

RONALD FERDINAND STAHLKE

**ANÁLISE E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS NA
PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS NA FAIXA SHF: ESTUDO DE
CASO E APLICAÇÃO A UM ENLACE OPERANDO EM 23,6 GHz**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná, como requisito parcial à obtenção
do título de Mestre em Telecomunicações.**

Orientador: Prof. Horácio Tertuliano, Ph.D.

CURITIBA

2006

RONALD FERDINAND STAHLKE

**ANÁLISE E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS NA
PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS NA FAIXA SHF: ESTUDO DE
CASO E APLICAÇÃO A UM ENLACE OPERANDO EM 23,6 GHz**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Telecomunicações.

Orientador: Prof. Horácio Tertuliano, Ph.D.

CURITIBA

2006

AGRADECIMENTOS

Meu especial agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Horácio Tertuliano, por sempre me apoiar e estar ao meu lado em todos os momentos.

Ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e a Fortex Sistemas de Segurança pelo suporte e interesse no presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Ewaldo Mehl e ao Prof. Dr. César Dartora, pelas análises, sugestões, críticas e contribuições ao presente trabalho.

A Moisés Fernandes e Ernandes Saraiva, que sempre se dispuseram a auxiliar no que era possível, e a todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Pouco conhecimento faz que as criaturas se sintam orgulhosas.
Muito conhecimento que se sintam humildes.
É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça
para o céu, enquanto as cheias as baixam para a terra, sua mãe.

Leonardo da Vinci

RESUMO

Devido a escassez de frequências disponíveis e a menor capacidade de transmissão das bandas VHF e UHF, vem crescendo rapidamente o interesse em se utilizar a banda SHF para a realização de rádio enlaces. No Brasil, bem como em outros países, esta banda já vem sendo utilizada para transmissão de dados a curtas distâncias e há uma forte tendência de que enlaces antigos, operados em bandas mais baixas, sejam substituídos por outros, com maior capacidade de transmissão, operando na banda SHF.

O presente trabalho visa estudar e quantificar a atenuação meteorológica imposta a sistemas de comunicação, via rádio, operando na faixa SHF, com foco na banda de frequências de 23,6 GHz. As características mais importantes, a serem consideradas, para a realização do projeto de um rádio enlace operando na banda SHF são discutidas, e são apresentados os modelos de atenuação mais utilizados. É proposta uma metodologia diferenciada para cálculo e implementação de rádios enlace operando na banda SHF, e a partir desta é elaborado um estudo de caso para um enlace operando em 23,6 GHz na região urbana de Curitiba, levando em conta, sobretudo, os principais fatores envolvidos, tais como: escolha dos equipamentos, antenas e acessórios; análise do terreno; obstruções a propagação do sinal; fenômenos meteorológicos; dentre outros. Também é utilizado neste trabalho a ferramenta de simulação de sistemas de rádio CelPlanner. Como resultado tem-se o comparativo entre o enlace proposto calculado e o simulado, bem como a comparação entre a metodologia proposta e outras já existentes apresentando, sucintamente, vantagens e desvantagens.

Palavras-chave: SHF, metodologia, atenuação, precipitação, meteorológico

ABSTRACT

Due to the shortage of available frequencies and the lower bandwidth capacity of the VHF and UHF bands, there has been an increasing interest in using the SHF band to provide radio services. In Brazil, as well as in other countries, this band has already been used to transmit data at short distances and there is a strong tendency of substituting outdated links, operated in lower bands, by newer ones, with higher capacity, operating in the millimetric band.

The current work aims to study and quantify the meteorological attenuation imposed to the wireless communication systems, operating in the SHF band, with focus in the frequencies near 23,6 GHz. The most important characteristics, to be taken into account, when designing a radio link to operate in the millimetric band are discussed, and the most used and accepted attenuation models are shown. A different methodology to calculate and implant radio links in the SHF band is proposed, and through this a study of case for a radio link operating in 23,6 GHz in the urban area of Curitiba, taking into account the main factors involved, such as: choice of right equipments, antennas and accessories; terrain analysis; obstructions to the propagation of the radio signal; meteorological phenomena; among others. Within this work is also used the software CelPlanner to simulate radio links. As a result there is a comparative between the proposed radio link and the simulated one, as well as a comparison between the proposed methodology with others, that already exist, briefly, showing advantages and disadvantages.

Keywords: SHF, methodology, attenuation, precipitation, meteorological

SUMÁRIO

RESUMO	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS	XIII
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÃO.....	2
1.3 ESCOPO DO TRABALHO	2
1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	3
1.5 DESCRIÇÃO DOS DEMAIS CAPÍTULOS	3
1.6 REFERÊNCIAS.....	4
CAPÍTULO 2 ANÁLISE E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS EFEITOS METEOROLÓGICOS E ATMOSFÉRICOS NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS NA BANDA SHF	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 ATENUAÇÃO DEVIDO A ABSORÇÃO NA TROPOSFERA	6
2.3 COMPOSIÇÃO DA ATMOSFERA	7
2.4 CAUSAS E CARACTERÍSTICAS DA ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA.....	8
2.4.1 Atenuação Devido a Chuva.....	9
2.4.2 Atenuação Devido a Neblina.....	14
2.4.3 Atenuação por Fumaça e Tempestades de Areia	15
2.4.4 Atenuação por Neve e Granizo	15
2.4.5 Atenuação Devido a Gases Atmosféricos	16
2.5 CONCEITO DE PERDA DE TRANSMISSÃO PARA RÁDIO ENLACES.....	18
2.5.1 A Fórmula de Friis e a Perda de Transmissão Básica em Espaço Livre (L_b)..	19
2.5.2 Perda de Transmissão Básica (L_b)	21
2.5.3 Perda Relativa ao Espaço Livre (L_m)	22
2.5.4 Perda de Transmissão (L).....	22
2.5.5 Perda de Sistema (L_s).....	23

2.5.6 Perda Total em um Rádio Enlace (L_l).....	23
2.5.7 Margem de Desvanecimento (F_m)	23
2.6 ESTIMATIVA DE ATENUAÇÃO GASOSA.....	24
2.6.1 Atenuações Específicas Devido ao Oxigênio e ao Vapor d'Água	24
2.6.2 Atenuação de Percurso - Percurso Terrestre	27
2.7 ATENUAÇÃO DEVIDO A NUVENS E NEBLINA	27
2.7.1 Coeficiente de Atenuação Específico K_l	28
2.8 MODELO DE ATENUAÇÃO ESPECÍFICO PARA CHUVA PARA USO EM MÉTODOS DE PREDIÇÃO	30
2.9 CONFIABILIDADE DO SISTEMA E VALORES ESTATÍSTICOS DA INTENSIDADE DE CHUVA.....	34
2.9.1 Método para Determinar os x Minutos de Intensidade de Chuva para uma Probabilidade Cumulativa Percentual p.....	35
2.10 CONCLUSÃO.....	36
2.11 REFERÊNCIAS.....	36
CAPÍTULO 3 APLICAÇÕES DE ONDAS MILIMÉTRICAS	38
3.1 INTRODUÇÃO	38
3.2 VANTAGENS EM SE UTILIZAR AS BANDAS MILIMÉTRICAS	39
3.3 APLICAÇÕES POTENCIAIS.....	41
3.4 PROCEDIMENTO E PONTOS IMPORTANTES NO PROJETO DE UM RÁDIO ENLACE OPERANDO NA FAIXA SHF, EM 23,6GHZ	42
3.5 CONCLUSÃO.....	49
3.6 REFERÊNCIAS.....	49
CAPÍTULO 4 ESTUDO DE CASO: ENLACE OPERANDO EM 23,6 GHZ	51
4.1 DESCRIÇÃO DO RÁDIO ENLACE	51
4.2 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS CONSIDERADOS	55
4.2.1 Antena do <i>Site</i> Simepar.....	55
4.2.2 Antena do <i>Site</i> Fortex.....	56
4.2.3 Cabos e Conectores.....	56
4.2.4 Equipamento de Rádio Digital	57
4.3 ANÁLISE DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS DISPONÍVEIS E CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS PARA A RUC	59

4.4 CONFIABILIDADE DO SISTEMA	64
4.5 ATENUAÇÃO DEVIDO A CHUVA	65
4.6 ATENUAÇÃO DEVIDO A NUVENS E A NEBLINA	67
4.7 ATENUAÇÃO DEVIDO AO OXIGÊNIO (AR SECO) E AO VAPOR D'ÁGUA.....	68
4.8 ATENUAÇÃO DEVIDO A NEVE	70
4.9 ATENUAÇÃO DEVIDO AO GRANIZO	70
4.10 PERDAS DE TRANSMISSÃO NO RÁDIO ENLACE.....	70
4.10.1 Perda de Transmissão em Espaço Livre.....	70
4.10.2 Perda Básica de Transmissão.....	71
4.10.3 Perda de Transmissão	71
4.10.4 Perda de Sistema.....	71
4.10.5 Perda Total.....	72
4.10.6 Margem de Desvanecimento.....	72
4.11 VIABILIDADE E DISTÂNCIA MÁXIMA DO ENLACE	72
4.12 SIMULAÇÃO DO RÁDIO ENLACE UTILIZANDO O CELPLANNER.....	75
4.12.1 Resultados da Simulação – Modelo LOS	79
4.12.2 Resultados da Simulação – Modelo MODEL II	82
4.12.3 Comparativo Entre as Simulações e a Metodologia Proposta.....	85
4.13 CONCLUSÃO.....	86
4.14 REFERÊNCIAS.....	86
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
5.1 CONCLUSÃO.....	90
5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS	91
5.3 REFERÊNCIAS.....	91
REFERÊNCIAS.....	92
ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÕES DE ANTENAS E EQUIPAMENTOS DE RÁDIO ...	96
ANEXO 2 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES UTILIZANDO OS MODELOS LOS E MODEL II	97
ANEXO 3 – ORÇAMENTO PARA IMPLEMENTAÇÃO DO ENLACE PROPOSTO NO ESTUDO DE CASO	97

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 – PRINCIPAIS CAUSAS DE ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA NA PROPAGAÇÃO DE RÁDIOS-ENLACE TERRESTRES	9
FIGURA 02 – ATENUAÇÃO DEVIDO A CHUVA VERSUS PRECIPITAÇÃO HORÁRIA	10
FIGURA 03 – DISTÂNCIA EQUIVALENTE DE CHUVA - <i>DEFF</i>	13
FIGURA 04 – CONCEITO DE PERDA DE TRANSMISSÃO	18
FIGURA 05 – ATENUAÇÃO ESPECÍFICA DEVIDO A GASES ATMOSFÉRICOS	26
FIGURA 06 – ATENUAÇÃO ESPECÍFICA POR GOTAS D'ÁGUA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA	30
FIGURA 07 – COEFICIENTE <i>K</i> PARA POLARIZAÇÃO HORIZONTAL (<i>KH</i>)	32
FIGURA 08 – COEFICIENTE α PARA POLARIZAÇÃO HORIZONTAL (αH)	33
FIGURA 09 – COEFICIENTE <i>K</i> PARA POLARIZAÇÃO VERTICAL (<i>KV</i>)	33
FIGURA 10 – COEFICIENTE α PARA POLARIZAÇÃO VERTICAL (αV)	34
FLUXOGRAMA 01 – METODOLOGIA PROPOSTA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE RÁDIO ENLACES	48
FIGURA 11 – SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ	51
FIGURA 12 – FORTEX SISTEMAS DE SEGURANÇA	51
FIGURA 13 – IMAGEM DE SATÉLITE DO RÁDIO ENLACE	52
FIGURA 14 – OBSTÁCULOS PRESENTES NO CAMINHO DE PROPAGAÇÃO	53
FIGURA 15 – ELIPSÓIDES DE FRESNEL	54
FIGURA 16 – DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA - SIMEPAR	56
FIGURA 17 – RÁDIO DIGITAL TRUEPOINT 4000	58
FIGURA 18 – ÁREA DE COBERTURA DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE CURITIBA	59
FIGURA 19 – INTENSIDADE DE CHUVA MENSAL DURANTE O PERÍODO DE DADOS DISPONÍVEL	61
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO % DA INTENSIDADE DE CHUVA AO LONGO DO PERÍODO EM ANÁLISE	62
FIGURA 21 – ATENUAÇÃO ESPECÍFICA γ_R EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE DE CHUVA	66
FIGURA 22 – ATENUAÇÃO ESPECÍFICA γ_C EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	68
FIGURA 23 – VARIAÇÃO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA EM FUNÇÃO DA ALTITUDE	69
FIGURA 24 – TOPOGRAFIA DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE	76
FIGURA 25 – TOPOGRAFIA EM 3D DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE	76
FIGURA 26 – MORFOLOGIA DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE	77

