

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Modelo de Propagação de Campo Elétrico para TV Digital em Percursos Mistos do tipo cidade-rio na Região Amazônica

LESLYE ESTEFANIA CASTRO ERAS

DM:481/2016

UFPA/ITEC/PPGEE Campus Universitário do Guamá Belém - Pará - Brasil Fevereiro de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LESLYE ESTEFANIA CASTRO ERAS

MODELO DE PROPAGAÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO PARA TV DIGITAL EM PERCURSOS MISTOS DO TIPO CIDADE-RIO NA REGIÃO AMAZÔNICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

Área de concentração: Telecomunicações.

UFPA/ITEC/PPGEE Campus Universitário do Guamá

Belém - Pará - Brasil

Fevereiro de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELO DE PROPAGAÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO PARA TV DIGITAL EM PERCURSOS MISTOS DO TIPO CIDADE-RIO NA REGIÃO AMAZÔNICA

AUTOR: LESLYE ESTEFANIA CASTRO ERAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM ____/ ____/

Professor Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante ORIENTADOR

Professor Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

CO-ORIENTADOR

Professor Dr. Fabricio José Brito Barros MEMBRO EXTERNO (UFPA-TUCURUI)

Professora Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araujo MEMBRO EXTERNO (UFPA-FCT)

Visto:

Professor Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes COORDENADOR DO PPGEE /ITEC/UFPA

DEDICATORIA

Dedico a Deus, meus anjos papai e vovô, a minha mãe, aos meus irmãos, a Panchita, a meu namorado Kasuo, a minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem as bênçãos de Deus, pela sua generosidade para comigo a cada passo que dou.

Agradeço a minha família. A minha mãe que sempre esteve dando ânimo para me superar tanto academicamente como pessoalmente. A minha irmã que sempre deu força para não desistir das metas propostas. A meu irmão que com seu carinho me deu palavras de ânimo. A Panchita por sempre me cuidar e me escutar, por me ensinar que todos podem cair, mas que o importante é se levantar. A meu pai que sempre está comigo em tudo lugar como anjo para me cuidar, por ter-me deixado o legado de sempre perseverar. A toda minha família paterna e materna, por suas mensagens de ânimo por sempre estar em contato comigo, de maneira especial a meu avô que infelizmente não poderá estar comigo nestes momentos, mas que seus ensinamentos sempre me acompanharão, ficando o sabor de ter cumprido um dos sonhos de meu avô e meu. Agradeço à senhora Estelita por cuidar dele e me apoiar em meus estudos.

Agradeço ao PPGEE, por me acolher como aluna da pós-graduação. Agradeço também ao LCT, laboratório que me acolheu com muito carinho e conseguiu me fazer sentir como se estivesse em casa. Ao Professor Gervásio Cavalcante pelos conhecimentos compartilhados. Ao Professor Fabricio Barros por acompanhar o desenvolvimento desta dissertação. A todos por me ensinar desde palavras em português até compartilhar seus conhecimentos científicos: Allan Braga, Allan Costa, Bruno, Charlene, Cristiane, Hélio, Hermínio, Iury, Jasmine, Miércio, Michel, Nelson, Ramz, Simone, Vitor. Além disso, ao professor Adaildo da UFRN, da cidade de Natal, por apoiar nossa campanha de medições.

Esta experiência de estar longe de casa e perto ao mesmo tempo, pelas pessoas maravilhosas que são achadas no caminho. Agradeço a todo o pessoal do "Teacher House" pelos diálogos, pelo apoio e por compartilhar lindos momentos, em especial a "os mesmos de sempre". Também aos meus amigos equatorianos por seus conselhos, por me incentivar a arriscar, por estarem comigo nos momentos felizes e tristes, a minha querida "family".

É lindo para eu escrever que agradeço a uma pessoa muito especial, meu namorado Kasuo, por me apoiar, por cada momento de felicidade, pelo amor que me faz sentir e por colocar Deus em nossas vidas.

Finalmente nada disto poderia ter sido possível sem a ajuda das pessoas que promovem programas de Bolsas, OEA ("Organización de Estados Americanos"), UFPA (Universidade Federal do Pará) na pessoa da Professora Iracilda Sampaio e ao CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) que financia as bolsas.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
LISTA DE ACRÔNIMOS	3
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABELAS	6
CAPITULO 1- INTRODUÇÃO	7
1.2. Estado da Arte	8
1.3. Motivação	10
1.4. Objetivos	11
1.5. Contribuições	12
1.6. Estrutura da Dissertação	12
CAPITULO 2- FUNDAMENTOS RADIOELÉTRICOS	13
2.1. Considerações iniciais	13
2.2. Potência irradiada isotrópica efetiva (EIRP)	13
2.3. Potência irradiada efetiva (ERP)	13
2.4. Campo em condições de espaço livre	13
2.5. Azimute	16
2.6. Potência recebida	16
2.7. Considerações finais	18
CAPITULO 3 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO	19
3.1. Considerações iniciais	19
3.2. Classificação dos modelos de propagação	19
3.3. Modelo de Propagação no espaço livre	20
3.4. Traçado de dois Raios	21
3.5. Modelo Okumura Hata	26
3.6. Recomendação ITU-R P.1546-5	28
3.6.1 Aspectos considerados para a aplicação da recomendação.	29
3.6.2. Porcentagem de tempo	29
3.6.3. Frequência	30
3.6.4. Distância	31
3.6.5. Altura da antena transmissora	31
3.6.6. Trajeto Misto	35
3.6.7 Correção do Ângulo de Visada do Terreno	37
3.6.8. Correção pela altura da antena receptora	38
3.6.9. Correção pela potência efetivamente irradiada	41
3.6.10. Distâncias inferiores a 1 km	41
3.7. Funções de Green Diádicas	42
3.8. Método de Millington	44
3.9. Considerações finais	46
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA E COMBINAÇÃO DOS MODELOS ITU-R P.1546-5 – MILLINGTON	47

VIII

4.1. Considerações iniciais	47
4.2. Campanha de medições	47
4.2.1. Equipamento de medição	48
4.3. Tratamento dos dados	52
4.4. Considerações Finais	62
CAPITULO 5- RESULTADOS E ANÁLISE	63
5.1. Considerações iniciais	63
5.2. Caso I: Belém-Baia do Guajará	63
5.2.1. Modelo Espaço livre	63
5.2.2. Modelo Okumura Hata	64
5.2.3. Modelo Traçado de dois Raios	66
5.2.4. Modelo Funções de Green Diádicas	67
5.2.5. Modelo da Recomendação ITU-R P.1546-5	68
5.2.6. Modelo ITU-R P.1546-5-Modelo de Millington	70
5.2.7. Comparação entre os modelos que mais se adaptam aos dados medidos	71
5.3. Caso II: Belém- Mosqueiro	73
5.3.1. Modelo Espaço livre	73
5.3.2. Modelo Okumura Hata	74
5.3.3. Modelo ITU-R P.1546-5 trajetos mistos	75
5.3.4. Modelo ITU-R P 1546-5- Modelo do Millington	76
5.3.5. Comparação entre os modelos que mais se adaptam a os dados medidos	77
5.4. Considerações Finais	77
CAPITULO 6 – CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	81

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o estudo da propagação de campo elétrico, para dois percursos mistos típicos da região amazônica. Um primeiro cenário abordado é um trecho Belém-Baía do Guajará, no Estado do Pará. Este percurso tem 24% de terra e 76% de água. Foi realizada uma campanha de medições tanto sobre terra como sobre a água usando o canal Digital 22 de uma emissora de TV na frequência de 521 MHz. Foram medidos um total de 239 pontos, dos quais 19 em terra e 220 na água distribuídos em 3 Radiais. Os dados coletados foram comparados com diversos modelos de propagação, tanto empíricos como determinísticos, encontrados na literatura. A métrica para testar o desempenho dos modelos foi o erro RMS. Além disso, é proposto, neste trabalho, a Combinação dos Modelos: ITU-R P.1546 e Millington. Esse modelo apresentou o erro RMS mais baixo em comparação com os outros modelos usados nesta dissertação e segue o comportamento do sinal na área de transição terra-água, onde o sinal experimenta um incremento da intensidade de campo elétrico, fenômeno conhecido como "Recovery Effect". Os outros modelos usados foram: Okumura-Hata, Espaço livre, Funções de Green Diádicas, ITU-R P.1546-5 e Traçado de Raios. Tais modelos não se adaptaram ao comportamento do sinal. Para uma melhor avaliação do modelo proposto um segundo cenário foi usado, o trajeto Belém-Mosqueiro que apresenta 25% água e 75% terra. Neste caso, têm-se dados medidos somente em terra e os dados da água foram obtidos por simulação. Nesta situação, os dados calculados pelo modelo proposto apresentam coerência com os dados medidos. Além os dados simulados sobre a água apresentaram a característica do "Recovery Effect", efeito que não é apresentado pelos outros modelos. Conclui-se que a combinação dos modelos ITU-R P. 1546-5 e Millington apresenta uma melhor concordância com os dados medidos em percursos mistos terra-água em relação aos outros modelos analisados.

Palavras-chaves: Campo elétrico, trajeto misto, *recovery effect*, ITU-R. P.1546-5, Millington, TV Digital.

ABSTRACT

In this work the study of the electric field propagation is presented for two typical mixed paths in the Amazon region. A first scenario discussed is Belém-Bay Guajará located in the state of Pará. This path has 24% of land and 76% of water. A measurement campaign was carried out over land and over water; using the digital channel 22 of a TV station in the frequency of 521 MHz. Were measured a total of 239 points, including 19 over ground and 220 over water distributed in 3 Radials. Data were compared with various empirical and deterministic propagation models, found in the literature. The metric to test the performance of the models was the RMS error. Furthermore, it is proposed in this paper, the combination of two models: ITU-R P.1546 and Millington. This model had the lowest RMS error compared to the other models used in this work and follows the signal behavior in the transition area land-water, where the signal experiences an increment of the electric field strength, a phenomenon known as "Recovery Effect." Other models used were: Okumura-Hata, Free space, Dyadic Green's function, ITU-R P.1546-5 and Ray Tracing. Such models did not adapt to the signal behavior. In order to evaluate the proposed model a second scenario was used Belém-Mosqueiro, this has 25% of water and 75% of land. In this case, the data was measured only over land, the water data were obtained by simulation. In this situation, the data calculated with the proposed model has agreement with measured data. The simulated water data showed the characteristic of "Recovery Effect," phenomenon that is not described by the other models. It is concluded that the combination of the ITU-R P 1546-5 and Millington models has a better agreement with the data measured on mixed paths land-water than the other models.

Key words: Electric Field, mixed path, recovery effect, ITU-R.P.1546-5, Millington, Digital TV.

LISTA DE ACRÔNIMOS

E	Campo Elétrico
ERP	Effective Radiated Power
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunication Union
MF	Medium Frequency
RMS	Root Mean Square
UFPA	Universidade Federal do Pará
UHF	Ultra-High Frequency

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Geometria para cálculo dos coeficientes de reflexão entre dois dielétricos: a)	
Campo no plano de incidência, b) Campo normal ao plano de incidência [4]	23
Figura 3.2- Reflexão no solo com dois raios [4].	24
Figura 3. 3 - Método das imagens usado para calcular a diferença do caminho entre a linha	de
visão e os caminhos refletidos no solo [4]	25
Figura 3. 4 - Altura efetiva da antena transmissora [3].	32
Figura 3.5 - Ângulo de visada efetiva para h1 < 0 [6].	34
Figura 3.6 - Fator de interpolação básico, A ₀ , para propagação mista [6]	36
Figura 3. 7- Ângulo θ [29]	37
Figura 3.8- Correção em função do Ângulo de visada do terreno (θ _{tca}) [6]	38
Figura 3.9 - Meio com duas camadas.	43
Figura 3.10 – Trajeto misto com parâmetros elétricos diferentes para cada trajeto S1($\epsilon_1 \sigma_1$) e	е
S2(ε ₂ σ ₂) [34].	46
Figura 4.1 - Pontos de medição, trajeto misto Belém - Baía do Guajará	47
Figura 4.2 - Diagrama de Radiação no plano horizontal da antena transmissora	48
Figura 4.3 - Barco Curupira usado nas Medições	49
Figura 4.4 - Montagem da antena receptora	50
Figura 4.5 - Coleta de dados: potência de recepção no Site Master e as coordenadas de	
ubiquação com o GPS.	50
Figura 4.6 - Pontos medidos na terra	51
Figura 4.7 - Panorama do trajeto misto Belém Baía do Guajará	52
Figura 4.8 - Perfil do trajeto misto para o ponto 320.	53
Figura 4.9 - Trajeto misto considerando como se tudo fosse água e como se tudo fosse terra	a.
• •	54
Figura 4.10 - Esquema dos parâmetros considerados no calculo de E, usando ITU-R. 1546	3-5
caso I: Belém – Baía do Guajará	55
Figura 4.11 - Radial 1 Campo calculado como se tudo fosse terra	56
Figura 4.12 - Radial 1 Campo calculado como se tudo fosse agua	56
Figura 4.13 - Distâncias usada para aplicação do trajeto misto em ITU-R 1546-5.	57
Figura 4.14 - Formação de um Anel	57
Figura 4.15 - Distâncias para a formulação de Millington Caso: Belém-Baía do Guajará	59
Figura 4.16 - Trajeto Belém- Mosqueiro	60
Figura 4.17 - Trajeto Belém-Baía do Guajará porcentagem de terra e água	61
Figura 4.18 - Trajeto Belém-Baía do Guajará porcentagem de terra e água.	61
Figura 5.1 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados calculados com o	
Modelo do Espaço livre (Belém-Baía do Guajará)	63
Figura 5.2 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	,
Modelo Okumura-Hata (Belém-Baía do Guajará).	64
Figura 5.3 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	
Modelo de Tracado de dois Raios (Belém-Baía do Guajará).	66
Figura 5.4 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	
Modelo de Funções de Green Diádicas (Belém-Baía do Guaiará)	67
Figura 5.5 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	
Modelo ITU-R P.1546 (Belém-Baía do Guaiará)	68
Figura 5.6 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	
Modelo ITU-R 1546-MILLINGTON (Belém-Baía do Guaiará)	70
Figura 5.7 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	5
Modelo ITU-R 1546-MILLINGTON & Modelo ITU-R P.1546 Suburbano (Belém-Baía do	
Guajará)	71

Figura 5.8 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	
Modelo do Espaço livre (Belém-Mosqueiro).	73
Figura 5.9 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	
Modelo Okumura-Hata (Belém-Mosqueiro)	74
Figura 5.10 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	
Modelo ITU-R P.1546 Suburbano (Belém-Mosqueiro)	75
Figura 5.11 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	
Modelo ITU R.1546-Millington (Belém-Mosqueiro).	76
Figura 5.12 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o	
Modelo ITU R.1546-Millington & Modelo ITU-R P.1546 Suburbano (Belém-Mosqueiro)	77

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Distribuição dos pontos medidos nas radiais.	
Tabela II - Resultado para o Modelo de Espaço Livre.	63
Tabela III – Resultado para o Modelo de Okumura-Hata	65
Tabela IV - Resultado para o Modelo de Traçado de Raios	
Tabela V - Resultado para o Modelo usando as Funções de Green Diádicas	67
Tabela VI - Resultado para o Modelo ITU-R P.1546 sem correções e com correções pa	ira área
suburbana, urbana e urbana densa	
Tabela VII - Resultado para o Modelo ITU-R P.1546 - Millington	70
Tabela VIII - Resultado para os modelos com menor erro com respeito aos dados medi	dos do
trajeto misto ITU-R 1546 Suburbano e ITU-R P.1546-Millington	72
Tabela IX - Resumo de todos os modelos usados nesta dissertação e os erros encontr	ados. 72
Tabela X - Resultado para o Modelo de Espaço Livre.	73
Tabela XI - Resultado para o Modelo de Okumura Hata Urbano e Suburbano	74
Tabela XII - Resultado para o Modelo ITU-R P.1546 Suburbano	75
Tabela XIII - Resultado para o Modelo ITU-R P.1546 - Millington	76

CAPITULO 1- INTRODUÇÃO

A presença dos serviços de radiodifusão tem-se estendido amplamente nos diferentes lugares do mundo, portanto torna-se importante o estudo da cobertura dos mesmos. Assim um dos serviços mais usados é a TV Digital, mesma que oferece melhor qualidade de imagem comparada com a TV Analógica. Este serviço, no caso de Brasil, está presente em 97% dos lares, como mencionam as estatísticas dadas pela Teleco [1].

