
- Para zonas rurais, o comportamento do modelo Ericsson apresenta diferença de atenuação de quase 70 dB para distâncias de 20 km, enquanto, os modelos

SUI COST-231 WI e COST-231 HATA apresentam comportamentos muito próximos.

- O modelo proposto apresenta um declive de 30dB/década, é simples e facilmente implementável dentro da faixa de frequências utilizada.
- Foi encontrada uma distribuição simples para aproximar os resultados do modelo proposto aos resultados do modelo de Okumura-Hata, considerado um dos mais confiáveis na literatura.
- Outras distribuições poderão ser testadas em trabalhos futuros visando obter resultados mais precisos.
- Pesquisas para outras faixas de frequência e tipos de solo poderiam ser realizadas para estender o modelo proposto.
- Outras aproximações poderão ser adicionadas a esta pesquisa, como incluir o fator de correção pela curvatura da terra.
- Os obstáculos foram descartados do modelo e ainda assim, os resultados obtidos mostram boa aderência.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. OKUMURA, E. OHMORI, K. T. e K. FUKUDA, "Field strength and its variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service," *Rec. Elec. Communi. Lab*, vol. 16, pp. 825-873, 1968.
- [2] M. HATA, "Empirical Formula for propagation loss in Lan Mobile Radio Services," *IEEE Vehicular Technology*, vol. 29, nº 3, pp. 317-325, 1980.
- [3] G. Intelligence, "Operator-group ranking, consolidated ownership, Q2 2014," 06 Janeiro 2015. [Online]. Available: <https://gsmaintelligence.com/analysis/2014/09/operator-group-ranking-q2-2014/444/>. [Acesso em 20 Janeiro 2015].
- [4] A. LIST, "Top 10 Countries with most cell phone users in 2014," 22 Abril 2014. [Online]. Available: <http://addictivelists.com/top-10-countries-with-most-cell-phone-users-in-2014/>. [Acesso em 20 Janeiro 2015].
- [5] P. R. CENTER, "Mobile Technology Fact Sheet," PewResearchInternetProject, Janeiro 2014. [Online]. Available: <http://www.pewinternet.org/fact-sheets/mobile-technology-fact-sheet/>. [Acesso em 20 Janeiro 2015].
- [6] S. CRAIDE, "Número de linhas de celulares no Brasil passa de 278 milhões," UOL Noticias Tecnologia, 14 Novembro 2014. [Online]. Available: <http://tecnologia.uol.com.br/noticias/redacao/2014/11/14/numero-de-linhas-de-celulares-no-brasil-passa-de-278-milhoes.htm#fotoNav=17>. [Acesso em 20 Janeiro 2015].
- [7] Central Intellingence Agency, "The World Factbook, Telephones - mobile cellular compares the total number of mobile cellular telephone subscribers.," CIA, 22 June 2014. [Online]. Available: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2151rank.html>. [Acesso em 20 Janeiro 2015].
- [8] Agência Nacional de Telecomunicações, Anatel, "Plano de destinação de faixas de frequência," [Online]. Available: <http://sistemas.anatel.gov.br/pdf/Consulta/Consulta.Asp?intPagina=18&intLivro=1>. [Acesso em 21 Janeiro 2015].

- [9] J. F. Otero, "Subasta de 700 MHz en Brasil," 8 10 2015. [Online]. Available: <http://eleconomista.com.mx/columnas/columna-invitada-empresas/2014/10/08/subasta-700-mhz-brasil>. [Acesso em 09 11 2015].
- [10] C. Eklund, R. B. Marks, K. Stanwood e S. Wang, "Topics in Broadband Access: IEEE Standard 802.16: A technical overview of WirelessMan(t) Air Interface for Broadband Wireless Access," *IEEE Communication Magazine*, vol. 40, nº 6, pp. 98-107, 19 Janeiro 2002.
- [11] Agência Nacional de Telecomunicações, Anatel, "Equipos 4G," 12 Junio 2013. [Online]. Available: <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNivelDois.do?codItemCanal=1856&nomeVisao=Cidad%E3o&nomeCanal=Equipamentos%204G&nomeItemCanal=Equipamentos%204G>. [Acesso em 21 Janeiro 2015].
- [12] Superintendencia de Telecomunicaciones Guatemala, "Banda de Frecuencias," Gobierno de Guatemala, [Online]. Available: <http://www.sit.gob.gt/index.php/gerencias-sit/gerencia-frecuencias/bandas-de-frecuencias/>. [Acesso em 21 Janeiro 2015].
- [13] T. SARKAR, W. DYAB, M. ABDALLAH, M. SALAZAR-PALMA, M. PRASAD, S. W. TING e S. BARBIN, "Electromagnetic Macro Modeling of Propagation in Mobile Wireless Communication: theory and experiment," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54, nº 6, pp. 17-43, 2012.
- [14] M. A. Correa, *Ambiente MATLAB - elementos finitos para eletromagnetismo*, Campinas, SP: UNICAMP: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2001.
- [15] A. GARCIA, J. ROCHA e M. JARDINI, "DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS," em *COBENGE*, Passo Fundo/RS - Universidade de Passo Fundo - UPF, 2006.
- [16] T. .. Sarkar, J. Zhong, K. Kim, A. Medouri e M. Salazar-Palma, "A survey of various propagation models for mobile communication," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, nº 3, pp. 51-82, 2003.
- [17] COST 231 Action, "Digital mobile radio towards future generation systems, Final Report," COST Action 231, 1999.