FIGURA 27 – MORFOLOGIA EM 3D DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE..	77
FIGURA 28 – ARRUAMENTO DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE	78
FIGURA 29 – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO – MODELO LOS.....	79
FIGURA 30 – PERFIL DO ENLACE – MODELO LOS	80
FIGURA 31 – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO – MODELO MODEL II	82
FIGURA 32 – PERFIL DO ENLACE – MODELO MODEL II.....	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – COMPOSIÇÃO DA ATMOSFERA.....	7
TABELA 02 – COEFICIENTES DE K_H	31
TABELA 03 – COEFICIENTES DE K_V	31
TABELA 04 – COEFICIENTES DE α_H	31
TABELA 05 – COEFICIENTES DE α_V	31
TABELA 06 – COORDENADAS DO RÁDIO ENLACE.....	52
TABELA 07 – ESPECIFICAÇÕES DA ANTENA - SIMEPAR.....	55
TABELA 08 – CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONSIDERADOS	57
TABELA 09 – CARACTERÍSTICAS DOS CONECTORES CONSIDERADOS.....	57
TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DO RÁDIO DIGITAL.....	57
TABELA 11 – ÍNDICES PLUVIOMÉTRICOS DE CURITIBA E REGIÃO METROPOLITANA	60
TABELA 12 – MÉDIA DE CHUVAS PARA TODOS OS MESES DO ANO DURANTE OS ÚLTIMOS 4 ANOS.....	60
TABELA 13 – DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE DE CHUVAS AO LONGO DO PERÍODO EM ANÁLISE	61
TABELA 14 – COMPARAÇÃO DA INTENSIDADE DE CHUVAS HORÁRIAS DOS MESES MAIS CHUVOSOS COM A DOS DIAS MAIS CHUVOSOS DO MESMO PERÍODO.....	63
TABELA 15 – VALORES CALCULADOS PARA OS COEFICIENTES α_V , α_H , K_H E K_V	65
TABELA 16 – ATENUAÇÃO DEVIDO A CHUVA.....	65
TABELA 17 – ATENUAÇÃO DEVIDO A NUVENS E A NEBLINA.....	67
TABELA 18 – ATENUAÇÃO DEVIDO AO OXIGÊNIO (AR SECO) E AO VAPOR D'ÁGUA .	69
TABELA 19 – COMPOSIÇÃO DE L_M	71
TABELA 20 – NOVAS CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONSIDERADOS	73
TABELA 21 – DISTÂNCIA DO ENLACE E MARGEM DE DESVANECIMENTO.....	74
TABELA 22 – PRINCIPAIS DADOS E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO	75
TABELA 23 – SÍNTESE DO RESULTADO DA SIMULAÇÃO UTILIZANDO O CELPLANNER – LOS	81
TABELA 24 – SÍNTESE DO RESULTADO DA SIMULAÇÃO UTILIZANDO O CELPLANNER – MODEL II.....	84

TABELA 25 – COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DAS SIMULAÇÕES E DA METODOLOGIA PROPOSTA	85
TABELA 26 – SÍNTESE DAS ATENUAÇÕES DEVIDO A FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS	88

LISTA DE SIGLAS E ACRONIMOS

ANATEL	– Agência Nacional de Telecomunicações
BER	– <i>Bit Error Rate</i>
BPSK	– <i>Binary Phase-shift Keying</i>
CEPT	– <i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i>
DRIVE	– <i>Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe</i>
EHF	– <i>Extreme High Frequency</i>
EM	– <i>Electromagnetic Wave</i>
ETSI	– <i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FEC	– <i>Forward error correction</i>
ITU-R	– <i>International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector</i>
LAN	– <i>Local Area Network</i>
LCD	– <i>Liquid Crystal Display</i>
MVDS	– <i>Multipoint Video Distribution System</i>
PABX	– <i>Private Automatic Branch eXchange</i>
QAM16	– <i>Quadrature Amplitude Modulation 16</i>
QAM8	– <i>Quadrature Amplitude Modulation 8</i>
QPSK	– <i>Quadrature Phase-shift Keying</i>
SHF	– <i>Super High Frequency</i>
UHF	– <i>Ultra High Frequency</i>
RF	– Rádio Freqüência
WAN	– <i>Wide Area Network</i>
FI	– Freqüência Intermediária
ERP	– <i>Effective Radiated Power</i>
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
RMC	– Região Metropolitana de Curitiba
RUC	– Região Urbana de Curitiba
SIMEPAR	– Sistema Meteorológico do Paraná
SDH	– <i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
CD	– <i>Compact Disk</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Até pouco mais de 10 anos atrás, a faixa SHF do espectro de rádio, 3 GHz a 30 GHz, era relativamente pouco utilizada, e serviços fixos tendiam a ser acomodados em bandas de frequência inferiores a 10 GHz.

No entanto, já no início dos anos 80, fatores tais como previsão de congestionamento nas bandas de frequência alocadas aos serviços fixos, o surgimento de um grande número de novos serviços de comunicação e a necessidade de taxas de transmissão mais elevadas nas redes de dados, levaram as operadoras de serviços de rádio e entidades reguladoras destes serviços a considerar o uso da região milimétrica do espectro para serviços futuros, móveis e fixos [1.1].

Embora a atenuação e absorção da energia do sinal devido à chuva, vapor d'água e oxigênio imponham restrições na área de cobertura de sistemas de rádio operando acima de 20 GHz, as características de propagação nesta região do espectro são interessantes para fornecer enlaces de comunicação de curto alcance. Além do mais, há certas vantagens em se operar um sistema de rádio na banda SHF do espectro, tais como: disponibilidade de maiores larguras de banda e a possibilidade de reutilização de frequências em pequenas distâncias.

Durante a última década, consideráveis quantidades de tempo e esforço foram investidos no desenvolvimento de sistemas de onda milimétrica. Destacam-se as pesquisas devotadas ao desenvolvimento de tecnologia necessária para a implementação destes sistemas, [1.2], [1.3], e estudos visando a obtenção de dados suficientes a fim de se criar, a partir destes, modelos para a predição da propagação, [1.4], [1.5], que pudessem ser utilizados para auxiliar no planejamento de redes bem como superar as restrições impostas ao projeto de sistemas devido a expressiva atenuação atmosférica que ocorre, notavelmente, no espectro de frequências acima de 10 GHz, [1.6], [1.7].

1.2 MOTIVAÇÃO

A importância da análise e estudo da influência dos efeitos atmosféricos na propagação de ondas eletromagnéticas na faixa SHF justifica-se pelo fato de que as frequências acima de 10 GHz estão sujeitas a uma atenuação expressiva devido a fenômenos meteorológicos e atmosféricos, [1.6], [1.7], [1.8], [1.9].

Um estudo detalhado de quais são os principais fatores que podem vir a prejudicar a comunicação e de como eles afetam a propagação do sinal, permite dimensionar os enlaces de forma a que estes sejam capazes de superar as atenuações impostas, portanto, tornando-os menos susceptíveis a falhas.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O presente trabalho divide-se em duas partes. A primeira consiste em analisar e estudar, teoricamente, a influência dos fenômenos meteorológicos na propagação de ondas eletromagnéticas na faixa SHF, com destaque para a frequência de 23,6 GHz. O foco será a análise e estudo das atenuações impostas a sistemas de comunicação devido a: chuva, neblina, granizo, neve e gases atmosféricos, como o vapor d'água e o O₂.

A segunda parte do trabalho consiste em, inicialmente, discutir quais os principais fatores que afetam a propagação do sinal, propondo uma metodologia diferenciada para o projeto e cálculo de enlaces na banda SHF. Segue-se um estudo de caso, aplicando-se as análises e estudos realizados na primeira parte e a metodologia proposta, para um rádio enlace teórico operando na faixa de 23,6 GHz, dentro da área urbana de Curitiba. Para tal, utilizar-se-á especificações técnicas fornecidas por fabricantes de rádios, cabos, conectores e antenas, bem como os dados meteorológicos do caminho de propagação do rádio enlace, estes últimos obtidos junto ao Instituto Tecnológico Simepar.

Após o estudo de caso será feita a simulação de um rádio enlace com as mesmas características utilizando-se o programa CelPlanner¹, a fim de se verificar se os resultados, que levam em conta a base de dados, topográficos e morfológicos, da região de Curitiba, concordam ou não com os obtidos através da metodologia proposta.

1 – Ferramenta de simulação e predição de desempenho de rádio-enlaces, desenvolvido pela empresa CelPlan.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

A análise e o estudo da influência dos efeitos atmosféricos na propagação de ondas eletromagnéticas na faixa SHF, em especial em 23,6 GHz, têm por objetivos:

- entender e quantificar quais são os principais fatores meteorológicos que afetam a propagação de ondas eletromagnéticas na faixa de frequência de interesse.
- propor uma metodologia para o projeto e cálculo de enlaces operando na banda SHF, aplicando-a ao estudo de caso.
- a partir do estudo de caso, e tendo-se como base os dados meteorológicos disponíveis, verificar qual seria a maior distância de operação possível para um enlace operando na região urbana de Curitiba.
- transformar os dados meteorológicos obtidos junto a institutos de pesquisa reconhecidos, tendo como base as recomendações ITU-R específicas, de forma a que possam vir a ser utilizados futuramente em outros sistemas de rádio enlace operando em regiões próximas a do rádio enlace aqui em estudo.
- contribuir com a pesquisa de radiopropagação na faixa SHF, mais especificamente na faixa de frequência próxima a linha de ressonância do vapor d'água, 22,23 GHz [1.7].

1.5 DESCRIÇÃO DOS DEMAIS CAPÍTULOS

No Capítulo 2, são apresentados a análise e o estudo dos principais fenômenos atmosféricos que afetam a faixa de frequência de interesse.

No Capítulo 3, são verificados quais os principais fenômenos que devem ser levados em consideração para o estudo de caso proposto, e é proposta uma metodologia diferenciada para a concepção de um rádio enlace.

No Capítulo 4, é descrito e é realizado o estudo de caso, propriamente dito, para um enlace operando na faixa de 23,6 GHz na região urbana de Curitiba. O

resultado da simulação de um enlace equivalente, realizado utilizando-se o programa CelPlanner, também é apresentado.

Finalmente, no Capítulo 5, têm-se as análises dos resultados obtidos, as comparações entre o enlace calculado e o simulado, as conclusões obtidas a partir do estudo realizado, bem como perspectivas para trabalhos futuros.

1.6 REFERÊNCIAS

[1.1]. GIBBINS, C.J., "Radiowave Propagation in the Millimetric Bands", Rutherford Appleton Laboratories, presented at the Seminar "Business Opportunities in the Millimetric Wavebands", London, 27 June 1990.

[1.2]. STEMP, G., "The Development of the Use of the Millimetric Wavebands in the United Kingdom", Symposium of Frequency Resources Development, Tokyo, June 1993.

[1.3]. KIDDLE, P., "Millimetric Wave Systems - The Attractive Access Radio Solution", Radio Relay Systems, 11-14 October 1993.

[1.4]. GIBBINS, C.J., "Millimetre-Wave Propagation Studies over a 500 m Path", Rutherford Appleton Laboratories.

[1.5]. "Summary of RAL Research Projects", 1994.

[1.6]. ITU-R Report 721-2, "Attenuation by Hydrometeors, in Particular Precipitation, and Other Atmospheric Particles", Recommendations and Reports of the CCIR, 1986, Vol. V, ITU, Geneva.

[1.7]. ITU-R Report 719-3, "Attenuation by Atmospheric Gases", Recommendations and Reports of the CCIR, ITU, Geneva.

[1.8]. ITU-R Recommendation 840, "Attenuation due to cloud and fog", 1992.

[1.9]. ITU-R Recommendation 676-1, "Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1-350 GHz", 1992.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE E ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS EFEITOS METEOROLÓGICOS E ATMOSFÉRICOS NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS NA BANDA SHF

Este capítulo traz, inicialmente, uma análise e descrição sucinta das causas e dos efeitos de fenômenos meteorológicos e atmosféricos sobre a propagação de sinais na região milimétrica do espectro de rádio, banda SHF, com especial destaque à faixa de 23,6 GHz, faz menção a algumas pesquisas que vêm sendo realizadas sobre o assunto, descreve as características da troposfera, e a composição atmosférica, bem como apresenta os modelos de atenuação, devido a fenômenos meteorológicos e atmosféricos, a serem utilizados.

2.1 INTRODUÇÃO

A transmissão de sinais em frequências acima de 20 GHz é influenciada por várias condições meteorológicas. Estas impõem severas limitações à área de cobertura, mesmo em visada direta, para um sistema de rádio operando na banda SHF [2.1]. A absorção e espalhamento da energia do sinal devido a chuva, neve, neblina, vapor d'água, oxigênio e outros gases presentes na atmosfera afetam a propagação das ondas de rádio, e estes efeitos devem ser levados em conta quando do projeto de um sistema de rádio operando nesta região do espectro.

Para garantir que sistemas de comunicação na banda SHF sejam capazes de atingir o mesmo grau de disponibilidade e desempenho dos que operam nas bandas de frequência mais baixas, são necessários modelos de propagação precisos a fim de se estimar o efeito da atenuação atmosférica no desempenho do sistema.

Ao longo das últimas duas décadas, um grande esforço tem sido dado ao estudo da propagação de ondas milimétricas, o que permitiu o desenvolvimento de modelos de atenuação preditivos relativamente precisos para auxiliar no projeto de sistemas de comunicação operando nesta faixa. Muitos destes esforços concentraram-se em quantificar de forma mais precisa os efeitos dos

hidrometeoros¹, uma vez que eles são tidos, de forma geral, como o principal fator de atenuação em frequências acima de 20 GHz [2.2].