Por questões de implantação da TV Digital considerou-se um período de transição, que deve durar de 10 a 15 anos, no qual as emissoras transmitirão simultaneamente dois canais de 6 MHz sendo um analógico e o outro digital [2]. Considerando que esta mudança se encontra em andamento em alguns estados do Brasil e no mundo, surge a necessidade de conhecer a propagação do sinal da TV Digital, sendo uma solução o uso de modelos de propagação que darão estimativas do valor da intensidade do campo elétrico.

Os modelos de propagação têm sido classificados em diversos tipos de grupos encontrados na literatura como: modelos empíricos [3], modelos de grande e pequena escala [4] e modelos determinísticos [5]. Neste trabalho será usada a classificação dada em [3], [5], que divide aos modelos em: modelos empíricos e modelos determinísticos, na faixa de frequência ultra-alta (UHF) 300 MHz-3000 MHz [4]. No caso dos modelos empíricos, que se limitam a alguns tipos de cenários, tem-se modelos muito usados para ambientes urbanos que dão resultados bastante aproximados como é o caso de Okumura-Hata [1], ITU-R P.1546 [6] e Millington para percursos mistos [7], entre outros. Por outro lado os modelos determinísticos se ajustam de forma mais flexível a diferentes tipos de cenários, assim, por exemplo, o Modelo de Traçado de Raios [4] [8], Modelo de Funções Green Diádicas [9], entre outros; todavia pelo detalhe dos cenários pode ter custo computacional elevado.

Como foi mencionado anteriormente, os modelos vão depender de parâmetros como: frequência, altura, distância, do cenário entre outros. No caso de trajetos mistos, tem-se desenvolvido alguns trabalhos, no caso terra-mar, [10], [11], [12], urbano-suburbano [13], floresta-cidade [14], isto para estudar o comportamento do sinal ao

passar pela área de transição, ou seja, ao passar de um meio para o outro, considerando as características elétricas diferentes.

Devido à diversidade de ambientes no Brasil e no mundo, nesta dissertação serão abordados dois cenários com características de trajeto misto (terra-água), Caso I: Belém-Baía do Guajará, Caso II: Belém-Mosqueiro, estes trajetos apresentam uma particularidade à distribuição de terra e água. O primeiro cenário está composto por 24% terra e 76% água, enquanto que o segundo cenário é 25% água e 75% terra. Para o primeiro caso, será desenvolvida uma campanha de medições para se obter os valores da intensidade de campo elétrico tanto sobre a terra como sobre a água; no segundo caso tem-se dados medidos unicamente sobre a terra, em ambos casos para o canal Digital 22. É importante mencionar que na literatura, têm-se medições em ambientes terra-mar como se menciona em [6], [13], [15], considerando várias faixas de frequências, mas não de terra-água doce. Os dados medidos serão comparados com modelos empíricos, determinísticos e o método proposto que é a combinação dos Modelos ITU-R P.1546-5 e Millington, que acompanha o fenómeno de reforço do sinal ao passar pela área de transição terra-água.

1.2. Estado da Arte

No caso de propagação de campo elétrico em percursos mistos de tipo terra-água, tem-se desenvolvido alguns trabalhos na literatura, dos quais serão mencionados os que mais se assemelham ao trabalho desenvolvido nesta dissertação.

Um primeiro caso corresponde a um trabalho de 2014, no qual foi desenvolvido um método de elementos finitos usando equações parabólicas. Foi usado um método analítico para comparar os dados numéricos, um modelo de raios híbrido usando Millington. Funciona para frequências nas faixas de LF (30-300 kHz), MF (300 kHz-3 MHz) e HF (3-30 MHz) para ondas eletromagnéticas polarizadas verticalmente.

A interface gráfica desta ferramenta permite introduzir o perfil do terreno, os parâmetros elétricos dos meios e os diferentes valores de refração. Os resultados apresentam coerência entre os dados calculados com o método numérico e os dados calculados com o método analítico. Foram apresentados percursos mistos (mar-terra-mar), onde se pode observar o Recovery Effect ao passar da terra para o mar [15].

Num segundo artigo são apresentados dados de medições da propagação de campo elétrico sobre o mar Mediterrâneo em 2013. As medidas foram realizadas em 10, 20 e 30 MHz na faixa de HF, comparando as mesmas com os modelos de King e Norton. Todavia, para considerar a mudança do sinal na área de transição terra-água foi adicionado o método de Millington. A antena transmissora foi colocada em terra e a antena de recepção, do tipo *loop*, foi instalada em um barco sobre o mar. A coleta dos dados de campo elétrico foi feita de maneira constante para uma onda polarizada verticalmente e os parâmetros elétricos foram medidos com equipamento para terra e água. Além disso, é avaliado se o decaimento do sinal varia com a distância (1/d) ou com o quadrado da distância (1/d²). Os resultados apresentaram o *"Recovery Effect"* para as três frequências. Para o caso de 10 MHz, apresenta-se coerência entre os dados calculados superestimam os dados medidos, fato que é atribuído à presença de uma duna de areia mesma que provoca difração que não foi considerada nos cálculos. [11]

Outro trabalho foi desenvolvido para radar na faixa HF usando o método de Millington para curtas distâncias (400 m) numa praia perto de Rotterdam, Holanda em 2014. Foram apresentadas medições para 13 e 25 MHz, em que os dados medidos apresentaram coerência com os dados calculados. [16].

Em outro trabalho foram apresentadas medições em percursos mistos no Japão com a finalidade de estudar o "*Recovery Effect*". Os percursos consideram terra-mar, onde o primeiro meio tem menor condutividade em relação ao segundo meio, nas faixas de frequência de MF e HF. Os dados calculados e medidos apresentaram coerência e se mostrou evidência experimental de acréscimo do sinal na área de transição de um meio para outro. [13]

Encontra-se ainda um trabalho no qual foi desenvolvida uma campanha de medições para percurso misto terra-mar, na faixa de UHF na Holanda e Inglaterra. O transmissor e o receptor estiveram fixos, portanto as medidas não foram feitas sobre o mar, somente na zona costeira. Foi utilizado o modelo da ITU-R P.1546, que não apresentou coerência entre os dados medidos e os calculados. Observou-se diferenças de até 20 dB, fato que os autores atribuíram pelas caraterísticas do terreno, que usando correções de altura das antenas o valor diminuía para 8 dB [17].

Deste modo, os quatro primeiros trabalhos foram desenvolvidos para frequências baixas nas faixas de LF, HF, MF nos quais se apresenta o "*Recovery Effect*" ao passar de terra para á agua. Neste trabalho o modelo desenvolvido e as medições foram para a frequência de 521 MHz, que está na faixa de UHF para o serviço de TV Digital. O modelo proposto é a combinação dos modelos ITU-R P.1546 e Millington para calcular a intensidade de campo elétrico de um percurso misto terra-água, além de seguir a mudança do sinal na área de transição dos dois meios. Apresentou-se um caso de medições na faixa de UHF considerando o modelo de ITU-R P.1546, que não considera o "*Recovery Effect*". Além disso, as medições não foram realizadas sobre o mar, todavia neste trabalho os dados foram medidos sobre a água doce.

1.3. Motivação.

O presente trabalho foi desenvolvido considerando a ampla presença de TV Digital nos lares Brasileiros, fato que torna importante conhecer a propagação do sinal de campo elétrico nos diversos ambientes geográficos que este país apresenta. Desta maneira, na cidade de Belém dadas as suas caraterísticas amazônicas e a presença de rios largos, considera-se um cenário relevante no estudo da propagação de campo elétrico. Devido a meios com diferentes características elétricas, o estudo do comportamento do sinal ao passar de um meio para outro se torna de interesse para aporte à literatura atual, já que a maioria de trabalhos em trajetos mistos terra-água, exibem medidas para frequências baixas na faixa de LF (*Low frequency*), HF (*High frequency*) e MF (*Medium frequency*)[11][15][16]. Portanto, precisa-se de um modelo para frequências na faixa de UHF considerando o *Recovery Effect* na área de transição terra-água. Além de se obter evidência experimental sobre a água doce, considerando que os outros trabalhos apresentam medidas sobre o mar.

Além disso, é necessário validar os modelos existentes na literatura com os dados medidos. Se não houver modelo que concorde com o trajeto misto tem que ser dada uma solução para aproximar os dados calculados aos dados medidos e os possíveis fenômenos que acontecem na borda dos dois meios. Tudo isso levando em consideração a importância dos modelos de propagação para o planejamento de novas áreas de cobertura e otimização das mesmas.

Assim, por exemplo, um caso de aplicação do uso de TV Digital na água é na Cidade de Belém do Pará, que possui um tráfego fluvial constante, pelo fato de haver pessoas que usam este serviço, tanto nos barcos como na borda do rio. Com isso, tornase importante o estudo e análises do comportamento do sinal em um trajeto misto.

1.4. Objetivos

Para o desenvolvimento desta dissertação tem-se o objetivo geral e os objetivos específicos.

Objetivo Geral

• Modelar a intensidade de campo elétrico para trajetos mistos, caso terraágua, na faixa UHF para TV digital.

Objetivos Específicos

- Realizar uma campanha de medições, na qual conste de pelo menos três radiais.
- Tratar os dados da potência recebida, convertendo-os para campo elétrico.
- Aplicar modelos tanto de natureza empírica como determinística, para avaliar os dados medidos no trajeto misto e determinar qual modelo apresenta o menor erro RMS.
- Propor um método para calcular a intensidade do campo elétrico em trajetos mistos de tipo terra-água, considerando o fenômeno de aumento do sinal que se apresenta na área de transição dos dois meios.
- Simular os dados para a água, da campanha de medições Belém-Mosqueiro, na qual se tem unicamente dados em terra.
- Apresentar os resultados de: (Caso I) Belém-Baía do Guajará que apresenta maior presença de água (76%), que de terra (24%), e (Caso II) Belém-Mosqueiro com maior presença de terra (75%) que de água (25%).

1.5. Contribuições

As principais contribuições desta dissertação são:

- Combinação dos Modelos ITU-R P. 1546 Millington para o cálculo de intensidade de campo elétrico em trajetos mistos.
- Evidência experimental e calculada da presença do "*Recovery Effect*", ao passar de um meio com menor condutividade a um meio com maior condutividade, na frequência de 521 MHz.
- Avaliação do comportamento do sinal em trajetos mistos com diferentes modelos de propagação da literatura, sendo estes de natureza empírica e determinística.

1.6. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, cuja organização é mostrada a seguir:

- No Capitulo 1 foi desenvolvida a introdução desta dissertação.
- No Capitulo 2 são mostrados os conceitos e fórmulas de fundamentos rádio elétricos utilizados nos cálculos para os modelos.
- No Capitulo 3 há uma abordagem dos modelos de propagação da literatura, tanto de natureza empírica como de natureza determinística.
- No Capitulo 4 são mostradas a metodologia da campanha de medições e do tratamento de dados, além de ser mostrada a combinação dos Modelos ITU-R P. 1546 e Millington.
- No capitulo 5 são mostrados os resultados das medições, comparando os com diferentes modelos de propagação da literatura. O erro RMS também é apresentado.
- No capitulo 6 são apresentadas as conclusões desta dissertação, considerando os resultados e os objetivos propostos.

CAPITULO 2- FUNDAMENTOS RADIOELÉTRICOS

2.1. Considerações iniciais

Neste capítulo serão descritos conceitos de parâmetros importantes nos enlaces radioelétricos, tais como: ERP, EIRP, potência recebida, azimute, antena isotrópica, dipolo de meia onda. Os mesmos serão usados no desenvolvimento dos capítulos posteriores.

2.2. Potência irradiada isotrópica efetiva (EIRP)

A potência irradiada isotrópica efetiva (*Effective Isotropic Radiated* - EIRP) é definida como o produto da potência ministrada (Pt) para a antena, o ganho em relação a uma antena isotrópica (gt_{iso}) e a eficiência da linha de transmissão(E_f), como se mostra na seguinte equação:

$$EIRP = Pt. gt_{iso}. E_f$$
(1)

Representa a potência irradiada máxima disponível de um transmissor na direção do ganho máximo da antena, em comparação com um radiador isotrópico.

2.3. Potência irradiada efetiva (ERP)

A mais usada é a potência irradiada efetiva (*Effective Radiated Power* - ERP) para indicar a potência irradiada máxima comparada com uma antena bipolar de meia onda. Portanto, é definida como o produto da potência ministrada para a antena (Pt), o ganho máximo da antena em relação a um dipolo de meia onda (gt_d) e a eficiência da linha de transmissão(E_f) [3] [4].

$$ERP = Pt. gt_d. E_f$$
(2)

2.4. Campo em condições de espaço livre

Antena isotrópica

Antena isótropa é uma antena fictícia, que não é possível de ser construída fisicamente, que radia com a mesma intensidade em todas as direções. Sua radiação

carece de polarização. Embora seja um elemento abstrato é muito utilizado como elemento de referência.

O campo, a certa distância, pode ser calculado considerando a potência isotrópica radiada efetiva (EIRP) de uma estação transmissora:

$$e\left(\frac{mV}{m}\right) = 173,2\frac{\sqrt{EIRP(KW)}}{d(Km)}$$
(3)

Onde:

- e: Campo elétrico.
- EIRP: Potência isotrópica radiada efetiva.
 - d: Distância.