- [18] V. D. Nimavat e G. Kulkarni, "Simulation and performance Evaluaction of GSM propation Channel under the Urban, Suburban and Rural Enviroments," *International conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT)*, 2012.
- [19] V. Erceg e H. K.V.V., "Channel models for fixed wireless applications," IEEE 802,16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001.
- [20] V. ABHAYAWARDHANA e I. WASSELL, "Comparison of empirical Propagation Path Loss Model for Fixed Wireless Access System," *IEEE Vehicular Technology conference*, vol. 1, n° VTC 2005-Spring IEEE 61st, pp. 73-77, 2005.
- [21] J. MILANOVIC, "Comparison of propagation Models Accuracy for WiMAX on 3,5GHz," *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, n° ICECS 2007, pp. 111-114, 11-14 Dezembro 2007.
- [22] (CEPT), Electronic Communication Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administration, "The analysis of the coexistence of FWA cells in the 3,4 - 3,8 GHz band, ECC Report 33," 2003.
- [23] H. L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless System*, New Jersey: Prentice Hall PTR, 2000.
- [24] J. WALFISH e H. L. BERTONI, "A theoretical Model of UHF Propagation in Urban Enviroments," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 36, n° 12, pp. 1788-1796, 1988.
- [25] M. Shahajaham, "Analysis of propagation Models for Wimax at 3,5GHz," Blekige Intitute of Technology, 2009.
- [26] M. Jeong e B. Lee, "Comparison between path-loss prediction models for wireless telecommunication system design," em *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Suwon, South Korea, 2001.
- [27] I. Simi, I. Stani e B. Zrni, "Minimax LS Algorithm for Automatic Propagation Model Tunning," *Proceeding of the 9th telecommunications Forum (TELFOR 2001)*, Vols. %1 de %2Nov,2001, 2001.

- [28] H. H. XIA e H. L. BERTONI, "Radio Propagation Characteristics for Line-Of-Sight Microcellular and Personal Communication," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 41, nº 10, pp. 1439-1447, 1993.
- [29] M. FEUERSTEIN, K. BLACKARD e T. S. RAPPAPORT, "Path Loss Delay Spread and Outage Model as Funtion of Antenna Heigth for Microcellular System Desing," *IEEE Vehicular Technology*, vol. 43, nº 3, pp. 487-498, 1994.
- [30] T. Rappaport, "Effects of path loss and fringe user distribution on CDMA cellular frequency reuse efficiency," *Global Telecommunication conference, 1990, 'Communications:Conencting the Future'*, vol. GLOBECOM'90, pp. 500-506, 1990.
- [31] O. LANDRON, M. J. FEUERSTEIN e T. S. RAPPAPORT, "In Situ Microwave Reflection Coefficient Measurements for Smooth and Rough Exterior Wall Surfaces," *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 43, nº 1, pp. 77-80, 1993.
- [32] D. PEÑA, R. FEICK, H. D. HRISTOV e W. GROTE, "Measurement and Modeling of Propagation Losses in Brick and concrete Walls for the 900-MHz Band," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, nº 1, pp. 31-39, 2003.
- [33] L. CORREIA, "Transmission and Isolation of Signals in Buildings at 60GHz," *Proc. IEEE International Symposium PIMRC'95*, pp. 510-513, 1995.
- [34] J. HOLMES e C. BALANIS, "Refraction of a Uniform Plane wave inciden on a plane boundary between tow lossy media," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 26, nº 5, pp. 738-741, 1978.
- [35] D. D. Giri, *Modeling of propagation Losses in Common Residential and Commercial Building Walls*, Albuquerque, New Mexico: University of New Mexico, 2013.
- [36] S. SEIDEL e T. RAPPAPORT, "Site-Specific Propagation Prediction for Wireless in Building PCS Design," *IEEE Vehicular Technology*, vol. 43, nº 4, pp. 879-891, 1994.
- [37] Ram, "<http://allaboutconstruction.blogspot.com.br/>," Engineering and Interesting stuff, 4 Outubro 2013. [Online]. Available:

<http://allaboutconstruction.blogspot.com.br/2013/10/smart-building-materials.html>. [Acesso em 28 Outubro 2015].

- [38] K. MICALLEF, "Line Shape Space," Autodesk, 18 Augusto 2015. [Online]. Available: <http://lineshapespace.com/future-building-materials/>. [Acesso em 28 Outubro 2015].
- [39] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, New York: IEEE Communcations Society Liaison, 1974.
- [40] L. Cebik, "#37Verticals Using the MININEC Ground," [Online]. Available: www.antennex.com/w4rnl/cpc0301/amod37.htm. [Acesso em 11 2016].
- [41] G. D. Durgin, *Advanced Site-Specific Propagation Prediction Techniques*, Virginia: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, State Virginia University, 1998.
- [42] Y. Ji, "Dynamic 3D Indor Radio Propagation Model and Application with Radios from 433Mhxx to 2,4GHz," *International Journal of Communications Network and System Science*, vol. 5, pp. 753-766, 2012.
- [43] L. W. Barclay, *Propagation of Radio Waves*, The Institution of Engineering and Technolog, 2003.
- [44] K. Schaubach, N. Davis e T. S. Rappaport, "A Ray Tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular enviroments," em *Vehicular Technology Conference, 1992, IEEE 42nd*, Denver, CO, 1192.
- [45] B. S. Z. Milovanovic, M. Milijic e M. Sarevska, "Near-Earth propagation loss prediction in open rural enviroment using hybrid empirical neural model," em *8th International conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, TELSIKS 2007*, Serbia, 2007.
- [46] P. Wertz, G. Wölfle, R. Hoppe e M. F. Landstorfer, "Deterministic propagation models for radio transmission into buildings and enclosed spaces," em *Conference Proceedings - 33rd European Microwave Conference, EuMC 2003*, 2003.
- [47] R. Jain, "Department of Computer Science and Engineering," Watsjomgtpm University in St. Louis, 21 Fevereiro 2007. [Online]. Available:

www.cse.wustl.edu/jain/cse574-08/ftp/channel_model_tutorial.pdf. [Acesso em 20 Janeiro 2015].

- [48] T. Sarkar, W. Diab, M. Salazar-Palma, M. Abdallah, V. Prasad e S. Barbin, "Physics of propagation in a cellular wireless communication enviroment," *The radio science bulletin*, vol. 343, pp. 5-21, 2012.
- [49] C. D. TAYLOR, S. J. GUTIERREZ, S. L. LANGDON e K. L. MURPHY, "On the propagation of RF into a Building Constructed of Cinder Block Over the Frequency Range 200MHz to 3GHz," *IEEE Electromagnetic compatibility*, vol. 41, nº 1, pp. 46-49, 1999.
- [50] A. DE TOLEDO e A. TURKMANI, "Propagation into and withing buildings at 900, 1800 and 2300MHz," em *IEEE Vehicular Technology Conference, 1992, IEEE 42nd*, Denver, CO, 1992.
- [51] J. PARSONS, *The mobile Radio Propagation Channel*, John Wiley & Sons LTD, 2000.
- [52] T. S. RAPPAPORT, *Wireless communications Principles and Practice*, Prentice-Hall, 1996.
- [53] O. Landron, M. J. Feuerstein e T. S. Rappaport, "A comparison of Theoretical and Empical Reflection Coefficient for typical Exterior wall surfaces in a Mobile Radio Enviroment," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, nº 3, pp. 341-351, 1996.
- [54] Y. Wang e S. Safavi-Naeini, "A Hybrid Technique Based on Combining Ray Tracing and FDTD Metods for Site-Specific Modeling of Indoor Radio Wave Propagation," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, nº 5, pp. 743-754, 2000.
- [55] T. S. RAPPAPORT e S. SANDHU, "Radio-wave Propagation for Emerging Wireless Personal-Communication Systems," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 36, nº 5, pp. 14-24, 1994.