O objetivo das pesquisas já realizadas, [2.2], [2.3], [2.4], foi o de obter dados de propagação suficientes de forma que os efeitos da atenuação pudessem ser previstos probabilisticamente. Estas probabilidades podem então ser incorporadas nas ferramentas de planejamento de sistemas de rádio enlace para facilitar o desenvolvimento de sistemas de comunicação atuais e futuros, nesta banda.

Recomendações e relatórios do ITU-R contendo dados de propagação e modelos de predição vêm sendo publicados e atualizados regularmente, alguns dos quais são utilizados no decorrer do presente trabalho e serão mencionados a seu momento.

2.2 ATENUAÇÃO DEVIDO A ABSORÇÃO NA TROPOSFERA

O “vácuo infinito”, tal como é o espaço sideral, é o meio ideal para a propagação de ondas de rádio. A redução da densidade de energia devido à difusão irrestrita é o único fator que atenua as mesmas.

Já, próximo a superfície terrestre, a presença de uma atmosfera contendo gases, vapor d'água, gotas de água e partículas de gelo pode causar absorção ou espalhamento do sinal e, portanto, é necessário determinar se estes efeitos podem ou não ser ignorados quando do projeto de um dado rádio enlace.

De forma geral, estes efeitos podem ser ignorados para frequências próximas a faixa UHF ou abaixo da mesma, independente do modo de serviço do rádio enlace [2.6]. Para frequências localizadas na faixa SHF, ou acima desta, a absorção começa a afetar significativamente as comunicações terrestres ponto-a-ponto, entre aeronaves, terra-terra, satélite-terra, etc. Para as ondas de rádio acima de 10 GHz em particular, a absorção tende a se tornar um fator determinante para o desempenho e disponibilidade do sistema [2.5].

Ao longo deste trabalho, procura-se apresentar uma análise quantitativa destes efeitos. Os tipos de mecanismos de atenuação, vistos a seguir, podem ser classificados, devido as suas causas, em absorção e espalhamento que incluem reflexão parcial, refração, difração, entre outros. De qualquer forma ambos os tipos acima mencionados (absorção e espalhamento) também são classificados como

1 - Meteoro constituído por um conjunto de partículas de água, na fase líquida ou sólida, em queda livre ou em suspensão na atmosfera. Os hidrometeoros mais comuns são: chuva, chuvisco e a neve. Fonte: INMET.

absorção porque eles não dão um padrão de interferência espacial [2.6]. Ao invés disto, eles exibem características de atenuação devido a absorção com menor seletividade de frequência dentre as bandas de rádio normalmente empregadas.

2.3 COMPOSIÇÃO DA ATMOSFERA

O tipo de atmosfera deve ser descrito antes que o grau de absorção seja discutido. Empiricamente, sabe-se que a atmosfera contém oxigênio, dióxido de carbono, entre outros elementos, além de vapor d'água e nuvens que podem ocasionar chuva e neve.

Primeiramente, a composição do ar seco, ou seja, a atmosfera sem vapor d'água, deve ser examinada. A composição do ar seco exhibe pouca variação vertical entre a superfície próxima ao solo e a porção superior da estratosfera (aproximadamente 54 km acima do nível do mar), bem como pouca variação posicional ao longo da Terra [2.6].

Como mostrado na tabela 1, a composição do ar (seco) atmosférico é de 78% de nitrogênio e aproximadamente 21% de oxigênio. Especificamente, estes dois componentes compõem, aproximadamente, 99% do total enquanto o 1% restante é dividido entre o dióxido de carbono e outros gases raros tais como: argônio, xenônio, entre outros.

ELEMENTOS QUÍMICOS	QUANTIDADE (%)
Nitrogênio (N ₂)	78,08
Oxigênio (O ₂)	20,95
Argônio (Ar)	0,93
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,03
Neônio (Ne)	0,0018
Hélio (He)	0,0005
Criptônio (Kr)	0,00011
Xenônio (Xe)	0,0000009
Hidrogênio (H ₂)	0,001

FONTE: RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004, pág. 110.

Estas proporções são consideradas como resultado de uma atmosfera homogênea. Entretanto, como a pressão decai com a altitude e, portanto, a

quantidade absoluta de gases torna-se menor (gás mais “fino”), conseqüentemente a absorção e atenuação resultante das ondas de rádio diminuem com a altitude.

Na parte mais baixa da atmosfera, a troposfera, está concentrada a maior parte do vapor d’água e é a região onde se formam nuvens e são observadas as condições meteorológicas. Esta região é importante na análise da propagação, pois em altitudes dentro desta faixa geralmente são feitas as comunicações terrestres em visada direta. A altura da troposfera depende da latitude, época do ano e sofre influência das condições locais do tempo. Os valores de altitude médios situam-se entre 8 km a 15km nas regiões polares e 16 km a 18 km nas regiões equatoriais [2.7].

A quantidade de vapor d’água, ao nível do mar, também varia expressivamente, de até 20 g/kg de ar nas regiões tropicais a 0,5 g/kg de ar nas regiões polares [2.8].

A água na atmosfera pode assumir a forma de gás (vapor d’água), líquido (nuvens, neblina e chuva), ou sólido (neve ou granizo). Portanto, os efeitos causados pela água são mais complexos de serem analisados além de apresentarem variação que depende da altitude, estação do ano e condições geográficas.

2.4 CAUSAS E CARACTERÍSTICAS DA ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA

A faixa de freqüência em foco é a de 23,6 GHz, embora a análise a seguir possa vir a ser aplicada a freqüências superiores.

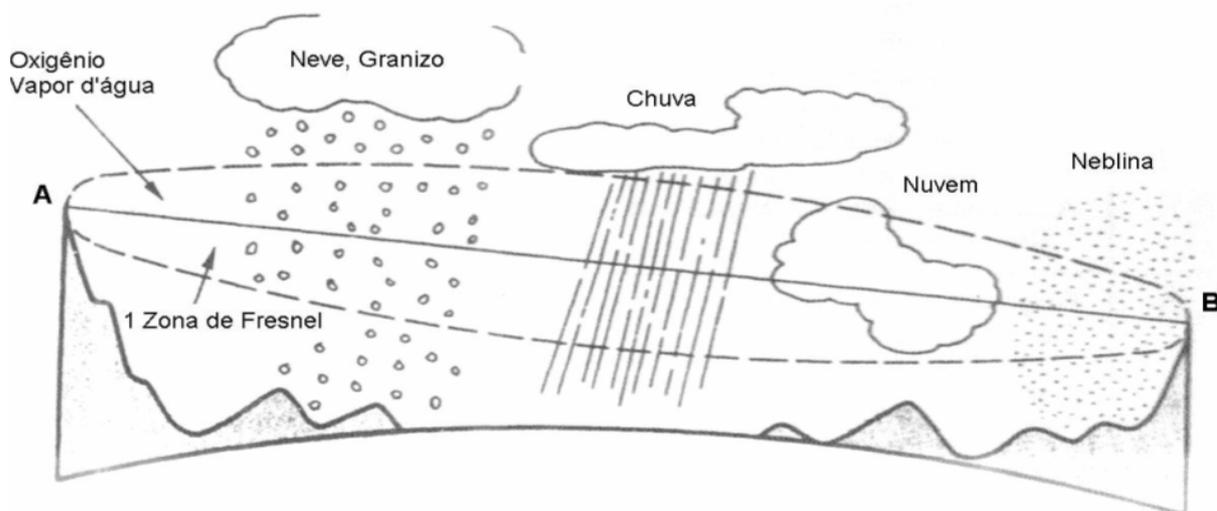
Quando considera-se o ar seco, apenas o oxigênio causa atenuação substancial devido à absorção das ondas de rádio.

Para o caso do ar úmido, os efeitos dos componentes líquidos (chuva e neblina) são os mais significativos, enquanto componentes gasosos tais como vapor d’água exibem um efeito secundário na freqüência em questão. Já os componentes sólidos, tais como neve e granizo tendem a apresentar efeitos de menor monta [2.6].

A figura 1 ilustra as principais causas de atenuação na propagação de rádios-enlace terrestres, que serão explicadas em 2.4.1 a 2.4.4.

A partir da figura 1, pode-se perceber que o que afeta a propagação do rádio-enlace é a quantidade de nuvens, neve, granizo, chuva, neblina, oxigênio e vapor d'água que se encontram na 1ª Zona de Fresnel do enlace.

FIGURA 1 – PRINCIPAIS CAUSAS DE ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA NA PROPAGAÇÃO DE RÁDIOS-ENLACE TERRESTRES



FONTE: Shibuia, S. A Basic Atlas of Radio Wave Propagation. Japan: John Wiley & Sons, 1987, pág. 342

2.4.1 Atenuação Devido a Chuva

A constante dielétrica da atmosfera contendo vapor d'água é muito próxima da unidade (1,00064), enquanto a constante dielétrica da água (líquida) é de aproximadamente 80. Conseqüentemente, quando uma grande quantidade de neblina, gotas d'água, etc. estão presentes no caminho de propagação, as ondas de rádio viajando por este percurso sofrem atenuação devido ao espalhamento e à absorção.

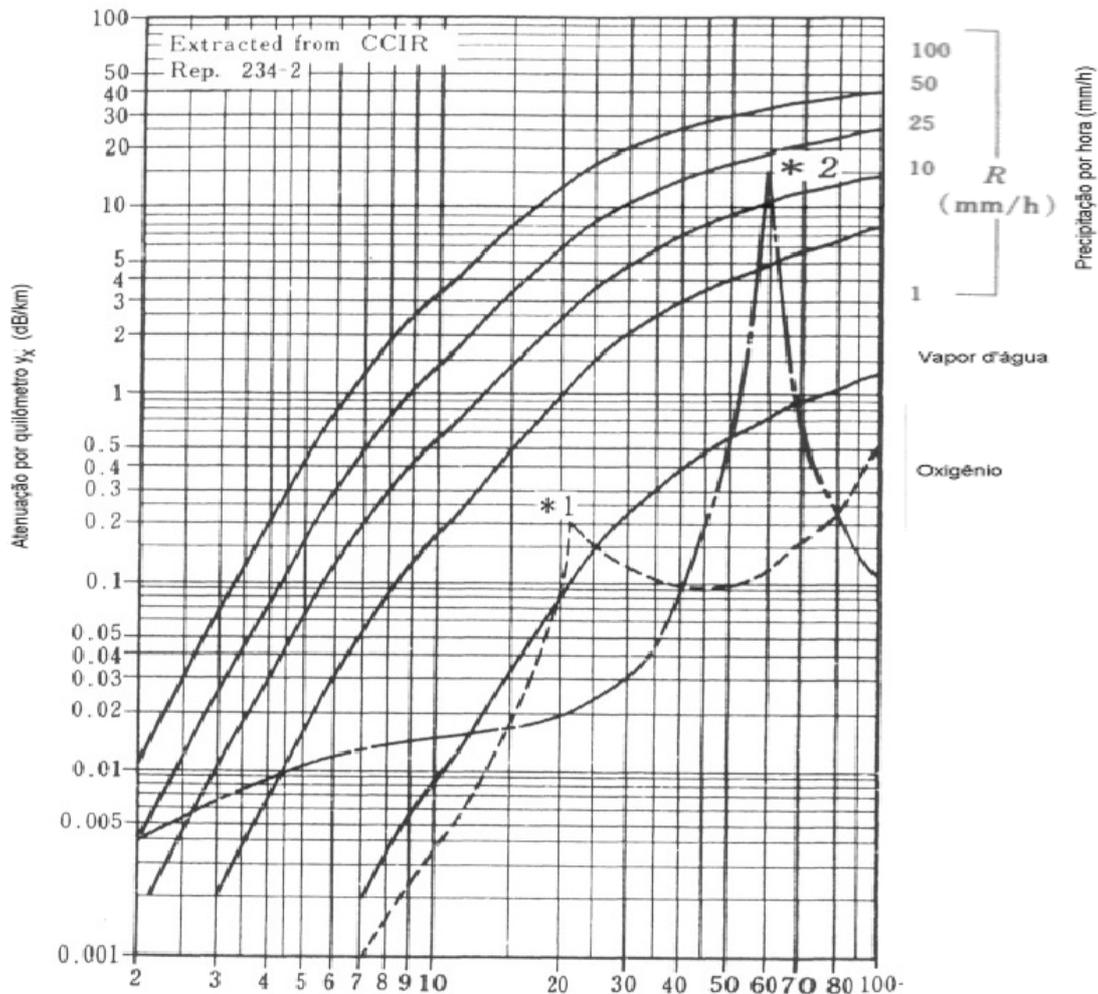
O tamanho das gotas de chuva varia bastante, entre 0,1 mm de diâmetro, no caso de neblina, a até mais de 5,8 mm no caso de chuvas torrenciais [2.6]. Comparando os comprimentos de onda de 30 mm a 10 mm, correspondentes as frequências de 10 GHz a 30 GHz, fica claro que estes efeitos não podem ser desconsiderados.

Por outro lado, visto que o tipo e o comportamento das chuvas apresentam grande variação dependendo da região e horário e seu comportamento é, até o

momento, parcialmente compreendido apesar de todas as observações meteorológicas já feitas, ainda não foi estabelecido um meio totalmente efetivo de se relacionar a atenuação causada pela chuva à quantidade de precipitação.