Dipolo elementar infinitesimal

Antena com polarização linear simples. Formada por dois condutores com excitação central simétrica, sendo o comprimento total pequeno em comparação com o comprimento da onda de radiação.

$$e\left(\frac{mV}{m}\right) = 173,2\frac{\sqrt{Pt(KW) \cdot 3/2}}{d(Km)}$$

Onde:

- *e*: Campo elétrico.
- P_t : Potência de transmissão.
- d: Distância.

Portanto se deduz que o ganho da antena isotrópica do dipolo elementar é $g = 1,5 \ sen^2\theta$, sendo que na direção do ganho máximo é g = 1,5 ou G = 1,76 dB.

Dipolo de meia onda

É uma antena sintonizada, que tem um comprimento teórico igual à metade do comprimento de onda. O campo é obtido em função da potência e da distância:

(4)

$$e\left(\frac{mV}{m}\right) = 222\frac{\sqrt{Pt(KW)}}{d(Km)}$$
(5)

Onde:

- e: Campo elétrico.
- P_t : Potência de transmissão.
- d: Distância.

Comparando as equações 5 com 3, o ganho do dipolo de $\lambda/2$ (meia onda) com respeito a antena isotrópica é $g = 1,5 \ sen^2\theta$, sendo que na direção do ganho máximo é g=1,5 ou G = 2,15 dB.

Em aplicações de radio difusão e televisão são usadas antenas derivadas do dipolo de $\lambda/2$ tais como painéis, antenas yagis, etc.

Portanto o campo considerado em um ponto (θ, φ) dado por uma antena, com o ganho do dipolo $\lambda/2 (gt_d)$ é [3][4]:

$$e(\theta, \phi) \left(\frac{mV}{m}\right) = 222 \frac{\sqrt{Pt(KW).gt_d(\theta, \phi)}}{d(Km)}$$
(6)

Onde:

- e: Campo elétrico.
- P_t : Potência de transmissão.
- gt_d : Ganho da antena em relação ao dipolo de meia onda.
- d: Distância.

Considerando os ganhos com referencia as diferentes antenas na direção do ganho máximo, tem-se:

O ganho com relação a uma antena isotrópica (dBi) do dipolo elementar infinitesimal:

$$GdBi = Ge + 1,76 \tag{7}$$

Onde Ge é o ganho do dipolo elementar infinitesimal.

O ganho em dBi do dipolo $\lambda/2$:

$$GdBi = Gd + 2,15 \tag{8}$$

Onde Gd é o ganho do dipolo de meia onda.

Portanto:

$$EIRP = ERP + 2,15 \tag{9}$$

2.5. Azimute

Ângulo formado pelo vetor norte magnético da Terra e a orientação da antena. A precisão requerida do azimute depende do padrão de radiação da antena. Se o lóbulo é muito largo, por exemplo, 90 graus entre os pontos da metade da potência, um erro de 10 graus não tem consequências significativas. Todavia com antenas diretivas, precisase muita exatidão para calcular o azimute. É importante considerar que a orientação da antenação da antena pode fazer a diferença na configuração do circuito. [18]

2.6. Potência recebida

Denomina-se potência recebida, em um enlace de radiocomunicação, a potência disponível nas bordas de uma antena adaptada. Considerando uma antena receptora com uma superfície de recepção equivalente (A_{eq}) , e posicionada em um ponto no qual a intensidade de campo elétrico (*e*) e a densidade de fluxo de potência (ϕ), a potência recebida (*Pr*) é:

$$Pr = \phi. A_{eq} \tag{10}$$

Escrevendo ϕ em função do campo:

$$Pr = \frac{e^2}{120\pi} A_{eq} \tag{11}$$

Para uma antena isotrópica, tem-se:

$$Pr = \frac{e^2}{120\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{12}$$

A equação 12 em forma logarítmica é dada por:

$$10 \log(\Pr) = 20 \log(e) + 20 \log(\lambda) - 10 \log(480\pi^2)$$
(12.a)

$$Pr(dBW) = E(dB\mu) - 20logf(MHz) - 107,2$$
 (12.b)

$$Pr(dBm) = E(dB\mu) - 20logf(MHz) - 77,2$$
 (12.c)

Para calcular o campo elétrico (dBuV/m):

$$E(dB\mu) = Pr(dBm) + 20logf(MHz) + 77,2$$
 (13)

Para uma antena arbitrária, de ganho com relação a uma antena isotrópica, tem-se:

$$Pr = \frac{e^2}{120\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot gr_{iso}(W)$$
(14)

A equação 12 em forma logarítmica é:

$$Pr(dBW) = E(dB\mu) - 20logf(MHz) - 107,2 + G_{iso}$$
(14.a)

$$Pr(dBm) = E(dB\mu) - 20logf(MHz) - 77,2 + G_{iso}$$
(14.b)

Para calcular o campo elétrico (dBuV/m):

$$E(dB\mu) = Pr(dBm) + 20logf(MHz) + 77,2 - G_{iso}$$
(15)

Giso faz referência ao ganho em dBi.[3]

Campo elétrico (*e minúsculo*) em unidades de V/m e λ em metros, a potência recebida é obtida em unidades de Watts.

A potência recebida pode se expressar também como:

$$Pr = \frac{Ptgtgr\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} (W)$$
(16)

Onde:

Pt Potência de transmissão.

- gt: Ganho da antena transmissora.
- gr Ganho da antena receptora.
- λ : Comprimento de onda.
- d : Distância.

Expressão válida para antenas separadas do solo e qualquer meio de propagação.

O campo elétrico recebido, calcula-se como:[4]

$$|e| = \sqrt{\frac{Pr.\,120\pi}{gr\lambda^2/4\pi}}\tag{17}$$

Onde:

- e: Campo elétrico
- Pr: Potência de recepção.
- gr: Ganho da antena receptora.
- λ : Comprimento de onda.

2.7. Considerações finais

Foram descritas as fórmulas e a maneira de aplicá-las, descrevendo os parâmetros e as unidades que precisam ser usadas, dando ênfase para diferenciar se os parâmetros a serem calculados são com relação a uma antena isotrópica ou a uma antena de dipolo de meia onda. Com estes dados, facilita-se o entendimento e cálculo dos Modelos de Propagação, que serão descritos no capítulo seguinte.

CAPITULO 3 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO

3.1. Considerações iniciais

O estudo da propagação de ondas pode-se realizar partindo das equações de Maxwell considerando soluções compatíveis com as condições de contorno do meio. Este tipo de estudo pode se tornar complexo, portanto são usados outros métodos como modelos baseados em ótica geométrica, modelos que usam expressões empíricas ou curvas de propagação que são normalizadas, obtidas de medições.

As características da propagação da onda dependem dos seguintes fatores: trajeto, obstáculos, características elétricas do terreno, propriedades físicas do meio, frequência e polarização. [3]

Devido aos diferentes cenários que são encontrados na literatura, tem-se uma ampla gama de modelos de propagação com a finalidade de aproximar a área de cobertura de diferentes serviços tais como: telefonia celular, televisão, rádio, entre outros.

3.2. Classificação dos modelos de propagação

Como foi mencionado devido aos diversos tipos de ambientes que existem, temse desenvolvido diferentes métodos para calcular a intensidade media do sinal medido a uma distância determinada do transmissor. Têm-se várias classificações dos modelos, sejam modelos de larga ou pequena escala [4], modelos *indoor* ou *outdoor* [5] entre outros. Neste trabalho serão classificados como modelos determinísticos e modelos Empíricos.

• Modelos Determinísticos:

Modelos determinísticos consideram o modelo físico exato do meio de propagação, portanto a geometria do meio tem de ser levada em consideração, com a finalidade de entender os fenómenos físicos que se apresentam na propagação do campo elétrico. Todavia isto implica complexidade do ponto de vista computacional, mas fornece maior exatidão nos valores da intensidade do sinal [19][20]

• Modelos Empíricos:

Estes modelos são usados para determinar a cobertura em terrenos irregulares e de tipo urbano, nos quais é difícil modelar os obstáculos. Eles estão baseados em amplas campanhas de medições e uma posterior correlação das medidas, como características gerais que descrevem o meio de propagação. [3] [21]

Estes modelos são usados principalmente para os serviços de radiodifusão e de telefonia móvel. Os primeiros métodos foram apresentados em forma de ábacos e curvas de propagação normalizadas; mas na atualidade têm sido desenvolvidas versões que podem ser calculadas com ajuda de computadores.

A vantagem deste tipo de métodos é que são fáceis e rápidos de utilizar, embora a exatidão encontra-se comprometida [3][19]

A seguir serão descritos os modelos usados neste trabalho, dentro dos quais se tem modelos Empíricos e Modelos Determinísticos, que serão usados para realizar análises comparativas entre os dados medidos e os dados simulados por estes modelos.

3.3. Modelo de Propagação no espaço livre

O Modelo de Propagação no espaço livre é usado quando a linha de visada entre o transmissor e o receptor está liberada de obstáculos. Considerando que é um modelo de grande escala este modelo prevê que a potência diminui com o aumento da distância de separação entre transmissor e receptor.

A equação para calcular a potência recebida também conhecida como fórmula de *Friss* para o espaço livre, é dada pela seguinte expressão [4][22]:

$$p_r(d) = \frac{p_t g_t g_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \tag{18}$$

Onde:

 p_t : Potência transmitida.

 $p_r(d)$: Potência recebida.

 g_t : Ganho antena transmissora.

 g_r : Ganho antena receptora.

- λ : Comprimento de onda (c/f) c=velocidade da luz f=frequência
- *d* : Distância de separação entre transmissor e receptor (m).
- *L* : Fator de perda do sistema relacionado a propagação $L \ge 1$

Em forma logarítmica a equação pode ser expressa como:

$$P_r(d) = P_t(dB) + G_t(dB) + G_r(dB) + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) - L \qquad dB$$
(19)

Onde os parâmetros estão em dB e potência recebida será calculada em dB.

Por outro lado, se for requerido o cálculo da atenuação, tem que se subtrair a potência recebida da potência transmitida em dB ou seja: $Atenuação(dB) = P_r(dB) - P_t(dB)$

Um caso geralmente aplicado para o cálculo da atenuação no espaço livre, é o uso da antena isótropa, portanto esta perda básica de transmissão no espaço livre (P_{el}) em função da frequência é dada por [23]:

$$P_{el} = 32,4 + 20\log(f) + 20\log(d) \qquad dB$$
(20)

Onde:

f : Frequência em MHz.

d : Distância em Km

3.4. Traçado de dois Raios

Uma onda plana uniforme pode ser interpretada como um raio propagando-se, sempre que o ponto de observação esteja suficientemente afastado da fonte. Considerando que a onda pode ser caraterizada por uma das componentes de seus vetores campo elétrico, campo magnético, por seu número de onda complexo ou pela direção de propagação [8].

Para a determinação aproximada da propagação da onda em altas frequências para campos incidentes, refletidos e refratados se usa o método da Óptica Geométrica.

A Óptica geométrica determina que o transporte de energia entre dois pontos em um meio sem perda é conseguido através do uso da conservação do fluxo de energia em um conjunto de raios, referido como tubo de raios [24].

Para o caso de trajeto misto da presente dissertação, estudam-se os raios em superfícies homogêneas, tanto na terra como na água. Portanto se mencionará informação com respeito à reflexão.

<u>Reflexão</u>

Se a onda de raio se propaga em dois meios com propriedades elétricas diferentes, a onda é parcialmente refletida e parcialmente transmitida. A intensidade do campo elétrico da onda transmitida e refletida pode ser relacionada a onda original incidente no meio através do coeficiente de reflexão de Fresnel(Γ), mesmo que dependa das propriedades do material, da polarização da onda, ângulo de incidência e frequência da onda em propagação

Nas Figuras 3.1a, 3.1b, a seguir, mostra-se uma onda eletromagnética com um ângulo incidente (θ_i) com o plano que é o limite dos dois meios, um ângulo de reflexão (θ_r) e de refração(θ_t), portanto a onda foi refratada e refletida. No caso da Figura (a), a polarização do campo elétrico é paralela ao plano de incidência, ou seja, tem polarização vertical. Na Figura (b), a polarização do campo E é perpendicular ao plano de incidência, ou seja, a polarização é horizontal [4]. Além são mostradas a permissividade (ε), permeabilidade (μ) e condutância (σ) dos dois meios. Os valores dos parâmetros elétricos para diferentes frequências podem ser encontrados na Recomendação ITU-R P.527. [25].



Figura 3.1 - Geometria para cálculo dos coeficientes de reflexão entre dois dielétricos: a) Campo no plano de incidência, b) Campo normal ao plano de incidência [4]

Para resolver os problemas gerais de reflexão, serão consideradas somente duas polarizações ortogonais, ou seja, o Campo E perpendicular e paralelo ao plano de incidência. Os coeficientes de reflexão são dados por:

Polarização vertical:

$$\Gamma_{\mathbb{H}} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 sen\theta_r - \eta_1 sen\theta_i}{\eta_2 sen\theta_r + \eta_1 sen\theta_i}$$
(21)

Polarização horizontal:

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 sen\theta_i - \eta_1 sen\theta_r}{\eta_2 sen\theta_i + \eta_1 sen\theta_r}$$
(22)

Onde:

 η_i : Impedância intrínseca do meio (i = 1,2), calculado com: $\sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}}$

Em geral a constante dielétrica é dada por $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ se o material dielétrico não tem perdas, caso contrário o material absorverá potência e a permissividade será expressa por $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r - j\varepsilon'$ onde $\varepsilon' = \frac{\sigma}{2\pi f}$ e ε_0 =8.85x10⁻¹² F/m.

Para o caso em que o primeiro meio é o espaço livre e $\mu_1 = \mu_2$, os coeficientes de reflexão podem ser simplificados para:

Polarização vertical:

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{-\varepsilon_r sen\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\varepsilon_r sen\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}}$$
(23)

Polarização horizontal:

$$\Gamma_{\perp} = \frac{sen\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\theta_i}}{sen\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\theta_i}}$$
(24)

No caso simples, considerando dois raios, o campo elétrico total será a soma dos raios do campo elétrico direto (E_i) e o raio do campo elétrico refletido (E_r) , como se observa na Figura 3.2:



Figura 3.2- Reflexão no solo com dois raios [4].

A equação usada para calcular o campo elétrico total a uma distância (d) quando esta se torna grande é:

$$|E_{TOTAL}(d)| = \frac{E_0 d_0}{d} \sqrt{2 - 2\cos\theta_{\Delta}}$$
(25)

Onde:

 E_0 : Campo E no espaço livre (V/m).

 d_0 : Distância de referência do transmissor propagando no espaço livre, d > d_0

 θ_{Δ} : Diferença de fase.

Por outro lado, usando o método das imagens, tem-se que h_t é a altura do transmissor, h_r representa a altura do receptor, d a distância entre transmissor e receptor, d' distância do raio direto, d'' é a soma das distâncias do raio incidente e o raio refletido. Como se observa na Figura 3.3



Figura 3. 3 - Método das imagens usado para calcular a diferença do caminho entre a linha de visão e os caminhos refletidos no solo [4].