A figura 2 mostra, sobrepostos, a relação entre a atenuação das ondas de rádio (em dB/km) devido a diversas intensidades de precipitações horárias, R (em mm/h^{-1}), devido ao vapor d'água e devido ao oxigênio versus frequências de 2 GHz a 100 GHz. Nesta figura destacam-se as cinco curvas de intensidade de precipitação, correspondendo a 1 mm/h, 10 mm/h, 25 mm/h, 50 mm/h e 100 mm/h, a uma temperatura ambiente de 18 °C.

FIGURA 2 – ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA VERSUS PRECIPITAÇÃO HORÁRIA
Atenuação devido ao Oxigênio, Vapor d'água e Chuva



FONTE: Shibuia, S. A Basic Atlas of Radio Wave Propagation. Japan: John Wiley & Sons, 1987, pág. 344

1 - mm/h unidade de medida de intensidade de chuva, correspondente a 1 litro de água por m^2 , por hora.

A partir da figura 2, pode-se estimar, por exemplo, que para uma precipitação com intensidade de 50 mm/h, a atenuação imposta ao sistema devido apenas à chuva seria de, aproximadamente, 7 dB/km operando-o na frequência de 23,6 GHz.

Porém, chuvas com intensidades de 50 mm/h, ou superiores, são pouco frequentes, ocorrendo uma vez ao ano, ou ainda uma vez a cada período de 5 ou 10 anos, mesmo em uma região de precipitação mais intensa [2.9].

De acordo com a experiência, para frequências de operação do rádio enlace acima de 10 GHz, a precipitação, mesmo quando tiver baixa intensidade, aumentará a atenuação do sinal e conseqüentemente a probabilidade de falha no sistema (*system outage*), portanto, a chuva é um item essencial a ser estudado no projeto de um sistema de radiocomunicação.

A teoria relacionada a atenuação e espalhamento de ondas de rádio pela chuva é baseada no cálculo da atenuação e do espalhamento devido as seções cruzadas de uma única gota de chuva [2.2], [2.10]. Na faixa de ondas milimétricas do espectro de rádio, o formato das gotas de chuva é importante, uma vez que a seção cruzada da gota é comparável ao tamanho do comprimento de onda da onda de rádio. Para uma gota de chuva em particular, seu formato dependerá de seu tamanho e da taxa com a qual ela está caindo.

Para modelar os efeitos causados pela chuva nas ondas de rádio, a chuva é caracterizada pela sua distribuição de tamanho de gotas, $N(D)$, que é definida como sendo o número de gotas, com diâmetro D , que caem por metro cúbico, contidas na 1ª Zona de Fresnel do caminho do rádio enlace. A distribuição de tamanho de gotas está relacionada à taxa de chuva, R , em mm/h. Esta relação foi provada empiricamente por Marshall e Palmer [2.11], após um longo período coletando dados relativos ao tamanho das gotas, a partir de chuvas com diferentes formações e intensidades. Os dados obtidos foram analisados e combinados resultando nas famílias de Marshall-Palmer de distribuições médias de tamanho de gotas, bem como a partir destes puderam ser definidos (por ajustes paramétricos) os parâmetros de distribuição correlacionados a taxa de precipitação R .

As equações 1 e 2, desenvolvidas por Marshall e Palmer, ilustram a variação de $N(D)$ em função de R .

$$N(D) = N_0 \cdot e^{-\Lambda \cdot D} \quad (1)$$

onde:

$N(D)$: número de gotas com diâmetro médio D , que caem por m^3

N_0 : 0,08

D : diâmetro médio das gotas

Λ : inclinação das gotas em relação ao plano vertical

$$\Lambda(R) = 41 \cdot R^{-0.21} \quad (2)$$

onde:

$\Lambda(R)$: inclinação em função de R

R : taxa de precipitação, em mm/h

É muito improvável que a chuva ocorra simultaneamente e de forma uniforme ao longo de todo o caminho de propagação. Quanto mais intensa é a chuva, mais estreita é a área de chuva. Em outras palavras, presumir que a chuva mais intensa, que ocorre durante de 0,1 % a 0,01 % do tempo sob consideração, ocorra ao longo de todo o caminho de propagação pode superestimar o cálculo da atenuação e, portanto, necessita de um fator de ajuste. A distância equivalente de chuva, D_{eff} , utilizada no cálculo de atenuação devido a chuva, com base em uma chuva uniforme, é dada pela equação 3, [2.6].

$$D_{eff} = d \cdot r \quad (3)$$

onde:

d : distância do enlace (km)

r : fator de ajuste

$$r = \frac{1}{1 + d / d_0} \quad (4)$$

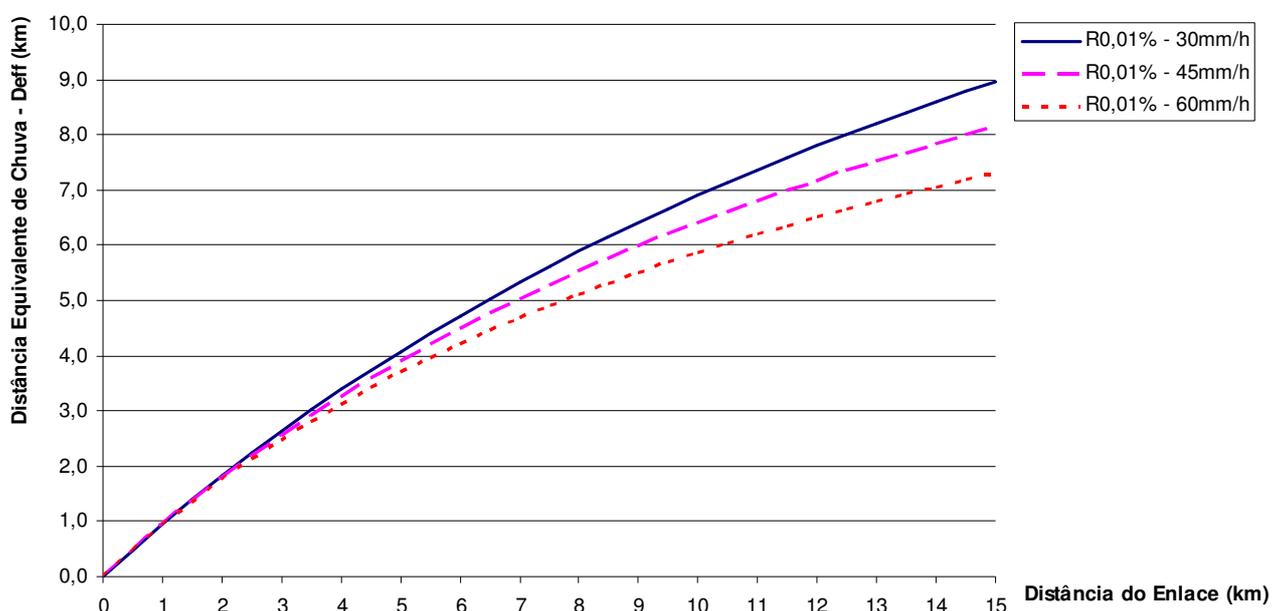
Para $R_{0,01\%} \leq 100\text{mm/h}$:

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0,015 \cdot R_{0,01}} \quad (5)$$

A figura 3 ilustra a variação da distância equivalente de chuva em função da distância real do enlace, considerando-se taxas de chuva de 30 mm/h, 45 mm/h e 60 mm/h. Analisando-se as curvas correspondentes as taxas de chuva de 30 mm/h, 45 mm/h e 60 mm/h percebe-se que quanto maior a intensidade de chuva, menor é a distância equivalente de chuva.

Obs. A figura 3, obtida a partir das equações 3, 4 e 5, é válida para enlaces em visada direta e com azimute entre as antenas, α , inferior a 3° [2.6].

FIGURA 03 – DISTÂNCIA EQUIVALENTE DE CHUVA - *DEFF*



Em suma, a atenuação das ondas de rádio pela chuva em frequências milimétricas é dependente de certos fatores relacionados às partículas de água que a compõem em um certo momento, incluindo o tamanho das gotas, a velocidade com a qual elas estão caindo, o período do ano e a distribuição de tamanho de gotas.

De forma a prever a atenuação, com razoável precisão, é necessário medir as chuvas que ocorrem em áreas geográficas específicas ao longo de certos períodos de tempo, e então concentrar os dados obtidos de forma a criar modelos estatísticos dos eventos que ocorreram. Os dados coletados podem então ser utilizados para formar distribuições cumulativas dos graus de atenuação do sinal, relacionando-as à taxa de chuvas, temperatura e umidade, que ocorrem em uma

determinada área geográfica mensalmente e anualmente. Estas distribuições podem então ser comparadas às distribuições médias para uma área geográfica em particular, para ilustrar quando e por quanto os dados medidos excedem a distribuição média para vários percentuais de tempo.

Esta informação pode então ser utilizada pelos planejadores do sistema para estimar os desempenhos médios e de pico do sistema, bem como prever a confiabilidade de um sistema de comunicação em particular sob uma variedade de condições geográficas e meteorológicas.

Vários modelos estatísticos descrevendo os efeitos das chuvas e de outros hidrometeoros¹ sobre rádio enlaces foram desenvolvidos. Os modelos de atenuação por chuva mais aceitos para o projeto e planejamento de sistemas de rádio enlace, com visada direta, estão descritos em [2.12].

2.4.2 Atenuação Devido a Neblina

Predições teóricas de atenuação de ondas milimétricas por neblina são obtidas quase que da mesma forma como é para a chuva. A principal diferença é que a neblina consiste de pequenas partículas de água suspensas com diâmetros muito pequenos [2.1], [2.2], [2.10], [2.13].

Uma vez que nuvens e neblina podem permanecer sobre o caminho da propagação por um longo período de tempo, eles não podem ser ignorados se apresentam alta densidade e freqüência de ocorrência.

Se as gotículas de água têm 0,01 mm de diâmetro ou menos, elas usualmente vagam pela atmosfera na forma de nuvens ou neblina. Tal atmosfera úmida prevalecendo próxima a superfície é chamada de neblina, enquanto aquela que se desloca em médias ou altas altitudes é chamada de nuvem, embora não exista diferença significativa entre ambas.

Tendo em vista o diâmetro médio das gotículas, a atenuação causada pela neblina tende a ser menos significativa que a causada pela chuva.

Embora, segundo a teoria geral, a absorção devido a atenuação ao longo de todo o caminho pode ser calculada através da soma das atenuações devido a (incluindo o efeito devido ao espalhamento) porções infinitesimais ao longo de todo o caminho é usual ter-se uma estimativa aproximada na forma de quilômetros,

1 - Meteoro constituído por um conjunto de partículas de água, na fase líquida ou sólida, em queda livre ou em suspensão na atmosfera. Os hidrometeoros mais comuns são: chuva, chuvisco e a neve. Fonte: INMET.

estimativa esta obtida utilizando-se de dados meteorológicos coletados e resultados de modelagens físico-químicas e testes de propagação.

2.4.3 Atenuação por Fumaça e Tempestades de Areia

Para os possíveis efeitos causados por tempestades de areia, fumaça expelida por grandes fábricas, e similares, ainda não existem dados disponíveis para dar suporte a uma correlação precisa. Apesar disto, estes fatores terão pequena influência se a densidade, volume e frequência de ocorrência forem relativamente pequenos.

O gás ácido carbônico pode ser desconsiderado tendo em vista a sua densidade [2.6]. Por outro lado o carbono pulverizado na atmosfera pode vir a prejudicar a propagação, mas apenas sob a forma de uma cortina de fumaça e quando localizada imediatamente a frente da abertura da antena.

Uma vez que as constantes dielétricas da areia seca são baixas e os tamanhos dos grãos em uma tempestade de areia são pequenos, seus efeitos podem, via de regra, ser ignorados. De qualquer forma, devido a falta de dados experimentais, não se pode garantir desempenho satisfatório do sistema se uma forte tempestade de areia encobrir todo o caminho de propagação.

2.4.4 Atenuação por Neve e Granizo

A neve e o granizo consistem em uma mistura complexa de água, ar e cristais de gelo. Desta forma, a atenuação das ondas de rádio devido à neve é consideravelmente mais difícil de ser estimada.

Os problemas envolvidos na medição da atenuação das ondas de rádio devido à neve são mais complexos devido ao formato dos cristais de gelo, que compõem a neve, serem variados. Desta forma torna-se muito difícil criar distribuições probabilísticas precisas de tamanhos e formas dos flocos de neve.

Dados experimentais obtidos sugerem que o efeito da neve na propagação de ondas milimétricas depende da consistência da neve [2.1], [2.2], [2.10]. Estudos,

[2.14], [2.15], comprovam que a atenuação das ondas de rádio acima de 20 GHz em neve “seca”, composta por cristais de gelo sólidos sem estarem parcialmente derretidos, é menor que a da chuva, para a mesma taxa de precipitação. Entretanto, investigações utilizando neve “molhada”, com cristais de gelo parcialmente derretidos, indicam que a atenuação, para este caso, é superior a da chuva.

A constante dielétrica do gelo é baixa, entre 2 e 3, enquanto a neve pode ser comparada a fios de seda feitos de gelo e inflados com ar, portanto, o efeito sobre a atenuação de ondas de rádio será de somente alguns décimos que as causadas pelas gotas de chuva.