Portanto, usando identidades trigonométricas a equação para calcular o campo elétrico poder ser escrita como [4]:

$$|E_{TOTAL}(d)| = \frac{E_0 d_0}{d} [1 + \Gamma \exp(-j\theta_{\Delta})]$$
(26)

Onde:

 E_0 : Campo E, no espaço livre (V/m).

- d_0 : Distância de referência do transmissor propagando no espaço livre, d > d_0 .
- θ_{Δ} : Diferença de fase, que pode ser calculada como: $\theta_{\Delta} \approx \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$

 Γ : Coeficiente de reflexão

3.5. Modelo Okumura Hata

Modelo usado para previsão de sinal em áreas urbanas para redes celulares. Tal modelo é valido para a faixa de frequência de 150 MHz a 1920 MHz, para distâncias entre 1 e 100 Km, para alturas de antenas da estação-base de 30 a 200 m e E.R.P (*Effective Radiated Power*) de 1 kW.

Okumura obteve curvas baseadas numa ampla campanha de medições efetuadas no Japão. Além das curvas, têm-se correções para os efeitos do terreno, tais como: inclinação do terreno, presença de obstáculos significativos, heterogeneidade do terreno (trajetos mistos terra/mar); além disso, há correções para a altura da antena receptora, potência radiada aparente, orientação das ruas e a densidade das edificações.

Hata desenvolveu expressões numéricas para as curvas normalizadas de propagação de Okumura incluindo as correções mais usadas nas radiocomunicações móveis. Usando regressão múltipla, se obteve uma série de expressões para calcular a perda básica de propagação para meios urbano, suburbano e rural sobre terreno pouco ondulado.

A fórmula fundamental para o meio urbano usada como referencia para os outros meios é a seguinte:

$$L_b = 69,55 - 26,16\log(f_{Mhz}) - 13,82\log(h_t) + a(h_r) - (44,9 - 6,55\log(h_t))(\log(d))^b$$
(27)

O valor de campo elétrico E (dBu) é obtido através de:

$$E = 69,82 - 6,16\log(f_{Mhz}) + 13,82\log(h_t) + a(h_r) - (44,9 - 6,55\log(h_t))(\log(d))^b$$
(28)

Onde:

- f: Frequência, MHz, na faixa $150 \le f \le 1500$ Mhz.
- h_t : Altura efetiva da antena transmissora (m), $30 \le h_r \le 200 m$.
- h_r : Altura sobre o solo da antena receptora (m), $1 \le h_r \le 10 m$.
- d : Distância (Km)

$$b = 1 \text{ se } d \le 20 \text{ Km}$$

$$b = 1 + (0.14 + 0.000187 f_{Mhz} + 0.00107 h_t) [\log(0.05d)]^{0.8},$$
(29)
se $d > 20$ Km

 $a(h_r)$ Representa o fator de correção para a altura da antena receptora em função do tipo de ambiente, se $h_r = 1,5m \ a(h_r) = 0$ para outros casos tem-se:

► Cidades pequenas e médias:

$$a(h_r) = (1,1\log(f) - 0,7)h_r - (1,56\log(f) - 0,8) \ dB$$
(30)

Cidades Grandes:

$$a(h_r) = 8,29 (\log(1,54 h_r))^2 - 1,1 \ dB, f \le 200 MHz$$
 (30.a)

$$a(h_r) = 3.2 (\log(11.754 h_r))^2 - 4.97 \ dB, f \ge 400 MHz$$
 (30.b)

Para áreas suburbanas com prédios de baixa altura e ruas largas a perda de propagação em dB é definida como:

$$L_{sub} = L_b - 2\left(\log\left(\frac{f(MHz)}{28}\right)\right)^2 - 5.4$$
 (31)

O valor de campo elétrico E (dBu) é:

$$E_{Sub} = 20 \log f_{MHz} + 139,15 - L_{bsub} \tag{32}$$

Para calcular o campo elétrico, deve-se considerar uma E.R.P de 1 kW equivalente a um E.I.R.P de 1633 kW, ou seja, 32.15 dBW, porque o dipolo de meiaonda possui uma diretividade de 1,633 (em relação a antena isotrópica). [5]

A perda total para áreas rurais, sem obstruções no entorno, é encontrada utilizando-se a equação abaixo: [3]

$$L_r = L_b - 4,78(\log(f_{MHz}))^2 + 18,33 \log(f_{MHz}) - 40,94$$
(33)

O valor de campo elétrico E (dBu) é:

$$E_{rural} = 20 \log f_{MHz} + 139.15 - L_r \tag{34}$$

Em caso de se utilizar uma E.R.P. diferente de 1 kW, deve-se fazer a correção pela potência, somando o valor da E.R.P. em dBkW.

3.6. Recomendação ITU-R P.1546-5

Este modelo definido pela União Internacional de Telecomunicações (ITU – *International Telecommunication Union*) é de natureza empírica. Apresenta-se como um conjunto de curvas de propagação normalizadas para predizer os valores de campo elétrico em enlaces terrestres ponto-multiponto na faixa de valores de frequência de 30 a 3000 MHz; para distâncias entre 1 km a 1000 km usando interpolação ou extrapolação.[3][6]

Estes padrões de curvas são para E.R.P. de 1 kW nas frequências nominais de 100, 600 e 2000 MHz para: percursos terrestres, mares quentes e frios; alturas das antenas da estação base (h1) de 10, 20, 37.5, 75, 150, 300, 600 e 1200 m; uma altura de 10 m para a antena receptora (h2) sobre o terreno e para valores 1%, 10%, e 50%, que representam a porcentagem de tempo excedido para atendimento [3].

Este modelo tem sido amplamente estudado e aplicado para diferentes ambientes, principalmente para áreas urbanas, suburbanas, rurais e trajetos mistos. Além disso, devido à faixa de frequências de aplicação, são usados para analisar a propagação de distintos tipos de serviços, em especial telefonia móvel e radiodifusão. Portanto, mencionam-se alguns casos da literatura, nos quais os dados preditos pela
recomendação são coerentes com os medidos: telefonia móvel em meios rurais na Austrália, na qual se usou a recomendação em sua versão 1546-2 [26], Televisão digital na cidade Thessaloniki na Grécia [27], Televisão digital no Brasil em distintas cidades como Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte e Brasília [28], não obstante em trajetos mistos na Holanda e no Reino Unido, o erro entre os dados medidos e os calculados foi significativo [17].

Considerando a aplicabilidade variada desta recomendação, a seguir, os parâmetros a serem considerados, para a aplicação desta recomendação são comentados.

3.6.1 Aspectos considerados para a aplicação da recomendação.

Para aplicar este modelo é necessário: determinar se o percurso é terrestre, mar frio, mar quente ou percurso misto (terrestre/marítimos). Além de aspectos como frequência, altura das antenas transmissora e receptora, distâncias, perfil de terreno, porcentagem de tempo. Adicionalmente, considerando as áreas para as quais se pretende simular o campo elétrico calcula-se algumas correções: correção por ângulo de visada, correção pela altura da antena receptora, correção pela presença de obstáculos entre transmissor e receptor, entre outras, que serão detalhadas mais adiante.

Por outro lado, no caso que os valores usados na campanha de medições, não coincidam com os valores das curvas da recomendação, tem que se realizar interpolações. Se for necessário interpolar para frequência, distância e altura da antena transmissora, primeiro se realiza a interpolação por frequência, com estes resultados se realiza a interpolação por distância e por ultimo a interpolação por altura da antena transmissora.

Seguem os processos de interpolação e parâmetros a serem utilizados na aplicação da recomendação detalhada em [6].

3.6.2. Porcentagem de tempo

Determinar se a porcentagem de interpolação é igual a: 1%, 10% ou 50%. Se não é igual a estes valores tem que se interpolar, portanto se buscam as curvas que possuem variabilidade temporal (VT) próximos aos que se desejam calcular, ou seja, uma curva com valor VT imediatamente superior e outra curva com VT imediatamente inferior.

Para fazer a interpolação com valores entre 1 % e 10% ou 10% e 50%, tem-se a seguinte fórmula:

$$E = \frac{E_{sup}(Q_{inf} - Q_t)}{(Q_{inf} - Q_{sup})} + \frac{E_{inf}(Q_t - Q_{sup})}{(Q_{inf} - Q_{sup})} \qquad dB(\mu V/m)$$
(35)

onde:

t: porcentagem de tempo para a predição requerida.

 t_{inf} : porcentagem de tempo nominal inferior.

 t_{sup} : porcentagem de tempo nominal superior.

$$Q_t : Q_t (t/100)$$

 Q_{inf} : $Q_t (t_{inf}/100)$

 Q_{sup} : $Q_t (t_{sup}/100)$

 E_{inf} : valor da intensidade do campo pra porcentagem de tempo t_{inf} .

 E_{sup} : valor da intensidade do campo pra porcentagem de tempo t_{sup} .

3.6.3. Frequência

Determinar se o valor da frequência é igual ao dado pelas curvas: 100 MHz, 600 MHz ou 2000 MHz. Caso contrário, necessita-se interpolar os valores, buscando-se as curvas que possuem a frequência próxima aos valores que se desejam calcular, ou seja, uma curva com valor de frequência imediatamente superior e outra curva com frequência imediatamente inferior. No caso em que as frequências sejam menores que 100 MHz ou maiores que 2000 MHz tem que se extrapolar.

Para fazer a interpolação com valores entre 100 MHz e 600 MHz ou 600 MHz e 2000 MHz, tem-se a seguinte fórmula:

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf})\log(f/f_{inf})/\log(f_{sup}/f_{inf})$$
(36)

onde:

 $\begin{array}{ll} f: & \text{frequência para a predição requerida (MHz).} \\ f_{inf}: & \text{frequência nominal inferior(100 MHz se } f < 600 MHz, se não 600 MHz).} \\ f_{sup}: & \text{frequência nominal superior(600 MHz se } f < 600 MHz, se não 2000 MHz).} \\ E_{inf}: & \text{valor da intensidade do campo pra } f_{inf}. \end{array}$

 E_{sup} : valor da intensidade do campo pra f_{sup} ;

3.6.4. Distância

Determinar se o valor da distância é igual ao dado pelas curvas, que são valores entre 1 Km e 1000 Km, nos anexos 2, 3,4 da recomendação [6].Se precisar usa-se a interpolação linear pelo logaritmo da distância.

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf})\log(d/d_{inf})/\log(d_{sup}/d_{inf})$$
(37)

onde:

d: distância para predição requerida (MHz).

 d_{inf} : distância mais próxima inferior a d.

 d_{sup} : distância mais próxima superior a d.

 E_{inf} : valor da intensidade do campo pra d_{inf} .

 E_{sup} : valor da intensidade do campo pra d_{sup} ;

3.6.5. Altura da antena transmissora

Altura de antena transmissora maior a 10 m

Se a altura da antena transmissora (h_1) é igual ou maior a 10 m, devem ser levados em consideração os seguintes casos:

- Percursos exclusivamente terrestres, com distâncias inferiores a 15 km.
- Percursos exclusivamente terrestres, com distâncias superiores a 15 km.
- Percursos exclusivamente marítimos.

A altura efetiva (h_{eff}), está representada na Figura 3.4, e o cálculo é feito através da seguinte equação:

$$h_{eff} = h_{bt} - NMT + h_a \tag{38}$$

onde:

$$h_{eff}$$
: altura efetiva da antena transmissora (m).

 h_{bt} : altura do terreno da antena em relação ao nível do mar (m). .

- *NMT*: nível médio do terreno em (m).
- h_a : altura da antena acima do solo (m).



Figura 3. 4 - Altura efetiva da antena transmissora [3].

Se d \leq 3 km

$$h_1 = h_a \tag{39}$$

Se 3 km \leq d \leq 15 km

$$h_1 = h_a + (h_{eff} - h_a)(d - 3)/12$$
(40)

Se d > 15 km

$$h_1 = h_{eff} \tag{41}$$

Em áreas onde houver obstruções que possam influenciar na propagação do sinal e diferenças de altura do terreno significativas, torna-se necessário a correção pelo cálculo do ângulo de desobstrução do terreno, analisado posteriormente. Comprovar se os valores de h_1 são iguais aos nominais: 10, 20, 37.5, 75, 150, 300, 600 ou 1200 m. Caso ele não seja igual, realizar interpolação ou extrapolação para valores entre 10 e 3000 m:

$$E = E_{inf} + \frac{\left(E_{sup} - E_{inf}\right)\log\left(\frac{h_1}{h_{inf}}\right)}{\log\left(\frac{h_{sup}}{h_{inf}}\right)} \qquad dB\left(\frac{\mu V}{m}\right)$$
(42)

onde:

- h_{inf} : 600 m se $h_1 > 1200 m$, ou a altura efetiva nominal mais próxima inferior a h_1
- h_{sup} : 1200 m se $h_1 > 1200 m$, ou a altura efetiva nominal mais próxima superior á h_1

 E_{inf} : valor da intensidade do campo pra h_{inf} na distância requerida.

 E_{sup} : valor da intensidade do campo pra h_{sup} na distância requerida

Altura da antena transmissora menor a 10m:

Para percurso terrestre:

Neste caso, a intensidade de campo elétrico para uma distância d km, quando a altura da antena transmissora está entre 0 e 10 m é:

 $0 \le h_1 < 10m$, usa-se a seguinte equação:

$$E = E_{zero} + 0.1h_1(E_{10} - E_{zero}) \qquad dB(\mu V/m)$$
(43)

onde:

$$E_{zero} = E_{10} + 0.5 (C_{1020} + C_{h1neg10}) \qquad dB(\mu V/m)$$
(43.a)

$$C_{1020} = E_{10} - E_{20} dB \tag{43.b}$$

 $E_{10} e E_{20}$: Intensidade de campo $dB(\mu V/m)$, dados pelas curvas para $h_1 = 10$ e $h_1 = 20$.

 $C_{h1neg10}$: Correção C_{h1} em dB, na distância requerida para $h_1 = -10$.