Os granizos leves, opacos e com forma de bola com características similares à neve, e os granizos pequenos, semitransparentes e em estado sólido, produzem uma atenuação maior do que a causada pela neve. De qualquer forma, nenhum efeito substancial tende a ser produzido no enlace porque a quantidade de precipitação produzida de uma vez não é muito grande.

Pedras de granizo têm usualmente 5 mm de diâmetro e raramente alcançam 100 mm a 150 mm. Uma vez que as pedras de granizo se formam no interior de nuvens Cúmulos Nimbus, [2.16], elas são mais observadas em períodos quentes e ocasionalmente em regiões tropicais tais quais África e América do Sul. De qualquer forma, eles raramente se tornarão problemas sérios a serem considerados no projeto do rádio enlace devido a sua quantidade e frequência.

2.4.5 Atenuação Devido a Gases Atmosféricos

A atenuação devido a gases atmosféricos na banda SHF ocorre devido a absorção causada pelo oxigênio e pelo vapor d'água presentes na atmosfera [2.1], [2.2], [2.10], [2.17].

Este efeito é altamente dependente da frequência, o que significa que a atenuação devido à absorção atmosférica é muito maior em algumas bandas de frequência do que em outras.

A quantidade de vapor d'água na atmosfera varia de acordo com o percurso das ondas de rádio, por exemplo, se o caminho da propagação está sobre o

continente ou sobre o oceano, e também depende da altitude e da estação do ano, portanto, a estimativa de absorção não é tão simples como é para o oxigênio.

Uma vez que a densidade do oxigênio na atmosfera é proporcional à densidade da própria atmosfera, seu efeito pode ser considerado de forma abrangente para um dado caminho de um rádio-enlace.

A figura 2 mostra a atenuação, em dB/km, devido a absorção pelo oxigênio e pelo vapor d'água, bem como devido a outros fatores (chuva). O que se pode destacar a partir dela é que o vapor d'água (10 g/m^3 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$), para as frequências acima de 15 GHz e inferiores a 40 GHz, tem um peso maior na composição da atenuação atmosférica do que a atenuação imposta pelo gás oxigênio (a pressão de 760 mmHg), atingindo um valor máximo na frequência de 22,23 GHz.

Para frequências superiores a 40 GHz, até 80 GHz, já fora da faixa SHF, a atenuação imposta devido ao oxigênio passa a ser predominante, atingindo um valor de pico na frequência de 60 GHz.

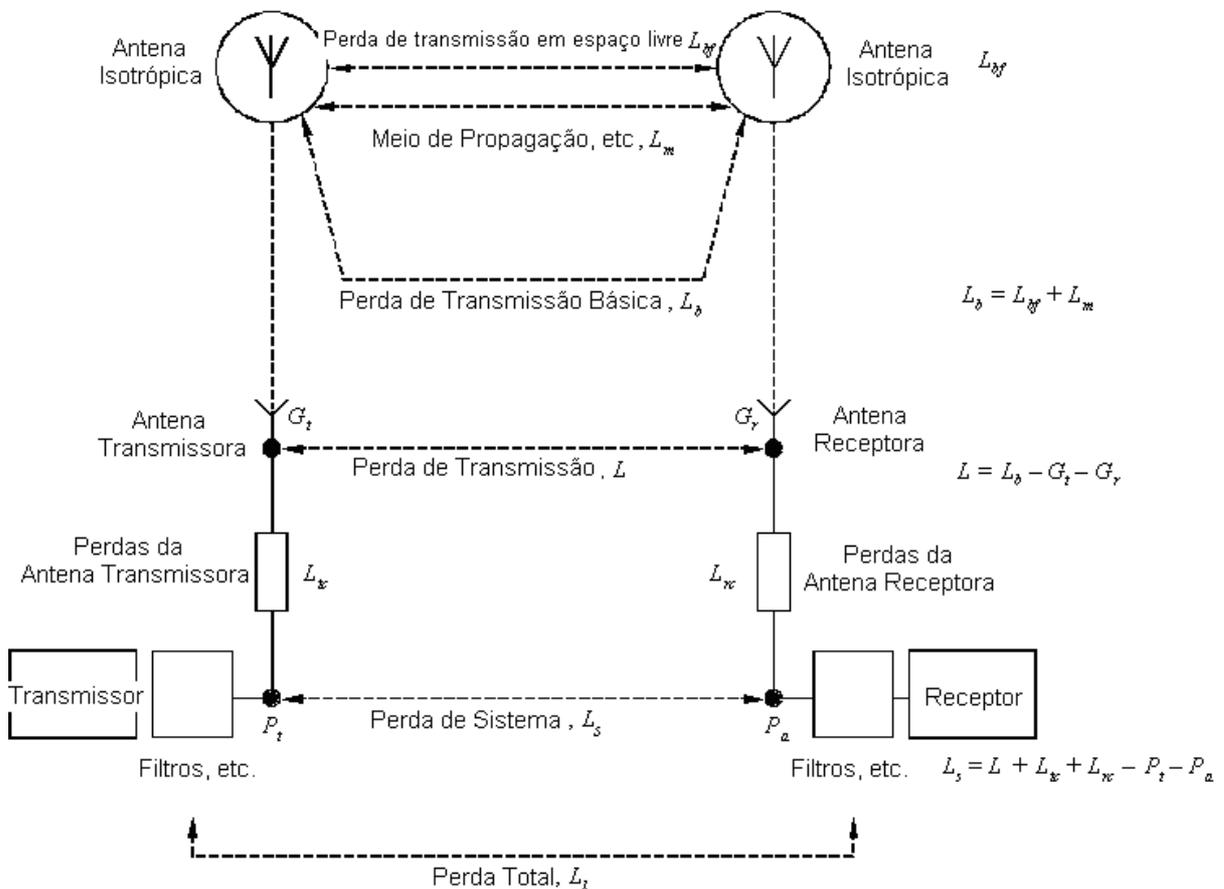
No deserto, onde há pouca chuva, a atenuação que predomina é aquela devido ao oxigênio. De qualquer forma, esta atenuação é geralmente pequena, podendo até vir a ser desconsiderada em certos casos, exceto na faixa de frequências entre 50 GHz e 70 GHz, [2.6].

2.5 CONCEITO DE PERDA DE TRANSMISSÃO PARA RÁDIO ENLACES

Em um rádio enlace, entre o emissor e o receptor, a razão entre a potência fornecida pelo transmissor e a potência disponível na entrada do receptor depende de diversos fatores tais como: perdas nas antenas; perdas nos cabos; atenuação devido aos mecanismos de propagação; as perdas devido a equipamentos mal ajustados; etc.

É sempre interessante padronizar a terminologia e notações empregadas ao longo de um trabalho para caracterizar a perda de transmissão e seus componentes. A figura 4 ilustra o conceito de perda de transmissão, mostrando os diversos componentes de um rádio enlace (Transmissor, Receptor, Antenas, Cabos, Meio de Propagação, etc.), e as perdas entre os diversos pontos do enlace. As atenuações correspondentes a figura 4 são descritas em 2.5.1 a 2.5.6, derivadas a partir da fórmula de transmissão de Friis.

FIGURA 04 – CONCEITO DE PERDA DE TRANSMISSÃO



FONTE: ITU-R P.341-5: The concept of transmission loss for radio links, 2001.

2.5.1 A Fórmula de Friis e a Perda de Transmissão Básica em Espaço Livre (L_{bf})

A fórmula de transmissão de Friis é a base para o cálculo das atenuações de um enlace operando em altas frequências (faixa UHF e superiores), equação 6. Esta equação mostra que a potência da onda irradiada decresce com o quadrado da distância entre a antena transmissora e a receptora, supondo uma área efetiva constante, A_{er} . Como não está computada a perda por dissipação de potência no meio de propagação, significa que o pequeno valor captado é devido ao fato de que a energia da onda espalha-se em todas as direções do espaço, embora haja predominância para as regiões determinadas pelos lobos de irradiação da antena transmissora.

$$P_R = \frac{G_T \cdot P_T \cdot A_{er}}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (6)$$

onde:

P_R : potência disponível no receptor [W]

P_T : potência irradiada por uma antena isotrópica [W]

d : distância entre as antenas transmissora e receptora [km]

A_{er} : área efetiva

G_T : ganho direcional de transmissão da antena, na direção de propagação [dB].

A relação entre a área efetiva e a diretividade de uma antena, referida à antena isotrópica, é conhecida. Desconsiderando-se as perdas de potência na antena receptora, seu ganho aproxima-se da diretividade e, portanto, $A_{er} = \lambda^2 \cdot G_R / 4 \cdot \pi$ [2.8]. Logo a equação de Friis pode ser reescrita como:

$$P_R = \frac{G_T \cdot G_R \cdot P_T \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot d^2)} \quad (7)$$

onde:

P_R : potência disponível no receptor [W]

P_T : potência irradiada por uma antena isotrópica [W]

d : distância entre as antenas transmissora e receptora [km]

λ : comprimento de onda

G_t : ganho de transmissão da antena, em dB, na direção de propagação.

G_r : ganho de recepção da antena, em dB, na direção de propagação.

A atenuação devido a propagação no trajeto é dada pela razão entre a potência liberada pela antena transmissora e a potência recebida na entrada do receptor:

$$A = \frac{P_T}{P_R} = \frac{4\pi \cdot d}{G_T \cdot A_{er}} = \frac{(4\pi \cdot d)^2}{G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2} = \frac{1}{G_T \cdot G_R} \cdot \left(\frac{4\pi \cdot f \cdot d}{c} \right)^2 \quad (8)$$

onde:

P_R : potência disponível no receptor [W]

P_T : potência irradiada por uma antena isotrópica [W]

f : frequência, em GHz.

d : distância entre as antenas transmissora e receptora

c : velocidade da luz no vácuo.

A_{er} : área efetiva

G_t : ganho direcional de transmissão da antena, na direção de propagação.

G_r : ganho direcional de recepção da antena, na direção de propagação.

que são maneiras também difundidas da fórmula de Friis. É bastante usual expressar esta relação em dB, utilizando a distância em km, a velocidade da luz no vácuo, c , e a frequência em GHz, obtendo-se:

$$A = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d - G_t - G_r \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

onde:

f : frequência, em GHz.

d : distância do enlace, em km.

G_t : ganho de transmissão da antena, em dB, na direção de propagação.

G_r : ganho de recepção da antena, em dB, na direção de propagação.

Se ambas as antenas fossem isotrópicas, $G_r = G_t = 1$, e se a distância entre as antenas é muito maior que o comprimento de onda, λ , a equação 8 reduz-se a:

$$L_{bf} = A_0 = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{c} \right)^2 \quad \text{ou} \quad L_{bf} = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

onde:

f : frequência, em GHz.

d : distância do enlace, em km.

c : velocidade da luz no vácuo.

também chamada de atenuação de espaço livre, A_0 ou L_{bf} .

Se o sistema, em seus terminais ou ao longo do trajeto, apresenta qualquer atenuação adicional (cabos, conectores, atenuação devido a obstáculos, etc.), o valor, se expresso em dB, deve ser somado à equação 10. Nos itens 2.5.2 a 2.5.6 têm-se as demais perdas de transmissão do enlace consideradas.

2.5.2 Perda de Transmissão Básica (L_b)

É a perda de transmissão que ocorreria se as antenas fossem substituídas por antenas isotrópicas com a mesma polarização das antenas reais e o caminho de propagação permanecesse inalterado, desconsiderando-se os efeitos dos obstáculos próximos as antenas e incluindo-se as perdas do caminho de propagação.

$$L_b = L_{bf} + L_m \quad [\text{dB}] \quad (11)$$

onde:

L_{bf} : perda de transmissão básica em espaço livre.

L_m : perda relativa ao espaço livre.

2.5.3 Perda Relativa ao Espaço Livre (L_m)

É a diferença entre a perda de transmissão básica e a perda de transmissão básica em espaço livre, expressa em dB, e pode ser expressa por:

$$L_m = L_b - L_{bf} \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

A perda relativa ao espaço livre, L_m , agrupa perdas de diferentes tipos, tais como:

- Por absorção (ionosférica, atmosférica ou precipitação);
- Por difração em obstáculos;
- Por reflexão efetiva ou perda por espalhamento;
- Efeito de interferência de ondas entre o raio direto e os raios refletidos pelo chão, por outros obstáculos ou camadas atmosféricas;
- Perda devido ao descasamento de polarização, que pode advir a partir de qualquer diferença de polarização entre as antenas para um caminho de propagação.

2.5.4 Perda de Transmissão (L)

É a razão, geralmente expressa em dB, entre a potência irradiada pela antena transmissora e a potência que estaria disponível na saída da antena receptora caso não houvesse perda nos circuitos de rádio frequência, assumindo que os diagramas de radiação são mantidos.

A perda de transmissão pode ser expressa por:

$$L = L_b - G_t - G_r \quad [\text{dB}] \quad (13)$$

onde:

G_t : ganho de transmissão da antena, na direção de propagação, em dB.

G_r : ganho de recepção da antena, na direção de propagação, em dB.

2.5.5 Perda de Sistema (L_S)

É a razão, geralmente expressa em dB, entre a potência de entrada nos terminais da antena transmissora e a potência do sinal disponível nos terminais da antena receptora, incluindo-se as perdas dos circuitos de RF associadas as antenas, cabos, terminais, etc.