 C_{h1} : Correção por difração

Para calcular C_{h1} (correção por difração) tem que ser considerados os seguintes casos:

a)

Se tiver disponibilidade dos dados do terreno e a possibilidade de surgir descontinuidades na transição em torno de $h_1 = 0$. Calcula-se o ângulo efetivo de visada do terreno (θ_{eff1}); o mesmo que é calculado desde a antena transmissora como o ângulo de elevação de uma linha rasante a todos os obstáculos do terreno até uma distância de 15 km na direção da antena receptora. O valor deste ângulo de visada é positivo e substitui o valor de (θ_{tca}) dado pela equação 54.

b)

Se não tiver disponibilidade dos dados do terreno ou quando o método não tem que produzir descontinuidade na intensidade de campo na transição em torno a $h_1 = 0$. O ângulo efetivo de visada do terreno positivo (θ_{eff2}) pode ser estimado supondo uma obstrução de altura h_1 a uma distância de 9 km desde a antena transmissora. Nota-se que é usado para todas as longitudes do trajeto, ainda quando são menores de 9 km. Quer dizer que o terreno é considerado uma faca irregular na distância entre 3 e 15 km, desde a antena transmissora com valor meio em 9 km como se indica na Figura 3.5, Para a correção aplica-se com a seguinte fórmula:



Figura 3.5 - Ângulo de visada efetiva para h1 < 0 [6].

$$C_{\rm h1} = 6,03 - J(v) \tag{44}$$

Onde:

$$J(v) = \left[6.9 + 20\log\left(\sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + v - 0.1\right)\right] para v > -0.7806$$
(44.a)

$$J(v) = 0 \text{ para outros casos}$$
(44.b)

$$v = K_v \theta_{eff2} \tag{45}$$

$$\theta_{eff2} = \arctan(-\frac{h_1}{9000}) \quad graus \tag{46}$$

$$K_v = 1,35$$
 para 100 MHz (47.a)

$$K_v = 3,31$$
 para 600 MHz (47.b)

$$K_{\nu} = 6 \qquad \text{para 2000 MHz} \qquad (47.c)$$

As correções c_{1020} y $c_{h1neg10}$ são quantidades negativas.

3.6.6. Trajeto Misto

Calcula-se o campo para o trajeto da terra e o trajeto no mar separadamente considerando primeiro como se todo o trajeto fosse terra e depois como se todo fosse mar.

Para calcular o campo, tem-se:

$$E = (1 - A).E_{land}(d_{total}) + A.E_{sea}(d_{total})$$
(48)

O fator de interpolação do trajeto misto A, é dado por:

$$A = A_0 (F_{sea})^V \tag{49}$$

Onde F_{sea} é a fração total do percurso que se encontra sobre a água, ou seja:

$$F_{sea} = \frac{d_{ST}}{d_{total}} \tag{50}$$

Onde d_{ST} é o comprimento total do enlace que se encontra sobre a água e d é o comprimento total do enlace.

$A_0(F_{sea})$ é o fator de interpolação básico apresentado na Figura 3.6:



Figura 3.6 - Fator de interpolação básico, A₀, para propagação mista [6].

Este fator é definido analiticamente por:

$$A_0(F_{sea}) = 1 - (1 - F_{sea})^{2/3}$$
(51)

V calcula-se com a seguinte expressão:

$$V = max \left[1.0, 1.0 + \frac{\Delta}{40.0} \right]$$
(52)

Sendo:

$$\Delta = E_{sea}(d_{total}) - E_{land}(d_{total})$$
(53)

3.6.7 Correção do Ângulo de Visada do Terreno

Para ter uma estimação com maior precisão no receptor, o ângulo de visada do terreno θ_{tca} é calculado como:

$$\theta_{tca} = \theta \qquad graus \tag{54}$$

onde:

 θ é o ângulo de elevação da linha que, com origem na antena receptora, é tangencial aos obstáculos até uma distância de 16 Km, mas não indo além da antena transmissora de base, como mostra-se na Figura 3.7



Figura 3. 7- Ângulo θ [29]

Quando se calcula θ , não se considera a curvatura da Terra. O valor de θ_{tca} não tem que ser inferior a + 0,5 graus ou superior á + 40,0 graus.

Se estiver disponível a informação do ângulo de visada do terreno, a correção se calcula com a seguinte fórmula.

$$Correção = J(v') - J(v) \qquad dB \qquad (55)$$

Onde J(v) obtém-se com a equação (44.a):

$$v' = 0,036\sqrt{f} \tag{56}$$

$$v = 0,065\theta_{tca}\sqrt{f} \tag{57}$$

 θ_{tca} : ângulo de visada do terreno (graus)

f: frequência requisitada (MHz)

A variação da correção para as frequências nominais do ângulo de visada do terreno θ_{tca} , pode ser observado na Figura 3.8:



Figura 3.8- Correção em função do Ângulo de visada do terreno (θ_{tca}) [6].

3.6.8. Correção pela altura da antena receptora

As alturas do terreno de referência usadas nesta recomendação são: 20 m para zona urbana, 30 m para zona urbana densamente habitada e 10 m para uma zona suburbana. Em trajetos marítimos o valor teórico é: R_2 é 10m.

Considera-se o ângulo de elevação do raio incidente, calculando uma altura representativa dos obstáculos do redor modificada, $R_{2'}$, dada por:

$$R_{2'} = (1000dR_2 - 15h_1)/(1000d - 15) \qquad m \tag{58}$$

Onde h₁ e R₂ são expressos em metros e a distância horizontal d em Km.

Considera-se que para $h_1 < 6.5d + R_2$, $R_2 \approx R_{2'}$.

O valor de $R_{2'}$ tem que se maior a 1 m.

Quando a antena receptora está num entorno urbano, a correção é a seguinte:

Correção =
$$6,03 - J(v)$$
dBpara $h_2 < R_{2'}$ (59.a)Correção = $Kh_2\log(h_2/R_{2'})$ dBpara $h_2 \ge R_{2'}$ (59.b)

Onde J(v), obtém-se mediante a equação (44.a),

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{diff} \theta_{clut}}$$
(59.c)

$$h_{diff} = R' - h_2 \qquad m \tag{59.d}$$

$$\theta_{clut} = arctg(h_{diff}/27)$$
 graus (59.e)

$$K_{h2} = 3,2 + 6,2\log(f) \tag{59.f}$$

$$K_{nu} = 0,0108 \sqrt{f}$$
 (59.g)

f: Frequência (MHz)

Quando a antena receptora está situada em um terreno rural ou aberto, a correção é calculada com a equação 59. b para todos os valores de $h_2 \operatorname{com} R_{2'}$ fixa em 10 m.

Correção no mar

No caso em que a antena receptora esteja no mar o junto ao mar sem obstáculos de importância, tem-se dois casos:

- h₂ ≥ 10 m a correção calcula-se com a equação (59.b) como R_{2'} fixa em 10m.
- h₂ < 10m deve-se calcular como um método baseado em comprimentos de trajeto para os quais a superfície do mar libera 0,6 da primeira zona de Fresnel (D₀₆).

$$D_{06} = \frac{D_f \cdot D_h}{D_f + D_h}$$
(60)

Onde:

Término dependente da frequência.					
Igual a 0,0000389 fh_1h_2 km.					
Término assintótico definido pelas distâncias ao horizonte.					
Igual a 4,1 $(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ km.					

f: Frequência em MHz

 h_1, h_2 : Alturas das antenas acima do terreno (m).

Nas equações anteriores, $h_1 \ge 0$ e $D_{06} \ge 0,001$ km.

A distância na qual o trajeto teria visada direta de 0,6 da primeira zona de Fresnel para o valor de h_1 e para $h_2 = 10m$, d_{10} , calcula-se com $D_{06}(f, h_1, 10)$.

Se a distância é igual ou maior que d_{10} , a correção do valor de h_2 tem que se calculado usando a equação (59b) com $R_{2'}$ fixa em 10 m.

Se a distância é inferior a d_{10} , a correção é obtida com estas fórmulas:

$$Correção = 0,0 \qquad dB \qquad para \ d < d_{h2} \qquad (61.a)$$

$$Correção = (C_{10})\log(d/d_{h2})/\log(d_{10}/d_{h2}) \qquad dB \qquad para \ d_{h2} < d < d_{10} \qquad (61.b)$$

Onde:

- C_{10} : Correção para o valor de h_2 com a distância d_{10} usando a equação 37b. com $R_{2'}$ fixa em 10 m
- d_{10} : Distância na qual o trajeto tem justamente visada direta de 0,6 da primeira zona de Fresnel para $h_2 = 10 m$ calculada com $D_{06}(f, h_1, 10)$.
- d_{h2} : Distância na qual o trajeto tem justamente de 0,6 da primeira zona de Fresnel para o valor requerido da h_2 , calculada com $D_{06}(f, h_1, h_2)$.

3.6.9. Correção pela potência efetivamente irradiada

A recomendação foi feita para um potência irradiada efetiva (ERP) de 1kW, deste modo é imprescindível fazer a correção da potência, se está e diferente á dada pela recomendação[3].

Para calcular a ERP máxima aplica-se a seguinte equação: [4]

$$ERP = P_T G_T E_F \tag{62}$$

Onde:

P_T :	Potência de saída do transmissor, kW.
G_T :	Ganho da antena transmissora em vezes. (Transformar o ganho em dBd)
E_F :	Eficiência da linha de transmissão de transmissão.

A correção e dada em dB, portanto basta transformar o ERP em kW a dBkW.

$$Correção potência = 10 \log(ERP) \qquad dBkW \tag{63}$$

3.6.10. Distâncias inferiores a 1 km

Se a distância é menor ou igual a 0,04 Km a intensidade de campo é:

$$E = 106,9 - 20\log(d_{slope}) \quad dB(\mu V/m)$$
(64)

De outro modo:

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf})\log(d_{slope}/d_{inf})/\log(d_{sup}/d_{inf}) \quad dB(\mu V/m)$$
(65)

Sendo:

- d_{inf} : Distância no declive para d = 0,04 km.
- d_{sup} : Distância no declive para d = 1 km.

 E_{inf} : 106,9 - 20 log (d_{inf})

 E_{sup} : Intensidade de campo para d = 1 km, calculada usando a recomendação.

Para fazer a correção pela porcentagem de ubiquações, os detalhes estão disponíveis na recomendação. [6]

3.7. Funções de Green Diádicas

Funções de Green diádicas foram introduzidas por Hansen [30], são consideradas um instrumento valioso na resolução de problemas para fenômenos de espalhamento, radiação e propagação eletromagnética. Muitos estudos têm sido realizados considerando as características de radiação de antenas dipolo nos meios de comunicação em camadas [31] - [32].

Aplicando as funções de Green diádicas em autofunções para meios isotrópicos, este método é possível estabelecer uma formulação para calcular um modelo de meios anisotrópicos não-homogéneos de um modo menos complexo. Alguns estudos têm sido feitos para modelar um meio de quatro camadas considerando a anisotropia do meio [33] - [14].

Atualmente os sistemas de comunicações utilizados como TV digital, telefone celular e outros sistemas estão operando em frequências mais elevadas, por isso é necessário o uso de uma ferramenta matemática tais como as funções de Green diádica. Elas permitem considerar as características do meio e anisotropia para um melhor entendimento no planejamento e implementação destes sistemas.

A seguir serão mostradas as equações de campo elétrico usando funções de Green diádicas que serão usadas neste trabalho para o percurso na água. Tais formulações e equações podem ser visualizadas com mais detalhes em [9].

Para o percurso na água será considerado um meio de duas camadas. Este meio será mostrado em seguida.

Equação e Situação para o Percurso na Água

Para o percurso na água será utilizada a situação mostrada na Figura 3.9, um meio de duas camadas: 1) Meio 1: o ar, 2) Meio 2: água. O transmissor encontra-se no Meio 1 e o receptor também no Meio 1.



Figura 3.9 - Meio com duas camadas.

A equação usando a função de Green diádica para o cálculo do campo elétrico em um ponto \overline{R} no espaço para o percurso na água é dada por

$$\overline{E}_{\rm H}(\overline{R}) = -\frac{{\rm w}\mu_0\bar{p}}{4\pi} \int_0^\infty \frac{{\rm e}^{{\rm j}h_1{\rm z}_0}}{{\rm h}_1} \Big\{ [\bar{M}_{01\lambda}(-h_1) + {\rm a}\bar{M}_{01\lambda}(h_1)] + [\bar{N}_{e1\lambda}(-h_1) + {\rm b}\bar{N}_{e1\lambda}(h_1)] \frac{{\rm j}h_1}{{\rm k}_1} \Big\} {\rm d}\lambda$$
(66)

onde

$$k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}; \ k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_2 (1 + j \frac{\sigma_2}{\omega \varepsilon_2})}$$
(67)

$$h_1 = \sqrt{k_1^2 - \lambda^2}; \ h_2 = \sqrt{k_2^2 - \lambda^2}$$
 (68)

no qual

 ω é a frequência angular

 μ_0 é a permeabilidade magnética

 ε é a permissividade relativa do meio

 σ é a condutividade do meio

 λ é o comprimento de onda

(69)

 \bar{p} é o momento do dipolo elétrico

$$\overline{M}_{on\lambda}^{e}(h) = \left[\pm \frac{nJ_{n}(\lambda r)}{r} \frac{\sin(n\Phi \hat{r})}{\cos(n\Phi \hat{r})} - \frac{\partial j_{n}(\lambda r)}{\partial r} \frac{\cos(n\Phi \hat{\Phi})}{\sin(n\Phi \hat{\Phi})}\right] e^{jhz}$$

$$\overline{N}_{on\lambda}^{e}(h) = \frac{1}{k_{\lambda}} \left[jh \frac{\partial j_{n}(\lambda r)}{\partial r} \frac{\cos(n\Phi \hat{r})}{\sin(n\Phi \hat{r})} \mp \frac{jhn}{r} J_{n}(\lambda r) \frac{\sin(n\Phi \hat{\Phi})}{\cos(n\Phi \hat{\Phi})} + \lambda^{2} J_{n}(\lambda r) \frac{\cos(n\Phi \hat{r})}{\sin(n\Phi \hat{r})} \right] e^{jhz}$$
(70)

Nas equações (69) e (70), $\overline{M}_{on\lambda}(h)$ e $\overline{N}_{on\lambda}(h)$ são funções vetoriais em coordenadas cilíndricas usadas na equação (66) para o cálculo do campo elétrico (para mais detalhes visualizar [9]).

Sendo a, b constantes (omitidas aqui por conveniência), z_0 altura do transmissor e \overline{p} momento de corrente do dipolo horizontal considerado nesta situação.

3.8. Método de Millington

Millington oferece uma solução com respeito à propagação da onda-terrestre em meios heterogéneos, ou seja, considerando os parâmetros elétricos bem diferenciados em distintas secções como os casos de trajetos mistos: terra-água, área urbano-suburbano, floresta-cidade. Estabelece-se bem diferenciados, dado que se têm cenários onde as constantes eléctricas são diversas em cortas distâncias, nestas situações, opta-se por fazer uma media das constantes elétricas [7].

Analisando os efeitos do sinal ao passar pela borda entre dos meios, Millington sugere que ao passar de um meio com menor condutividade a outro que presenta maior condutividade, o sinal tem um reforço antes de se atenuar com as caraterísticas do segundo meio. O caso contraria ao que acontece quando o sinal cruza de um meio de maior condutividade para um meio de menor condutividade. Sendo que a explicação física está na redistribuição de energia na região de transição [7] [10] [11].

Millington previu o chamado "*Recovery Effect*" que acontece quando a onda passa sobre um limite de uma área de baixa condutividade para uma área de maior condutividade [12]. Este modelo não considera a fase do sinal, a parte experimental que se mostra em [10] foi efetuado no ano de 1950, em trajetos mistos terra-mar, para comprimentos de onda de 4 m e 100 m, ou seja, nas faixas de frequência de HF e MF, sendo que ambos os casos, teve-se a presença do *"Recovery Effect"*. Apesar de o autor ter colocado um cenário o mais homogêneo possível nos dois trajetos diferenciados (terra-água), menciona-se que devido à baixa frequência, logo depois da borda, não é muito visível o fenômeno de difração pelo desnível da terra e água, isto porque com o primeiro caso de medições com a onda de 4 m apresentou queda do sinal logo depois da borda a uns 0,5 km, caso que não aconteceu com a onda de 100 m. Pelo que fica visível que com frequências mais altas tem que se considerar uma possível difração na borda causada pelo desnível da terra para a água ou devido a obstáculos ao redor do mesmo. Embora a parte experimental fosse desenvolvida com um dipolo com polarização vertical, Millington indica que se pode usar antenas como polarização horizontal.

Na literatura atual, tem-se realizado campanhas de medições para trajetos mistos com a finalidade de validar o modelo, mesmo com os dados medidos em frequências nas faixas de (HF) e (MF), como se pode ver em [11], [12], [15], em que nestes trabalhos as interfaces foram terra e água do mar. Na literatura também tem o estudo de terra-terra, mas o primeiro caso é um urbano denso, e o outro suburbano e combinado com água nos quais também se observam as mudanças do sinal ao passar de um meio para outro como se indica em [13].

Como se tenha mencionado, o método de Millington estuda a propagação em um trajeto não homogêneo, ou seja, meios com caraterísticas elétricos diferentes. Para calcular o campo apresentam-se as seguintes equações [10] [15]:

$$E_D = \sum_{k=1}^{N} E_K(s_k) - \sum_{k=2}^{N} E_K(s_k - 1),$$
(71)

$$s_k = \sum_{n=1}^k d_n = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_{k_n}$$
(72)

$$E_R = \sum_{k=1}^{N} E_{N-k+1}(r_k) - \sum_{k=1}^{N-1} E_{N-k}(r_k),$$
(73)

$$r_k = \sum_{n=1}^k d_{N-n+1} = d_N + d_{N-1} + d_{N-1} + \dots + d_{N-k+1},$$
(74)

Onde E_D e E_R são os campos diretos usando os trajetos s_k do transmissor até o receptor, e os campos reversos usando os trajetos r_k do receptor até o transmissor. Estes

campos são usados para calcular o campo elétrico total no trajeto no homogêneo, que se calcula como segue [15]:

$$E_T = \frac{E_D + E_R}{2} \tag{75}$$

Devido a que em este trabalho, foram usados dois meios (terra-água) as equações para um trajeto misto se reduzem a:

$$E_D = E_1(d_1) - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2),$$
(76)

$$E_R = E_2(d_2) - E_1(d_2) + E_1(d_2 + d_1),$$
(77)

As distâncias d1 são do meio um e a d2 é do meio 2, como observa-se na Figura 3.10 :



Figura 3.10 – Trajeto misto com parâmetros elétricos diferentes para cada trajeto S1($\epsilon_1 \sigma_1$) e S2($\epsilon_2 \sigma_2$) [34].

3.9. Considerações finais

Neste capitulo foram descritos os modelos usados na presente dissertação para avaliar o comportamento da intensidade de campo elétrico em terrenos mistos no caso terra-água. Os modelos de propagação são de natureza empírica e de natureza teórica. Descreveram-se os parâmetros necessários para o cálculo do campo Elétrico, entre eles: altura das antenas transmissora e receptora, perfil do terreno, características elétricas dos cenários, potência de transmissão, correção de potência e correção de altura da antena transmissora. No próximo capitulo será descrito o cenário do trajeto misto.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA E COMBINACÃO DOS MODELOS ITU-R P.1546-5 – MILLINGTON.

4.1. Considerações iniciais

Neste capitulo serão descritos os cenários de terreno misto terra-água, sendo o caso I: Belém-Baía do Guajará e o caso II: Belém-Mosqueiro. Além disso, é descrita a campanha de medições e o tratamento dos dados, detalhando a maneira em que foram aplicados os modelos de Propagação.

4.2. Campanha de medições

As medições foram desenvolvidas na Cidade de Belém no mês de Março, considerando-se um trajeto misto entre a cidade de Belém e a Baía do Guajará. O transmissor está localizado nas coordenadas (01°27'43" S, 48°29'28" W) enquanto que os pontos de recepção foram distribuídos em três radiais, como se mostra na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Pontos de medição, trajeto misto Belém - Baía do Guajará.

Os dados foram coletados de forma continua, considerando que de outro modo o barco ficaria à deriva, e os dados não seriam coerentes à posição planejada. Os pontos de medição foram distribuídos como se mostra na Tabela I:

Tabela I - Distribuição dos pontos medidos nas radiais.						
Radial	Número de Pontos na	Distância total na terra	Número de Pontos na	Distância total		
	terra	(Km)	água	na agua (IXIII)		
Radial 1	7	1,67	100	5,007		
Radial 2	6	1,64	65	5,22		
Radial 3	6	1,62	55	3,56		

Foram medidos um total de 239 pontos dos quais 19 foram na terra e 220 na água, as duas primeiras radias têm um comprimento maior do que o comprimento da radial três.

4.2.1. Equipamento de medição

Transmissão

A coleta de dados foi realizada usando o canal digital 22 na cidade de Belém, tendo uma frequência central de 521 MHz. O modelo do transmissor é Toshiba TDU8087LB e sua potência de transmissão é de 6 kW. A antena transmissora é constituída por painéis de dipolos KATHREIN-WERKE KG modelo 759 16436 e omnidirecional, tem um ganho de 11,1 dBd, a altura sobre o terreno é de 114.58 metros, a polarização é horizontal e o diagrama de radiação se observa na Figura 4.2 . Além disso, a perda por cabos e conectores que conectam o transmissor e a antena é de 1,48 dB.



Figura 4.2 - Diagrama de Radiação no plano horizontal da antena transmissora.

Considerando os dados, pode-se inferir que a potência efetiva máxima irradiada usando a equação 1.15 (ERPmax) é de 52kW.

Recepção na Água

Para a coleta dos dados na recepção foi utilizado o analisador de espectro Site Master ANRITSU S332E, um GPS de modelo *GARMIN'S GPS 12 MAP Personal NavigatorTM*, uma antena de recepção de modelo Antena *Dipole HP651A* com ganho 0dBd, um computador portátil *Dell Inspiron* 5437 e um inversor para conectar os equipamentos. Todos os equipamentos foram instalados dentro do Barco Curupira da UFPA, Figura 4.3.



Figura 4.3 - Barco Curupira usado nas Medições

A antena receptora foi colocada sobre a coberta do barco e foi direcionada em cada ponto de recepção, de tal maneira que obtivesse a máxima potência de recepção. A altura sobre a água foi de 4 m, a montagem da antena sobre o barco se mostra na Figura 4.4.

A potência de recepção foi coletada em cada ponto de medição de forma continua, para se evitar que o barco ficasse a deriva. O Site Master foi configurado para mostrar a faixa de 518 MHz até 524 MHz, que são os 6 MHz de largura de banda do canal de TV, mas coletando os dados da potência recebida na frequência central de 521 MHz, cujos dados foram guardados na memória. As coordenadas do ponto medido foram tomadas paralelamente, tanto a latitude como a longitude com o GPS. Estas configurações são mostradas na Figura 4.5.



Figura 4.4 - Montagem da antena receptora



Figura 4.5 - Coleta de dados: potência de recepção no Site Master e as coordenadas de ubiquação com o GPS.

Recepção na Terra

Para a recepção na terra foram usados os mesmos equipamentos usados na campanha de medições sobre o rio, assim, Site Master para coletar a potência de recepção em cada ponto, em paralelo com as coordenadas dadas pelo GPS. A antena receptora foi colocada em um veículo a uma altura de 4 m sobre o solo, além disso, foi

direcionada em cada ponto de medição para se obtiver o valor máximo da potência de recepção. O inversor foi usado para conectar os equipamentos. As radiais na terra acompanham a direção das radiais na água, como se observa na Figura 4.1. Para observar os pontos de medição na terra, tem-se a Figura 4.6. Os pontos foram medidos em distâncias de 200 em 200 metros. Na radial 3, pelo fato de haver uma zona de difícil ingresso, o último ponto está mais afastado.



Figura 4.6 - Pontos medidos na terra O panorama do trajeto misto Belém Baía do Guajará pode ser visto na Figura 4.7.

Portanto, os equipamentos e a sua configuração é:

Transmissão

- Antena transmissora modelo *ATHREIN-WERKE KG* modelo 759 16436 e omnidirecional, altura de 114.58 sobre o solo e ganho de 11,1 dBd
- Transmissor modelo *Toshiba TDU8087LB*, potência de 6kW.
- Frequência canal 22 de largura de banda de 6 MHz, frequência central 521 MHz
- Perda conetores de 1,48 dB
- ERP de 52 kW



Figura 4.7 - Panorama do trajeto misto Belém Baía do Guajará

Recepção

- Antena receptora modelo *dipole HP651A* com ganho 0 dBd altura de 4 metros sobre o solo e sobre a água.
- Analisador de espectro, *Site Master ANRITSU S332E*, para medir a potência de recepção em dBm, na frequência de 521 MHz.
- GPS de modelo *GARMIN'S GPS 12 MAP Personal NavigatorTM*, para salvar as coordenadas de latitude e longitude dos pontos de medição.

4.3. Tratamento dos dados

Modelo ITU-R 1546-5

Os dados foram coletados por radias, sendo um total de três radias descritos na Tabela I. Para aplicar a recomendação ITU-R P. 1546 foi necessário extrair o perfil desde o transmissor até cada um dos pontos de medição do trajeto misto. Assim, por exemplo, na Radial 1, no caso do ponto 317 o perfil está composto de perfil misto desde o transmissor que são 0 km até o último ponto na terra, a uma distância de 1,67 km com a altura variando de 16 m até 2 metros. O trajeto continua na água que tem uma altura de 0 metro até a distância de 5,007 km, como se mostra na Figura 4.8. Este perfil foi extraído usando *Google Earth Pro*.



Figura 4.8 - Perfil do trajeto misto para o ponto 320.

Uma vez conhecidos os perfis dos pontos de medição se aplicou a recomendação ITU-R 1546-5 com os parâmetros apresentados na Figura 4.9 e que são descritos desta forma:

<u>Terra</u>

- Escolhem-se as curvas com as quais se realizaram as interpolações, assim no trajeto terrestre foram usadas as curvas para 100 MHz e 600 MHz em terra, com uma porcentagem de tempo de 50%.
- Calcula-se a altura efetiva da antena transmissora considerando o perfil do terreno.
- Interpolar com respeito a frequência, a distância do transmissor a cada ponto medido e a altura do transmissor. Desta maneira, obtém-se o valor do campo em cada ponto medido.
- Correção pela altura da antena receptora: depende se for considerada uma área urbana densa, urbana, suburbana ou rural. Considera-se nos três primeiros casos o efeito da difração por gume de faca.

- Correção devida ao ângulo livre de obstáculos
- Correção do ERP considerando o diagrama de radiação da antena e o azimute em cada ponto.

<u>Água</u>

- As curvas usadas para realizar as interpolações, correspondem ao mar quente com frequências de 100 MHz e 600 MHz na água com uma porcentagem de tempo de 50%.
- No caso da água, considera-se uma única altura efetiva para o transmissor porque a altura da água é zero.
- Neste caso a correção pela altura da antena receptora é zero, porque usando as equações 15 e 16, determinou-se que a distância dos pontos de medição é menor a 16,79 km, que é a distância liberada da primeira zona de Fresnel.
- Correção do ERP considerando o diagrama de radiação da antena e o azimute em cada ponto.

Trajeto misto

Para realizar o cálculo no trajeto misto, calcula-se o trajeto completo primeiro considerando tudo como água e depois como se tudo fosse terra. Como se observa na Figura 4.10.







Figura 4.10 - Esquema dos parâmetros considerados no calculo de E, usando ITU-R. 1546-5 caso I: Belém – Baía do Guajará

Aplicando ITU-R P.1546 para a radial 1, tem-se os seguintes gráficos: a Figura 4.11 é como se tudo fosse terra e a Figura 4.12, é como se tudo fosse agua.



Figura 4.11 - Radial 1 Campo calculado como se tudo fosse terra



Figura 4.12 - Radial 1 Campo calculado como se tudo fosse agua

Os cálculos dos trajetos como se o todo fosse terra e como se o todo fosse agua, foram aplicados nos três radiais. Como se observa na Figura 4.10 com estes dados aplicou-se a equação 48 para trajeto misto:

$$E = (1 - A). E_{land}(d_{total}) + A. E_{sea}(d_{total})$$

Onde a intensidade de campo elétrico para trajeto misto, considera o parâmetro de atenuação A que depende de Fsea mesmo que relaciona a distância sobre agua dst e a

distância total desde o ponto de transmissão até a ponto de recepção como se observa na Figura 4.13.



Figura 4.13 - Distâncias usada para aplicação do trajeto misto em ITU-R 1546-5.

Uma vez calculados os pontos das três radiais, os resultados foram unificados em anéis de 200 em 200 metros para ter uma área mais uniforme, desta forma ficaram 26 anéis, mas nem todos os anéis tinham pontos de medição, especialmente no trajeto da terra, além de que foram considerados só os pontos com distâncias maiores a 1 km, para comparar com os modelos na literatura. O total de anéis foi reduzido para 19.

Um exemplo de Anel, é o Anel 13 (A13) que compreende os pontos entre as distâncias de 2,4 km a 2,6 km, está formado por os pontos: 400 da Radial 1, 85 da Radial 2 e 290 da radial 3, mesmo que é ilustrado na Figura 4.14 a seguir.



Figura 4.14 - Formação de um Anel.

Dos 19 pontos calculados por anéis, somente o primeiro corresponde ao trajeto na terra, ou seja, os 18 pontos restantes correspondem ao trajeto sobre a água.

Combinação do Modelo ITU-R P.1546-5 e Millington

Caso I: Belém Baía do Guajará

O modelo da ITU-R P. 1546-5 não considera o "*Recovery Effect*" que acontece devido ao passo do sinal de um meio com condutividade mais baixa a um meio com condutividade mais alta como foi mencionado em [10], neste caso o trajeto misto terraágua onde a terra tem menor condutividade que á apresentada pela água. O Modelo de Millington é baseado em somas recursivas dos campos em sentido direto transmissorreceptor e sentido reverso desde o transmissor até o receptor, sempre que se disponham dos dois trajetos com caraterísticas elétricas diferentes.

Dado que o modelo da ITU-R P.1546-5 tem curvas com valores de intensidade de campo, tanto para mar como para terra, ou seja, dois meios com características elétricas diferentes, e uma vez aplicadas as correções de cada trajeto, no caso como se todo fosse água o como si todo fosse terra, então aplicam-se as somas recursivas propostas por Millington.