A perda do sistema pode ser expressa por:

$$L_S = L + L_{tx} + L_{rc} \quad [\text{dB}] \quad (14)$$

onde:

L_{tx} : perdas, em dB, no circuito de transmissão da antena.

L_{rc} : perdas, em dB, no circuito de recepção da antena.

2.5.6 Perda Total em um rádio enlace (L_I)

É a razão, geralmente expressa em dB, entre a potência fornecida pelo transmissor e a potência recebida pelo receptor sob condições de instalação, propagação e operação reais.

2.5.7 Margem de Desvanecimento (F_m)

É a diferença entre a soma da potência de transmissão do rádio transmissor com a sensibilidade do receptor de rádio, e a perda total do sistema, em dB, expressa por:

$$F_m = (|P_{tx}| + |\text{Sens}|) - L_I \quad [\text{dB}] \quad (15)$$

onde:

P_{tx} : potência de saída do rádio, em dBm.

Sens : sensibilidade do receptor de rádio, em dB.

L_I : perda total do sistema.

2.6 ESTIMATIVA DE ATENUAÇÃO GASOSA

2.6.1 Atenuações Específicas Devido ao Oxigênio e ao Vapor d'Água

As atenuações específicas devido ao oxigênio (ar seco), γ_o , e ao vapor d'água, γ_w , a partir do nível do mar até uma altitude de 10 km, podem ser estimadas utilizando-se os seguintes algoritmos simplificados [2.20].

Para o oxigênio, a atenuação γ_o (dB/km) é dada pelas equações 16 a 20 :

Para $f \leq 54$ GHz

$$\gamma_o = \left[\frac{7.2 r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34 r_p^2 r_t^{1.6}} + \frac{0.62 \xi_3}{(54 - f)^{1.16 \xi_1} + 0.83 \xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (16)$$

com:

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_t, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515) \quad (17)$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_t, 0.5146, -4.6368, -0.1921, -5.7416) \quad (18)$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_t, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854) \quad (19)$$

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1 - r_p) + d(1 - r_t)] \quad (20)$$

onde:

f : frequência (GHz).

$r_p = p/1013$

$r_t = 288/(273 + t)$

p : pressão (hPa).

t : temperatura (°C).

Para o vapor d'água a atenuação γ_w (dB/km) é dada pelas equações 21 a 24:

$$\gamma_w = \left\{ \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1-r_t)]}{(f-22.235)^2 + 9.42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1-r_t)]}{(f-183.31)^2 + 11.14\eta_1^2} \right. \\ + \frac{0.08\eta_1 \exp[6.44(1-r_t)]}{(f-321.226)^2 + 6.29\eta_1^2} + \frac{3.66\eta_1 \exp[1.6(1-r_t)]}{(f-325.153)^2 + 9.22\eta_1^2} \\ + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\ + \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\ \left. + \frac{8.3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[0.99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \right\} f^2 r_t^{2.5} \rho \times 10^{-4} \quad (21)$$

com:

$$\eta_1 = 0.955 r_p r_t^{0.68} + 0.006 \rho \quad (22)$$

$$\eta_2 = 0.735 r_p r_t^{0.5} + 0.0353 r_t^4 \rho \quad (23)$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2 \quad (24)$$

onde:

ρ : densidade de vapor d'água, em g/m³.

A figura 5 ilustra a atenuação específica para freqüências de 1 GHz a 350 GHz ao nível do mar para o ar seco e para o vapor d'água, com densidade de 7,5 g/m³ e pressão de 1013 hPa.

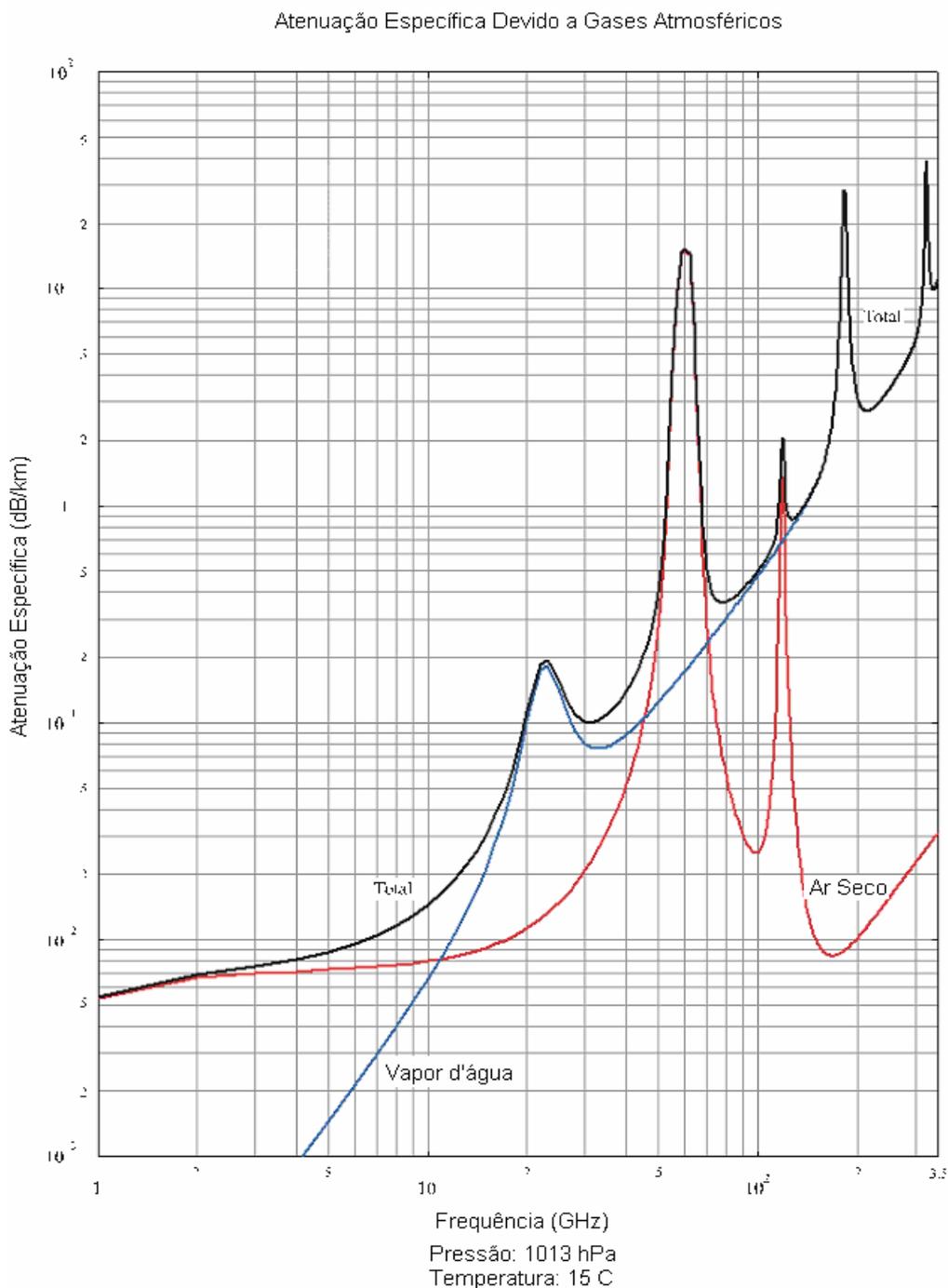
A curva em vermelho mostra a atenuação específica devido ao ar seco, em dB/km, em função da freqüência. Notam-se os dois picos de atenuação nas freqüências de 60 GHz e 120 GHz, que são as freqüências de ressonância da molécula de oxigênio.

A curva em azul mostra a atenuação específica devido ao vapor d'água, em dB/km, em função da freqüência. Notam-se os dois picos de atenuação nas

freqüências de 22,23 GHz e 190 GHz, que são as freqüências de ressonância da molécula de vapor d'água.

A curva em preto é a soma das atenuações devido ao vapor d'água e ao oxigênio, para uma dada freqüência.

FIGURA 05 – ATENUAÇÃO ESPECÍFICA DEVIDO A GASES ATMOSFÉRICOS



FONTE: Kerr, D. E. et al. Propagation of Short Radio Waves.

2.6.2 Atenuação de Percurso - Percurso Terrestre

A atenuação, devido ao oxigênio e ao vapor d'água, em um dado percurso r_0 pode ser escrita como:

$$A_{WO} = r_0 \cdot (\gamma_o \cdot P_{ho} + \gamma_w \cdot P_{hw}) \quad \text{dB} \quad (25)$$

Onde:

A_{WO} : atenuação devido ao oxigênio e ao vapor d'água.

r_0 : distância de propagação (km).

γ_o : atenuação devido ao oxigênio (dB/km).

γ_w : atenuação devido ao vapor d'água (dB/km).

P_{ho}, P_{hw} : fatores de correção devido a mudança das quantidades de oxigênio e vapor d'água que resultam da mudança da altitude média, acima do nível do mar, do caminho de propagação (incluindo também efeitos devidos à variação de temperatura).

Para um caminho horizontal, ou para caminhos levemente inclinados próximos ao solo ($\alpha < 3^\circ$), $P_{ho} = P_{hw} = 1$ e a atenuação devido ao percurso r_0 resume-se a:

$$A_{WO} = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \quad (26)$$

2.7 ATENUAÇÃO DEVIDO A NUVENS E NEBLINA

Para nuvens ou neblina consistindo inteiramente de pequenas gotículas, geralmente menores que 0,01 cm de diâmetro, a aproximação de Rayleigh [2.16] é válida (para frequências abaixo de 200 GHz) e é possível expressar a atenuação em termos de quantidade total de água por unidade de volume. A atenuação específica para nuvens ou neblina pode ser escrita como:

$$\gamma_c = K_l M \quad \text{dB/km} \quad (27)$$

onde:

γ_c : atenuação específica devido a nuvem/neblina (dB/km).

K_l : coeficiente de atenuação específica ((dB/km)/(g/m³)).

M : densidade de água líquida na nuvem ou na neblina (g/m³).

Para frequências acima de 100 GHz a atenuação devido a neblina torna-se bastante significativa. A densidade de água líquida na neblina é, tipicamente, 0,05 g/m³ para uma neblina média (visibilidade de aproximadamente 300 m) e de 1,15 g/m³ para neblina espessa (visibilidade de 50 m) [2.17].

2.7.1 Coeficiente de Atenuação Específico K_l

Um modelo matemático baseado no espalhamento de Rayleigh [2.18], que utiliza o modelo double-Debye [2.20] para a permissividade dielétrica $\epsilon(f)$ da água, pode ser utilizado para calcular o valor de K_l para frequências de até 1 THz:

$$K_l = \frac{0.819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad \text{(dB/km)/(g/m}^3\text{)} \quad (28)$$

onde f é a frequência (GHz), e

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (29)$$

A permissividade complexa da água, $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ é dada por sua parte imaginária ϵ'' :

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} \quad (30)$$

e por sua parte real, ε' :

$$\varepsilon'(f) = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right]} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2\right]} \quad (31)$$

onde:

$$\varepsilon_0 = 77,6 + 103,3 (\theta - 1) \quad (32)$$

$$\varepsilon_1 = 5,48 \quad (33)$$

$$\varepsilon_2 = 3,51 \quad (34)$$

$$\theta = 300 / T \quad (35)$$

T : Temperatura [K]

f : Freqüência [GHz]

As freqüências de relaxação principal e secundária da molécula d'água são dadas respectivamente por:

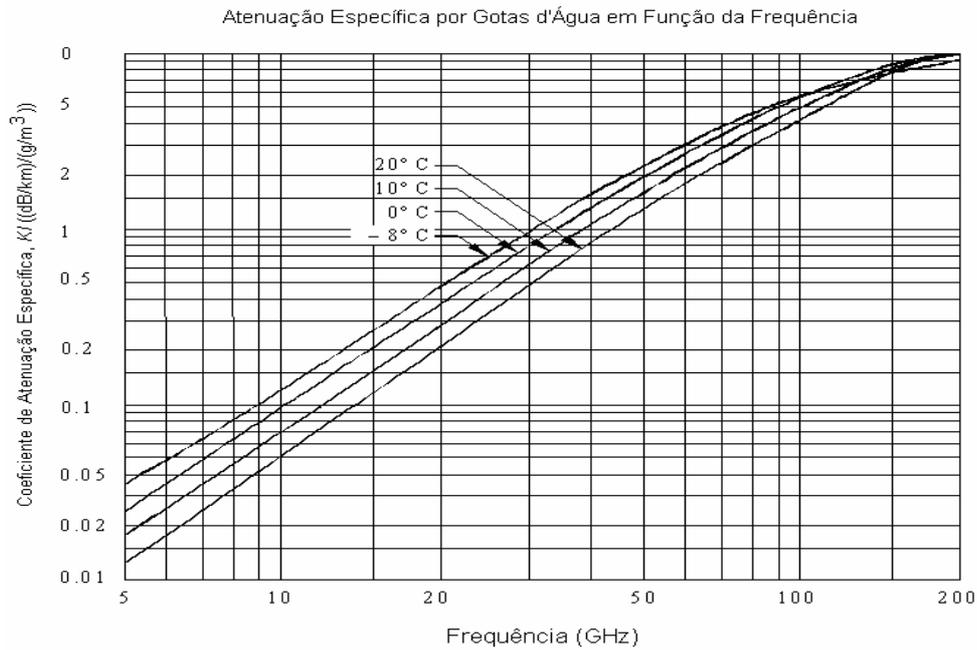
$$f_p = 20,09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \quad \text{GHz} \quad (36)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \quad \text{GHz} \quad (37)$$

A figura 6 mostra os valores de K_l , (dB/km)/(g/m³), versus freqüências de 5 GHz a 200 GHz, onde destacam-se as 4 curvas de temperatura, -8 °C, 0 °C, 10 °C e 20 °C. Por exemplo, caso houvesse a formação de neblina com densidade de 1 g/m³, a temperatura de 10 °C e freqüência de 20 GHz, o coeficiente K_l seria de, aproximadamente, 0,3 ((dB/km)/(g/m³)).