Considerando que se têm dois meios usam-se as equações (76), (77):

$$E_D = E_1(d_1) - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2),$$
$$E_R = E_2(d_2) - E_1(d_2) + E_1(d_2 + d_1),$$

Lembrando que o campo total é a média do campo direito e do campo reverso.

Na equação considerando E1(campo na terra) e E2(Campo na água) para d1+d2, se utilizam os dados como se todo o trajeto fosse terra ou água segundo seja o caso. Com estas considerações obtêm-se também os valores para E1(d1) e E2(d1) que é valor do ultimo ponto da terra. Para o caso E1(d2) e E2(d2), onde d2 e a distância do trajeto só na água, foi necessário calcular a intensidade de campo para distâncias inferiores a 1 km, nos primeiros pontos. No caso dos trajetos sobre água não se considerou perfil, portanto a altura da antena transmissora foi à altura efetiva da mesma que foi calculada em 122 m.

Na Figura 4.15 ilustram-se as distâncias d1 no caso para terra e d2 que é o trajeto sobre a água, para o ponto 400. Como se pode apreciar a distância d2 tem um valor inferior a 1 km.



Figura 4.15 - Distâncias para a formulação de Millington Caso: Belém-Baía do Guajará.

Este processo foi aplicado para cada ponto das três radias uma vez obtidos os resultados, também se unificaram em 19 anéis.

Caso II: Belém - Mosqueiro

Em Belém foi realizada uma campanha de Medições que compreende a Área Belém-Mosqueiro para o Canal de TV 22, da Record, portanto, têm-se as mesmas características de transmissão. Embora não foram realizadas medições no meio que corresponde a água, aplicou-se a combinação de ITU-R P.1546-5-Millington para simular os valores de campo na água, trajeto que se mostra na Figura 4.16.



Figura 4.16 - Trajeto Belém- Mosqueiro

Como no caso anterior se realizaram os cálculos usando a recomendação ITU- R. P. 1546-5 para o trajeto considerando como se tudo fosse mar e como se tudo fosse terra, mas este trajeto compreende maiores distâncias com respeito ao trajeto Belém-Baía do Guajará. Por esta razão, os anéis são de 500 em 500 metros, mas não são mostrados na Figura 4.16.

A intensidade de campo simulada com a combinação dos modelos ITU-R P.1546 e Millington corresponde ao trajeto sobre a água que tem um comprimento de 7 km.

Portanto, têm-se dois casos de estudo de trajeto misto: o primeiro tem um trajeto curto em terra, que representa 26% do trajeto, portanto a porcentagem da água é 74%; no segundo caso, tem-se o contrário 75% do trajeto na terra e 25% na água, como se observa nas Figuras 4.17 e 4.18:

Belém-Baía do Guajará no Radial 1 :



Figura 4.17 - Trajeto Belém-Baía do Guajará porcentagem de terra e água

Belém- Mosqueiro no Radial 1:

Os modelos usados nesta dissertação, para compará-los com os dados da intensidade de campo elétrico são: Okumura Hata, Funções de Green diádicas, Espaço livre, Traçado de raios, ITU-R 1546-5, ITU-R 1546-5-Millington. Tais modelos foram primeiro calculados para cada radial e depois unificados em anéis. A seguir os resultados para cada modelo e sua comparação gráfica e calculo de erro RMS em dB.



Figura 4.18 - Trajeto Belém-Baía do Guajará porcentagem de terra e água.

4.4. Considerações Finais

Mostraram-se os cenários onde o caso I apresentou 26% terra e 74% água, enquanto que o caso II tem 25% água e 75% terra. Foram apresentados mais detalhes para os modelos de propagação: Modelo ITU R P.1546, que apresentou correções de potência, de antena receptora; e a combinação de Modelo ITU-R 1546-Millington, que são os modelos que mais se adaptaram ao terreno misto como é mostrado no seguinte capítulo.

CAPITULO 5- RESULTADOS E ANÁLISE

5.1. Considerações iniciais.

Neste capítulo, apresenta-se a comparação dos modelos de propagação: Espaço livre, Okumura-Hata, Traçado de Raios, Funções de Green Diádicas, ITU-R P.1546, combinação de ITU -R P.1546-Millington. Para o primeiro caso todos os modelos são comparados com os dados medidos, no segundo caso são usados os que apresentaram maior coerência com o trajeto misto.

5.2. Caso I: Belém-Baia do Guajará





Figura 5.1 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados calculados com o Modelo do Espaço livre (Belém-Baía do Guajará).

Comparando os dados medidos como os dados simulados, obtêm-se os seguintes resultados:

Tabela II - Resultado para o Modelo de Espaço Livre.ModeloErro RMS [dB]Espaço livre15,97

O modelo do espaço livre não considera obstáculos no trajeto entre transmissor e receptor, por esta razão os resultados tem uma estimativa otimista com relação aos dados medidos, tanto para o trajeto em terra, que corresponde ao primeiro ponto, como para os dados na água, consequentemente o erro RMS é alto, um valor de 15,97 dB. Outra caraterística do modelo é que o mesmo cai com o quadrado da distância, comportamento que não é identificado nos dados medidos no trajeto da água. A atenuação da intensidade de campo dos dados medidos é menor à queda com quadrado da distância, com exceção de poucos pontos. Este comportamento dos dados calculados era esperado, devido a que o cenário onde foram realizadas as medições não tem visada direta, pela presença de prédios, além de ser um trajeto misto. Para adaptar-se as características urbanas do meio, utilizou-se o modelo de Okumura Hata.



5.2.2. Modelo Okumura Hata

Figura 5.2 – Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo Okumura-Hata (Belém-Baía do Guajará).

Comparando os dados medidos como os dados simulados obtêm os seguintes resultados como respeito ao erro:
Modelo	Erro RMS [dB]
Okumura Hata – Área urbana, cidades pequenas e	7 57
médias.	1,51
Okumura Hata – Área suburbana, cidades pequenas e	8 0/
médias.	0,74

Tabela III – Resultado para o Modelo de Okumura-Hata.

Os dados medidos estão distribuídos em 19 anéis, portanto se tem 19 pontos de campo elétrico medido. Os dados medidos do trajeto misto contêm um ponto na terra, mesmo que tem um valor de 89 dBuV/m. O modelo de Okumura Hata foi calculado para uma zona urbana e uma zona suburbana com parâmetros de uma cidade pequena e média considerando as características da cidade de Belém, também foi aplicada a correção de potência efetivamente radiada que corresponde a um valor de 17,16 dB. Ao comparar os dados calculados com os dados medidos no trajeto terrestre, os valores da intensidade de campo fornecidos por Okumura Hata se mostraram superiores, com relação aos dados medidos. Por outro lado, o fato de ter um campo medido baixo, apesar da proximidade ao Transmissor, é devido à presença de alguns edifícios entre a torre e os locais onde foram medidos os pontos. Por outro lado, como Okumura Hata é um modelo usado para trajetos terrestres, verifica-se que no caso de Okumura Hata, para uma área urbana, os pontos calculados para a água indicam valores inferiores com respeito aos dados medidos. Todavia, para o campo calculado com área suburbana, a partir dos 3,5 km apresentam coerência com os dados medidos. Isto ocorre por que o campo na água é maior ao campo medido na terra, pelo que alcança caraterísticas de meio suburbano sem obstruções significativas. Este modelo só considera características de um cenário em terra, então com a finalidade de atender as características de trajeto misto se usou o modelo de Traçado de Raios.

5.2.3. Modelo Traçado de dois Raios



Figura 5.3 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo de Traçado de dois Raios (Belém-Baía do Guajará).

Comparando os dados medidos como os dados simulados, obtêm-se os seguintes resultados:

Tabela IV - Resultado para o Modelo	de Traçado de dois Raios.
Modelo	Erro RMS [dB]
Traçado de dois Raios	26,95

Para realizar os cálculos com traçado de raios, foram usadas as características elétricas para 521 MHz. Desta maneira, para a terra, usaram-se os parâmetros de terra húmida com permitividade (30 F/m) e a condutividade (0,07 S/m). Enquanto que para a água foi considerada a permitividade (80 F/m) e a condutividade (0,005 S/m), que correspondem a água doce. Como se mostra na Figura 5.3, o valor da intensidade de campo elétrico do primeiro ponto calculado é 92,6 dBuV/m e o medido 89,6 dBuV/m , portanto o valor na terra é o mais acertado em comparação com os modelos anteriores, mas no caso de modelamento da água o modelo tem uma estimativa pessimista, tanto que o erro é elevado, 26,95 dB. Até aqui, os modelos não aproximam os valores do



5.2.4. Modelo Funções de Green Diádicas

Figura 5.4 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo de Funções de Green Diádicas (Belém-Baía do Guajará).

Comparando os dados medidos como os dados simulados obtêm os seguintes resultados:

Tabela V - Resultado para o Modelo usando as Funções de Green Diádicas.		
Modelo	Erro RMS [dB]	
Funções de Green Diádica calculadas (para água com trajeto	6 58	
maior a 2 km).		

As equações das Funções de Green Diádicas tem um melhor comportamento com grandes distâncias, por este motivo não foram simulados os pontos na terra, considerando que a distância em terra é menor a 2 km. Com esta limitação para trajetos curtos, simulou-se os pontos na água com as características elétricas para 521 MHz, de água doce, a permitividade (80 F/m) e a condutividade (0,005 S/m). Os dados calculados sobre a água se aproximam a partir dos 3,5 km. Os modelos antes mencionados, não modelaram o trajeto misto e apresentaram valores de erro elevados.

Então se opta por usar o modelo da Recomendação ITU-R P. 1546-5, que tem uma seção para trajetos mistos.



5.2.5. Modelo da Recomendação ITU-R P.1546-5

Figura 5.5 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo ITU-R P.1546 (Belém-Baía do Guajará)

Comparando os dados medidos como os dados simulados, obtêm-se os seguintes resultados:

Tabela VI - Resultado para o Modelo ITU-R P.1546 sem correções e com correções para áreasuburbana, urbana e urbana densa.

Modelo	Erro RMS [dB]
ITU-R P.1546 com correções Área Suburbana para trajeto misto terra-água	4,43
ITU-R P.1546 com correções Área Urbana para trajeto misto terra-água	7,98
ITU-R P.1546 com correções Área Urbana Densa para trajeto misto terra-água	10,88
ITU-R P.1546 sem correções	16,59

O modelo da ITU-R 1546, como se observa na Figura 5.5, foi calculado em primeira instância sem considerar nenhuma correção, ou seja, somente fazendo interpolação de frequência, altura, distância com as curvas de 600 MHz e 100 MHz para terra com uma porcentagem de tempo de 50%.

Nos casos de estudo de área (urbana densa, urbana e suburbana) foi aplicado, além das interpolações, correções de altura de antena receptora, ângulo de visada e ERP. Uma vez tratados os trajetos como se tudo fosse água e como se tudo fosse terra e aplicando as fórmulas para o trajeto misto, nota-se que na terra o valor mais próximo de intensidade de campo é o simulado para uma área urbana, apreciando que o suburbano tem uma estimativa otimista, o contrário acontece com o urbano denso que tem uma estimativa pessimista. Entretanto, para os pontos na água, o modelo que mais se aproxima é o modelo para área suburbana, atendendo que os outros dois casos mostramse com estimativas pessimistas, sendo que o erro mais baixo entre os modelos já apresentados é o descrito pelo modelo para trajetos mistos ITU R. P.1546-5 com 4,43 dB. O inconveniente com este modelo é que o mesmo não descreve o fenômeno de acréscimo da intensidade de campo na água como produto da transição dos meios, neste caso um meio com menor condutividade (terra) e um meio com maior condutividade (água). Analisando esta limitação, considera-se combinar o modelo da ITU R. 1546-5 com correções e o Modelo de Millington, que descreve o "Recovery Effect" que é o reforço do sinal ao passar a um meio como maior condutividade.

5.2.6. Modelo ITU-R P.1546-5-Modelo de Millington



Figura 5.6 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo ITU-R 1546-MILLINGTON (Belém-Baía do Guajará) .

Comparando os dados medidos como os dados simulados, obtêm-se os seguintes resultados:

Tabela VII -	Resultado	para o Modelo	ITU-R P.1546	- Millington.
--------------	-----------	---------------	--------------	---------------

Modelo	Erro RMS [dB]	
ITU-R P.1546 com correções e Modelo de Millington	3.07	
para trajeto misto terra-água	5,07	

A proposta de combinação de modelos é pelo fato de a recomendação ITU-R 1546-5 oferecer os valores de campo elétrico para dois meios com caraterísticas elétricas diferentes. Neste caso permite calcular a intensidade de campo, tanto na terra como na água para qualquer distância maior a 0 km e menor de 1000 km, aplicando correções nos trajetos para adaptar o sinal simulado ao cenário dos dados medidos. Consequentemente, como Millington propõe aplicar somas sucessivas dos valores de campo elétrico para o meio heterogêneo, obtém-se que o resultado descreve o reforço do sinal a partir dos 2,5 km. É importante mencionar que logo depois da borda, a partir de 1,7 km até 2,5 km, tem-se difração devido ao desnível entre terra e água e a presença de construções, no caso da radial 2 e radial 3 mais significativamente que afetam a onda de 0,5758 m, ou seja, frequências altas, como havia se mencionado em [11].

Todavia esta combinação de modelos apresentou a melhor coerência entre os dados medidos e os dados calculados, além de ter o menor erro RMS que é de 3dB, também se caracterizou o "*Recovery Effect*".

5.2.7. Comparação entre os modelos que mais se adaptam aos dados medidos



Figura 5.7 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo ITU-R 1546-MILLINGTON & Modelo ITU-R P.1546 Suburbano (Belém-Baía do Guajará).

Comparando os dados medidos como os dados simulados se obtêm os seguintes resultados:

Modelo	Erro RMS [dB]
ITU-R P.1546 com correções e Modelo de Millington	3,07
ITU-R P.1546 com correções Área Suburbana para trajeto misto	4,43

Tabela VIII - Resultado para os modelos com menor erro com respeito aos dados medidos dotrajeto misto ITU-R 1546 Suburbano e ITU-R P.1546-Millington.

Portanto, de todos os modelos de caráter determinístico e empírico usados, os modelos empíricos como é o caso de ITU-R 1546 e Millington apresentaram os melhores resultados, como se observa na Figura 5.7. O erro RMS no caso de ITU-R P.1546 foi 4,43 dB e o erro com combinação de modelos ITU-R P.1546 e Millington foi o mas baixo com 3,07 dB, sendo a melhor opção para simular os dados medidos em um trajeto misto.

Finalmente para o caso Belém-Baía no Guajará, apresenta-se a Tabela IX, com o resumo do erro RMS, entre os valores da intensidade de campo elétrico calculada com os diferentes modelos e os medidos . Sendo que o modelo que apresentou o erro maior foi o modelo de traçado de raios com 26,95 dB e o modelo que apresentou o menor erro foi ITU-R 1546-MILLINGTON com 3,07 dB.