A partir da figura 6 fica claro que quanto menor é a temperatura, maior é o valor do coeficiente de atenuação específica, o que permanece válido até a freqüência de 150 GHz, aproximadamente.

FIGURA 06 – ATENUAÇÃO ESPECÍFICA POR GOTAS D'ÁGUA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA



FONTE: Shibuia, S. A Basic Atlas of Radio Wave Propagation. J. Wiley & Sons, 1987.

2.8 MODELO DE ATENUAÇÃO ESPECÍFICO PARA CHUVA PARA USO EM MÉTODOS DE PREDIÇÃO

Considerando que há a necessidade de se calcular a atenuação devido a chuva a partir do conhecimento da taxa de chuvas, tem-se que:

A atenuação específica γ_R (dB/km) é obtida a partir da taxa de chuva R (mm/h) utilizando-se a relação:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (38)$$

Os valores para os coeficientes k e α são determinados em função da frequência, em GHz, na faixa de 1 GHz a 1000 GHz, a partir das equações 39 e 40, que foram desenvolvidas a partir de cálculos de espalhamento [2.22].

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (39)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (40)$$

onde:

f : frequência (GHz).

k : k_H ou k_V .

α : α_H ou α_V .

Os valores de constantes para o cálculo do coeficiente k_H , polarização horizontal, são dados na tabela 2 e para o coeficiente k_V , polarização vertical, na tabela 3. Nas tabelas 4 e 5 têm-se os valores para as constantes relacionadas aos coeficientes α_H , polarização horizontal, e α_V , polarização vertical, respectivamente.

TABELA 2 - COEFICIENTES DE K_H

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33980	-0.10008	1.13098		
2	-0.35351	1.26970	0.45400	-0.18961	0.71147
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

FONTE: ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods

TABELA 3 - COEFICIENTES DE K_V

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061		
2	-3.44965	-0.22911	0.51059	-0.16398	0.63297
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

FONTE: ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods

TABELA 4 - COEFICIENTES DE α_H

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14318	1.82442	-0.55187		
2	0.29591	0.77564	0.19822	0.67849	-1.95537
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

FONTE: ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods

TABELA 5 - COEFICIENTES DE α_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07771	2.33840	-0.76284		
2	0.56727	0.95545	0.54039	-0.053739	0.83433
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

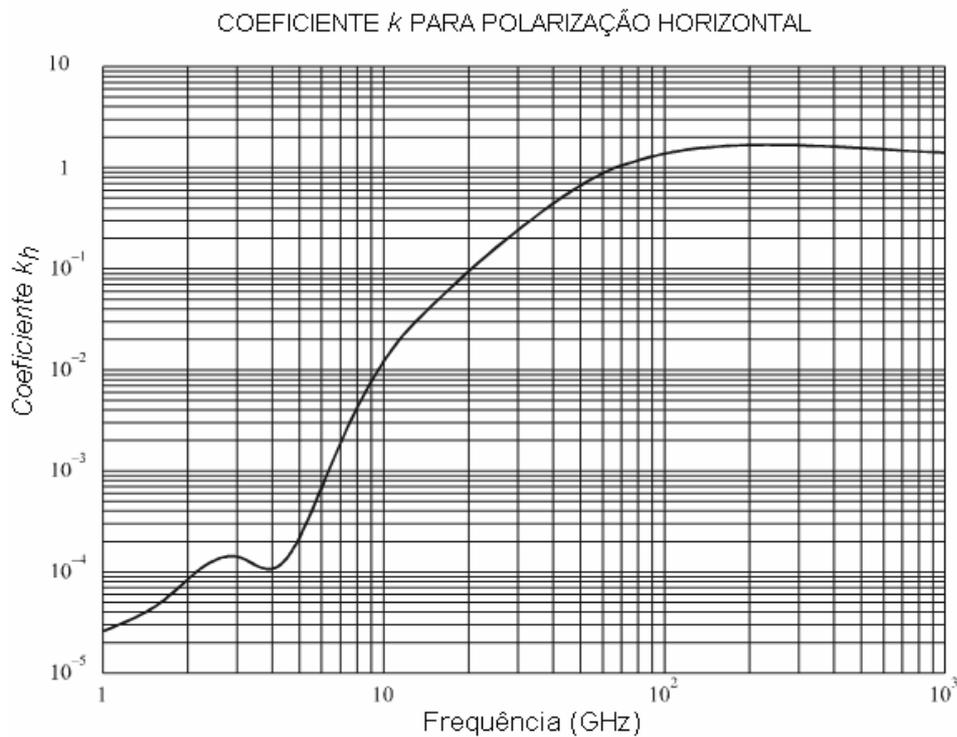
FONTE: ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods

A variação dos coeficientes k_H , α_H , k_V e α_V , em função da frequência é ilustrada pelas figuras 7, 8, 9 e 10, respectivamente.

A partir das figuras 7 e 9, percebe-se que os coeficientes k_H e k_V apresentam um crescimento quase constante na faixa de frequências de 10 GHz a 100 GHz. Acima de 100 GHz os valores de k_H e k_V tendem a se estabilizar assumindo valores entre 1 e 2.

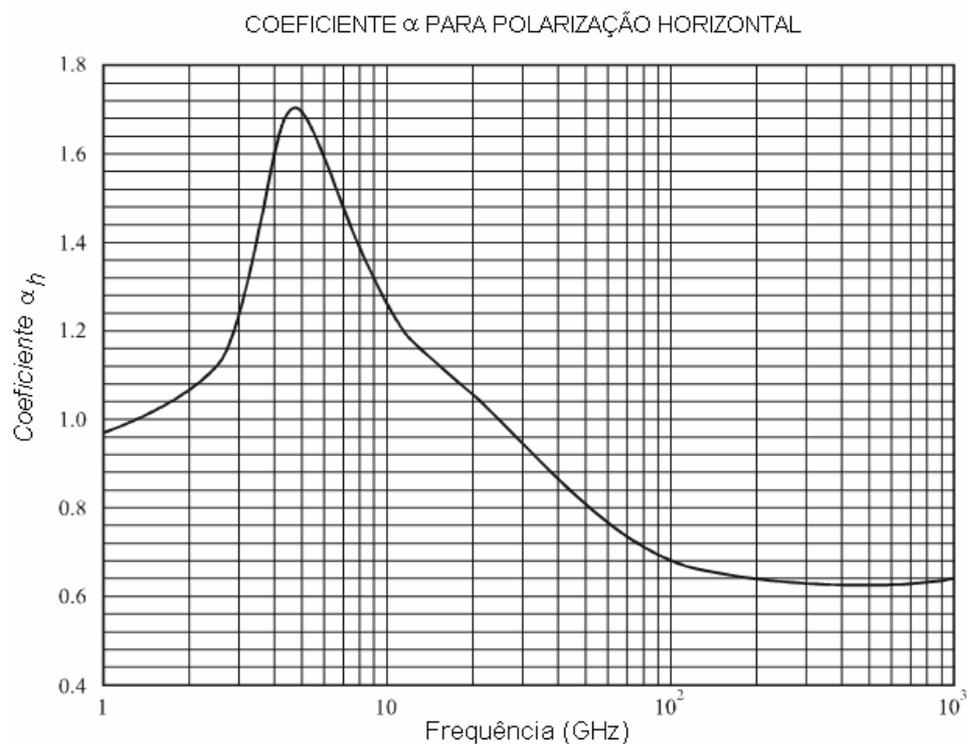
A partir das figuras 8 e 10, percebe-se que os coeficientes α_H e α_V apresentam um decaimento quase constante na faixa de frequências de 5 GHz a 100 GHz. Acima de 100 GHz os valores de α_H e α_V tendem a se estabilizar assumindo valores entre 0,6 e 0,7.

FIGURA 07 – COEFICIENTE k PARA POLARIZAÇÃO HORIZONTAL (k_H)



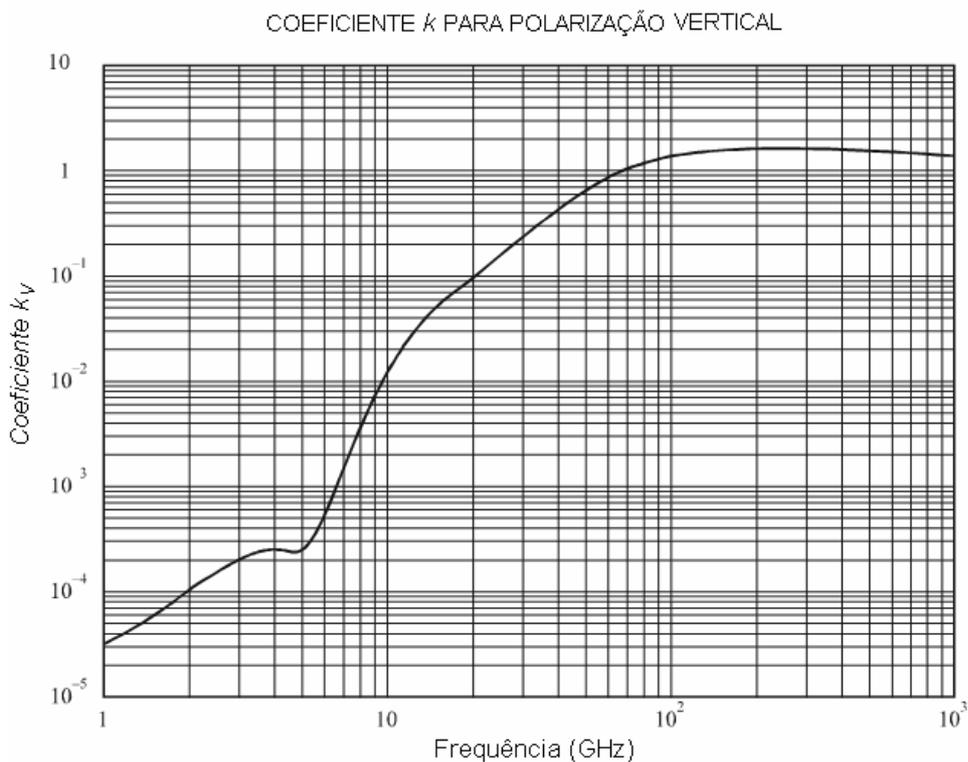
FONTE: ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods

FIGURA 08 – COEFICIENTE α PARA POLARIZAÇÃO HORIZONTAL (α_H)



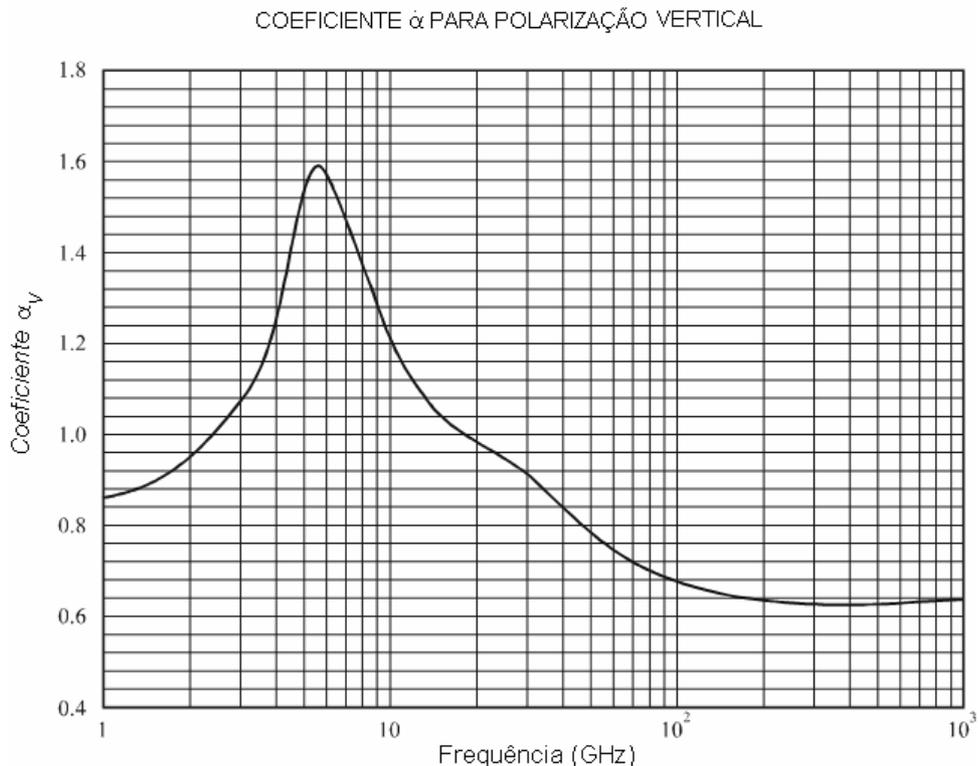
FONTE: ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods

FIGURA 09 – COEFICIENTE k PARA POLARIZAÇÃO VERTICAL (k_V)



FONTE: ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods

FIGURA 10 – COEFICIENTE α PARA POLARIZAÇÃO VERTICAL (α_V)



FONTE: ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods

2.9 CONFIABILIDADE DO SISTEMA E VALORES ESTATÍSTICOS DA INTENSIDADE DE CHUVA

A fim de se poder calcular a confiabilidade do sistema em minutos, deve-se obter dados de intensidade de chuva, R , do observatório que esteja localizado mais próximo ao caminho de propagação. O valor da confiabilidade do sistema também deve ser um valor estatístico, correspondendo a uma taxa de tempo específica, em minutos, pela qual é necessário manter-se o desempenho do sistema [2.23]. Por exemplo, quando a taxa de tempo pela qual deve manter-se o desempenho do sistema é de $q(\%)$, o complemento

$$p = 100 - q \quad \% \quad (41)$$

indica a taxa de tempo pela qual o desempenho do sistema pode degradar abaixo do requerimento.