Modelo	Frro RMS [dR]
Okumura Hata - Área urbana cidades pequenas e médias	7,57
Okumura Hata - Área suburbana cidades pequenas e médias	8,94
Espaço livre	15,97
Traçado de Raios	26,95
Funções de Green Diádica calculadas apenas pra água com	< 5 0
trajeto maior a 2 km.	6,58
ITU-R P.1546 com correções Área Suburbana para trajeto	4.42
misto terra-água	4,43
ITU-R P.1546 com correções Área Urbana para trajeto	7.09
misto terra-água	/,98
ITU-R P.1546 com correções Área Urbana Densa para	10,88

Tabela IX - Resumo de todos os modelos usados nesta dissertação e os erros encontrados.

trajeto misto terra-água	
ITU-R P.1546 sem correções	16,59
ITU-R P.1546 com correções e Modelo de Millington para	3.07
trajeto misto terra-água	5,07

5.3. Caso II: Belém- Mosqueiro



5.3.1. Modelo Espaço livre

Figura 5.8 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo do Espaço livre (Belém-Mosqueiro).

Comparando os dados medidos como os dados simulados, obtêm-se os seguintes resultados:

Tabela X - Resultado para o Modelo de Espaço Livre.	
Modelo	Erro RMS [dB]
Espaço livre	30,73

Os dados medidos no trajeto Belém-Mosqueiro, foram unicamente sobre a terra, sendo que para os dados sobre a água, têm-se valores simulados. Portanto o erro foi

calculado somente para os pontos sobre a terra, o número de anéis foi de 34, dos quais 20 correspondem aos pontos na terra e 14 aos pontos na água. O modelo de Espaço livre mostra uma estimativa otimista com respeito aos dados medidos, apreciando que entre o transmissor e o receptor têm-se prédios e casas que contribuem para a atenuação do sinal real. Devido aos obstáculos presentes, usou-se outro modelo de propagação, no caso, o modelo de Okumura Hata.

5.3.2. Modelo Okumura Hata



Figura 5.9 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo Okumura-Hata (Belém-Mosqueiro).

Comparando os dados medidos como os dados simulados, obtêm-se os seguintes resultados:

Tabela XI - Resultado para o Modelo de Okumura Hata Urbano e Suburbano.

Modelo	Erro RMS [dB]
Okumura Hata - Área urbana cidades pequenas e médias	4,29
Okumura Hata - Área suburbana cidades pequenas e médias	10,22

O modelo de Okumura Hata foi configurado com uma altura efetiva da antena transmissora de 122 m, calculada para um ambiente urbano e suburbano considerando o

parâmetro para uma cidade pequena e média, que são as características de Belém, na área onde foram coletados os dados. Ao realizar a simulação, obtém-se que na terra o modelo de Okumura Hata urbano tem uma boa aproximação aos dados calculados, com um erro de 4,29 dB, enquanto que para o ambiente suburbano os dados simulados tem uma estimativa otimista. Embora, da experiência obtida com os dados medidos na água no trajeto Belém-Baía do Guajará, a intensidade do campo experimenta um incremento do campo elétrico com respeito aos dados medidos na terra. Portanto estima-se que o modelo de Okumura Hata não vai aproximar os valores do campo elétrico na água. Por esta razão, usou-se o Modelo ITU-R. 1546 para trajetos mistos.

5.3.3. Modelo ITU-R P.1546-5 trajetos mistos



Figura 5.10 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo ITU-R P.1546 Suburbano (Belém-Mosqueiro).

Comparando os dados medidos como os dados simulados se obtêm os seguintes resultados:

Tabela XII - Resultado para o Modelo ITU-R P.1546 Suburbano.		
Modelo	Erro RMS [dB]	
ITU-R P.1546 com correções Área Suburbana para trajeto	4,35	
sobre a terra.		

No caso do modelo ITU-R. P.1546 com correções para ambiente suburbano, os dados simulados na terra tem uma boa aproximação como um erro de 4,35 dB, sendo 0,6 dB maior que o erro do modelo de Okumura Hata, mas este modelo oferece equações para o cálculo do trajeto misto. Ao observar os dados calculados sobre a água, e comparado com a experiência dos dados medidos sobre a água, os dados simulados não apresentam incremento no valor do campo elétrico depois da transição terra-água. Portanto aplica-se a combinação dos modelos ITU-R P.1546 e o Modelo de Millington para considerar o "Recovery Effect".



5.3.4. Modelo ITU-R P 1546-5- Modelo do Millington

Figura 5.11 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo ITU R.1546-Millington (Belém-Mosqueiro).

Comparando os dados medidos como os dados simulados, obtêm-se os seguintes resultados:

Tabela XIII - Resultado para o Modelo ITU-R P.1546 – Millington.	
Modelo	Erro RMS [dB]
ITU-R P.1546-Millington	4,35

Usando a combinação do modelo ITU-R P.1546 e Millington, tem-se na terra um bom acompanhamento com o sinal medido e os dados simulados na água consideram o efeito do *"Recovery Effect"*, que é o comportamento do campo esperado, no qual permitirá diminuir o erro dos dados simulados com respeito ao trajeto misto.

5.3.5. Comparação entre os modelos que mais se adaptam a os dados





Figura 5.12 - Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo ITU R.1546-Millington & Modelo ITU-R P.1546 Suburbano (Belém-Mosqueiro).

No caso Belém-Mosqueiro, pode-se apreciar que a combinação de modelos ITU-R P. 1546–Millington tem um comportamento estimado, que será confirmado com a realização de medições sobre a água em Mosqueiro.

5.4. Considerações Finais

Os modelos que apresentaram maior coerência com os dados medidos do primeiro caso foram: ITU-R P.1546 para uma área suburbana e a combinação de modelos ITU-R P. 1546-Millington, que apresentou o menor erro RMS (3 dB). Para o segundo caso, os dados simulados que concordaram com o estudado e que melhor descrevem o

comportamento do sinal na água é a combinação de ITU-R P.1546. No seguinte capítulo serão descritas as conclusões considerando todos os modelos de propagação, os dados medidos e os objetivos desta dissertação.

CAPITULO 6 – CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo da propagação de campo elétrico em um percurso misto (terra-água) na Cidade de Belém do Pará para uma frequência de 521 MHz. Foram apresentados dois casos com distribuições de terra e água diferentes: Belém-Baía do Guajará com 26% de água e 74% de terra, Belém-Mosqueiro com 25% de água e 75% de terra. A intensidade de campo elétrico dos percursos mistos foi comparada com os diversos modelos na literatura, para avaliar tanto o percurso sobre a terra tanto quanto sobre a água.

No caso Belém-Baía do Guajará foram avaliados seis modelos de propagação. O modelo que deu o menor erro foi a combinação de modelos ITU-R P.1546-Millington, proposto nesta dissertação, com erro de 3 dB. Outros modelos como ITU-R 1546-5, caso suburbano, para trajeto misto apresentou um erro de 4,43 dB. Os outros modelos, como no caso Okumura Hata para área urbana apresentou um erro de 7,57 dB, enquanto que para o caso suburbano o erro foi de 8,94 dB. Este modelo, por ser usado para cidades, não prevê o comportamento na água. O modelo Funções de Green Diádicas foi usado para modelar o trajeto na água apresentando um erro de 6,58 dB, devido a que este modelo é para distâncias maiores a 2 km, fato que na terra não foi possível calcular o campo elétrico. Para o modelo Espaço livre, Traçado de dois Raios, ITU-R 1546 (caso urbano e urbano denso) o erro foi maior a 10 dB.

No caso Belém-Mosqueiro foram avaliados quatro modelos, considerando que neste caso se tem medições unicamente na terra. Com isso, o Modelo Okumura Hata apresentou um erro de 4,29 dB, o modelo ITU-R. P.1546-5 caso suburbano e a combinação de modelos ITU-R 1546-Millington apresentaram um erro de 4,35dB. Este erro foi um pouco maior que o erro de Okumura Hata, todavia da experiência anterior sabe-se que Okumura Hata não modela os dados na água; portanto, prevê-se que tendo os dados medidos na água o erro deste modelo vai aumentar. Enquanto que o erro no caso da combinação ITU-R 1546-Millington tem tendência a diminuir.

A combinação de Modelos ITU-R 1546- Millington, além de dar o erro mais baixo no Caso Belém-Bahia do Guajará, acompanha o acréscimo do sinal na área de transição terra-água, onde tanto nos dados medidos como nos calculados observa-se o *"Recovery Effect"*. No Caso Belém-Mosqueiro os dados simulados pela combinação ITU-Millington, apresentam o "*Recovery Effect*", que acontece ao passar de um meio de menor condutividade a um meio de maior condutividade; em contraste com o modelo ITU-R P.1546 que não prediz o reforço do sinal na área de transição terra-água.

Para trabalhos futuros, considera-se o desenvolvimento de um modelo de propagação para percursos mistos, que considere as caraterísticas elétricas dos meios, o reforço do sinal na zona de transição e as possíveis difrações, em uma faixa de UHF para TV Digital. Para isto, deverão ser realizadas campanhas de medições em trajetos mistos, com a finalidade de obter dados reais para elaborar e validar o modelo de propagação para tais percursos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Teleco Inteligencia em Telecomunicações. "Estatística do Brasil-Geral,". Disponível Online em: <u>http://www.teleco.com.br/estatis.asp</u>, 2014.

[2] D. M. Lopes, "Sistema Brasileiro de TV Digital: Caminhos percorridos e implantação," V congresso Nacional de Historia da Mídia. São Paulo, 2007.

[3] J. M. Hernando, "Transmisión por Radio," Madrid, Editorial Centro de estudios Ramón Areces S.A, cuarta edición, 2003.

[4] T. S. Rappaport, "Comunicações sem fio Princípios e práticas," segunda edição, Pearson Education do Brasil, 2009.

[5] L. Barclay (ed.), "Propagation of Radio waves", 2nd Edition, The Institute of Electrical Engineers, London, UK, 2003.

[6] UIT-R, Recomendación, P-1546, "Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz,", Ginebra, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Septiembre 2013.

[7] G. Millington, "Ground-Wave Propagation Over an Inhomogeneous Smooth Earth," IEE Proceedings, 96, pp. 53-64, January 1949.

[8] D. L Didascalou, "Ray-Optical Wave Propagation Modelling in Arbitrarily Shaped Tunnels," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 48, No 9, pp. 1316-1324, September 2000.

[9] D. K. N. Silva, "Predição de Campo Elétrico para TV Digital Usando Funções De Green Diádicas," Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal do Pará, Julho 2014.

[10] G. Millington, G.A. Isted, "Ground-Wave Propagation Over an Inhomogeneous Smooth Earth, Part 2," Electrical Engineers Journal of the Institution, vol. 97, pp.190-191, July 1950.

[11] M. Bellec, et al.,"Measurments of Vertically Polarized Electromagnetic Surface Waves Over a Calm Sea in HF Band Comparison to Planar Earth Theories," IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 62, no. 7, July 2014. [12] C. Bourlier and G. Kubické, "Ground Wave Propagation Along an Inhomogeneous Rough Surface in the HF Band: Millington," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 49, no. 4, April 2011.

[13] T. Kawano, T. Ishihara, K. Goto, "Experimental results on the recovery effect appearing in the ground wave propagation over land-to-sea mixed-path," Antennas and Propagation Society International Symposio IEEE, 2007

[14] L.W. Li, C. K. Lee, T. S. Yeo and M. S. Leong, "Wave Mode and Path Characteristics in a Four-Layered Anisotropic Forest Environment,", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 9, September 2004.

[15] E. R. Iglesias, "MATLAB-Based FEM-Parabolic-Equation Tool for Path-Loss Calculations Along Multi-Mixed-Terrain Paths," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 56, no. 3, June 2014.

[16] C. Teague, P. Lilleboe, D.Barrick, "Estimation of HF Radar Mixed-Media Path Loss Using the Millington Method," Waves and Turbulence Measurement (CWTM), IEEE/OES Eleventh, 2015.

[17] B.A. Witvliet, et al., "Mixed-path trans-horizon UHF measurements for P.1546 propagation model verification," Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), IEEE-APS Topical Conference on, 2011

[18] W. Tomasi, "Sistemas de Comunicaciones electrónicas," Pearson Educación, cuarta edición, Mexico, 2003.

[19] S. Haykin and M. Moher, "Sistemas Modernos de Comunicações Wireless," Bookman, 2008.

[20] P. Pagani, F. Tchoffo, P. Pajusco, B. Uguem. "Ultra Wide Band Radio Propagation Channel," John Wiley & Sons, 2008

[21] S. R Saunders, "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems," New York, Jhon Wiley & Sons, 1999.

[22] K. C. Huang and D. J. Edwards, "Millimeter Wave Antennas for Gigabit Wireless Communications," John Wiley & Sons, 2008.

[23] UIT Recomendación, P.525-2, "Cálculo de la atenuación en el espacio libre," Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1994.

[24] C. A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics," John Wiley & Sons, third edition, 1989.

[25] UIT Recomendación, P.527-3, "Características Eléctricas de la Superficie de la Tierra," Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1992.

[26] E. Ostlin, H. Suzuki, H. Zepernick,"Evaluation of the Propagation Model Recommendation ITU-R P.1546 for Mobile Services in Rural Australia," Vehicular Technology IEEE Transactions, vol. 57, pp. 38-51, January 2008.

[27] S. Kasampalis, et al., "Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata -Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction," Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), IEEE International Symposium, 2014.

[28] F.S. Silva, et al.," Coverage prediction models fitted to the signal measurements of digital TV in Brazilian cities," Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), SBMO/IEEE MTT-S International, 2013.

[29] M. A. Souza, "Uma Nova abordagem da Recomendação ITU-R P.1546 para a predição de cobertura em enlaces Curtos sobre Terrenos Mistos," Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Minas, Novembro 2005

[30] W.W. Hansen, "A new Type of Expansion in radiation problems," Phys Review,47, pp. 139-193, 1953.

[31] G. P. S. Cavalcante; D. A. Rogers; A. J. Giarola, "Analysis of electromagnetic wave propagation in multilayered media using dyadic Green's functions," Radio Science, Volume 17, Number 3, pp. 503-508, May-June 1982.

[32] D. Liao and K. Sarabandi, "Near-Earth Wave Propagation Characteristics of Electric Dipole in Presence of Vegetation or Snow Layer," IEEE Transaction Antennas Propagation, vol. 53, no. 11, November 2005.

[33] L.W. Li, J. H. Koh, T.S. Yeo, M.S. Leong and P.S. Kooi, "Cylindrical Vector Eigenfuntion Expansion of Green Dyadics for Multilayered Anisotropic Media and Its Application to Four-Layered Forest," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 52, no.2, Feb. 2004.

[34] UIT, Recomendación P-368-7, "Curvas de Propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10KHz y 30MHz," Ginebra, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Febrero 2007.