A chuva tende a se concentrar em alguns meses durante o ano. Na absorção presente no caminho de propagação do rádio enlace a ênfase deve ser dada na manutenção do desempenho do enlace durante estes períodos, e é mais realista expressar a confiabilidade como 99,99 % do tempo durante os 2 a 4 meses mais chuvosos, exceto por x minutos.

Por exemplo, os 99,99 % dos três meses mais chuvosos podem ser convertidos para um período expresso em minutos por “exclusão”, a partir de 42 e 43:

$$p = 100 - 99,99 = 0,01\% \quad (42)$$

$$p(\text{minutos}) = \{3(\text{meses}) \cdot 30(\text{dias}) \cdot 24(\text{horas}) \cdot 60(\text{minutos})\} \cdot \frac{P}{100} = 13 \text{ minutos} \quad (43)$$

Portanto, o projeto do sistema que garantirá o desempenho do sistema deve ser feito de forma que, excluindo-se a chuva forte responsável por p % da quantidade total de chuvas da estação mais chuvosa, o valor da maior intensidade de chuva na porção remanescente deve ser utilizado para o cálculo da atenuação devido a chuva.

2.9.1 Método para Determinar os x Minutos de Intensidade de Chuva para uma Probabilidade Cumulativa Percentual p

Os períodos de observação devem ser, idealmente, superiores a 5 anos. Cada ano consiste de 1 mês a 4 meses mais chuvosos, e a precipitação é determinada a cada x minutos (usualmente 10 minutos a 60 minutos de intensidade de chuva) ao longo de todo o período a ser observado.

A intensidade de chuva para qualquer período de x minutos, 10 minutos a 60 minutos, sem chuva ou neve é indicada como 0. O número total de dados, para o caso de períodos de 10 minutos, em 3 meses, são: 6 por hora, 144 por dia, 4320 por mês e 12960 por ano a ser considerado.

Deve-se ordenar o número total destes dados na ordem de intensidades decrescentes e extrair aqueles correspondentes a, ou o mais próximo a, 10/1000 do número total de dados. Os dados resultantes representam o 0,01 % da intensidade de chuva de x minutos.

2.10 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentadas as análises, estudos e modelamentos pertinentes ao trabalho proposto. Inicialmente foi descrita a composição atmosférica, e os principais fenômenos atmosféricos que ocorrem na troposfera e que afetam a propagação das ondas eletromagnéticas na faixa SHF, com foco voltado a faixa de frequências de 23,6 GHz. Foram expostas as características mais relevantes de fenômenos como: chuva, incluindo a análise da distância efetiva da mesma em um rádio enlace; nuvens e neblina; fumaça e tempestades de areia; neve e granizo; e gases atmosféricos.

Na seqüência apresentou-se o conceito de perda de transmissão em rádio enlaces e descreveu-se os modelamentos a serem utilizados, para o cálculo da atenuações específicas devido a: gases atmosféricos (Oxigênio e o Vapor d'água); nuvens e neblina; e a chuva.

Por fim foi dada uma sucinta explanação sobre o conceito de confiabilidade de um sistema e dos valores estatísticos de intensidade de chuva.

O exposto ao longo deste capítulo será, a seu momento, aplicado nos capítulos posteriores, em especial no capítulo 4, a fim de se realizar o estudo de caso proposto.

2.11 REFERÊNCIAS

[2.1] KIDDLE, P., "Millimetric Wave Systems - The Attractive Access Radio Solution", Radio Relay Systems, 11-14 October 1993.

[2.2] GIBBINS, C.J., "Radiowave Propagation in the Millimetric Bands", Rutherford Appleton Laboratories, presented at the Seminar "Business Opportunities in the Millimetric Wavebands", London, 27 June 1990.

[2.3] GIBBINS, C.J., "Millimetre-Wave Propagation Studies over a 500 m Path", Rutherford Appleton Laboratories.

[2.4] "Summary of RAL Research Projects", 1994.

[2.5] HAL, M. P. M. et al. Propagation of Radiowaves. IEE, London, 1996. Pág. 15, 16

[2.6] Shibuia, S. A Basic Atlas of Radio Wave Propagation. Japan: John Wiley & Sons, 1987.

[2.7] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004. Pág. 110

- [2.8] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004. Pág. 111
- [2.9] MONDAL, N. C. ET AL. Some rain rate and rain attenuation statistics at millimeter wavelengths in the tropics. Theoretical and Applied Climatology. Publisher: Springer Wien
- [2.10] COLLIN, R.E., "Antennas and Radiowave Propagation", McGraw-Hill International, 1985, pp. 401-410.
- [2.11] MARSHALL, J. S., PALMER, W. "The Distribution of Raindrops with Size". Journal of the Atmospheric Sciences: Vol. 5, No. 4, pp. 165–166.
- [2.12] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. P.839-3: Rain height model for prediction methods, 2001.
- [2.13] HALLIKAINEN, M. et al, "Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range". IEEE, nov 1986.
- [2.14] JAIN, Y. et al, "Attenuation in melting snow on microwave- and millimetre-wave terrestrial radio links". IEEE, 1985.
- [2.15] ITU-R Recommendation 840, "Attenuation due to cloud and fog", 1992.
- [2.16] EDWIN F. A Review of Hail Growth by Stochastic Collection in a Cumulonimbus Model. Journal Pure and Applied Geophysics. Issue Volume 113, Number 1 / December, 1975. Pages 1019-1034.
- [2.17] ITU-R Recommendation 676-1, "Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1-350 GHz", 1992
- [2.18] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004.
- [2.19] Kerr, D. E. et al. Propagation of Short Radio Waves. England: Peter Peregrinus Ltd, 1997.
- [2.20] LIEBEL, H. "A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz". Colorado, 1991.
- [2.21] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. P.676-6: Attenuation by atmospheric gases, 2005.
- [2.22] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. P.838-3: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, 2005.
- [2.23] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. P.841-4: Conversion of annual statistics to worst-month statistics, 2005.

CAPÍTULO 3

APLICAÇÕES DE ONDAS MILIMÉTRICAS

Neste capítulo, inicia-se a segunda parte da tese, que compreende um estudo de caso. Inicialmente, será dado um breve resumo do porquê utilizar a banda SHF para a transmissão de dados descrevendo as vantagens, bem como aplicações potenciais da mesma. Na seqüência, será discutido, sucintamente, quais são os pontos importantes e que devem ser considerados quando do projeto de um enlace ponto-a-ponto operando em 23,6 GHz e será proposta uma metodologia diferenciada para a concepção de tais enlaces.

3.1 INTRODUÇÃO

Até o momento, o uso da região milimétrica do espectro de rádio vinha sendo descrito sob o ponto de vista da propagação, descrevendo os efeitos dos gases atmosféricos e hidrometeoros¹ na transmissão de ondas de rádio nestas bandas.

Do ponto de vista de um planejador de sistemas de telecomunicações, que pretende se utilizar de enlaces para formar ou integrar uma rede de telecomunicação, a escolha de uma banda de frequência para operação é muito importante uma vez que as características da banda escolhida irão afetar o desempenho do serviço que será oferecido.

O planejador do sistema deve, inicialmente, considerar qual o tipo de serviço que pretende oferecer e então encontrar qual a região do espectro de rádio que é a mais adequada para este tipo de serviço.

Há alguns fatores que podem afetar a escolha da banda de frequência por parte do planejador do sistema, incluindo: o desempenho atingível pelo sistema numa determinada banda, a disponibilidade de frequências, o custo e a disponibilidade dos equipamentos.

A crescente demanda por canais de rádio, bem como o aumento da taxa de transmissão de dados dos sistemas de comunicação de forma geral, levou autoridades reguladoras, como a ANATEL, a considerar o uso da faixa milimétrica para sistemas de comunicação atuais e futuros. Foi considerado que sistemas de comunicação de curto alcance seriam os mais indicados para esta faixa de frequência devido aos efeitos da atmosfera e dos hidrometeoros¹ sobre o sinal.

1 - Meteoro constituído por um conjunto de partículas de água, na fase líquida ou sólida, em queda livre ou em suspensão na atmosfera. Os hidrometeoros mais comuns são: chuva, chuveiro e a neve. Fonte: INMET.

3.2 VANTAGENS EM SE UTILIZAR AS BANDAS MILIMÉTRICAS

Tradicionalmente, sistemas de comunicação operando em frequências inferiores a 10 GHz vinham sendo utilizados em enlaces de longa distância, acima de 40 km, em redes regionais e em áreas onde era muito difícil ou caro utilizar outros tipos de sistemas de transmissão.

Com o advento dos sistemas milimétricos, surgiu a oportunidade de se estenderem as aplicações e vantagens dos sistemas de enlaces fixos a bandas de frequências mais altas.

Como o sucesso de uma rede de comunicação está relacionado à habilidade do operador em fornecer serviços de comunicação para uma ampla gama de clientes com uma relação custo/benefício adequada, os sistemas de rádio milimétricos podem vir a ser a solução.

As bandas de frequência alocadas para os serviços fixos, entre 15 GHz e 25 GHz, também se tornaram importantes para o acesso local de curto alcance e mais recentemente para as aplicações de infra-estrutura de rede móvel. Estes enlaces já estão começando a ser utilizados, em larga escala, no exterior e seu uso vem crescendo a cada dia no Brasil.

Há algumas vantagens a serem observadas decorrentes do ambiente de propagação que existe para as frequências acima de 20 GHz. Onde curtas distâncias são necessárias, menos de 15 km, o uso de frequências abaixo de 20 GHz pode não ser a melhor solução devido ao tamanho dos equipamentos (antena), bem como o custo dos mesmos. Além disto, o congestionamento das bandas tradicionalmente utilizadas para operação de sistemas de comunicação, tais como 2 GHz, 4 GHz, 6 GHz e 7 GHz, faz com que seja difícil aumentar o número de enlaces necessários para suprir as novas aplicações emergentes.

Entre os benefícios oferecidos pela faixa SHF, destacam-se [3.1], [3.2]:

- **Baixo Custo**

O equipamento de rádio tem um bom custo/benefício quando comparado a sistemas alternativos (cabos e fibras ópticas). A instalação de cabos pode ser

bastante dispendiosa em ambientes urbanos, além de que, em muitas vezes, é necessário obter autorização para a passagem dos mesmos.

- Flexibilidade

Sistemas de rádio podem ser realocados para novos locais a fim de atender às demandas crescentes dando grande flexibilidade à rede de comunicação. A tecnologia digital permite que uma ampla gama de informações seja transmitida, tais como: voz, dados, imagens, etc. A possibilidade de se ajustar os parâmetros de transmissão, como freqüência e ganho de saída, também aumentam a flexibilidade.

- Facilidade de Instalação e Reconfiguração

O tamanho reduzido dos aparatos e antenas faz com que os sistemas de rádio sejam fáceis de serem instalados em redes urbanas e rurais. Antenas pequenas também podem reduzir as preocupações sobre o número crescente de antenas em áreas urbanas.

- Banda de freqüência disponível

Devido às freqüências utilizadas há maior largura de banda para transmissão de dados.

- Reutilização de Freqüência

O uso de freqüências relativamente altas permite sua reutilização em curtas distâncias², especialmente nas bandas acima de 20 GHz e em especial as mais próximas a 60 GHz.

- Padronização

As atividades de padronização de órgãos competentes, como o ITU-R, ETSI, ANATEL e CEPT, permitem a criação de sistemas operando em harmonia, com uma conseqüente redução de custo e de problemas de compatibilidade.

2 - Para redes SDH *Short Haul*, consideram-se curtas distâncias aquelas inferiores a 15km. Fonte: International Engineering Consortium.

- Restrições de planejamento

As restrições de planejamento para os equipamentos tendem a ser menores devido à dimensão das antenas e sua infra-estrutura (mastros, fixadores, etc.), ao contrário do que acontece com sistemas de cabo ou fibra óptica, por exemplo, que requerem permissões de escavação (cabo enterrado), permissão de passagens por dutos, fixação em postes ou mastros, etc.

3.3 APLICAÇÕES POTENCIAIS

De forma a encorajar operadores de serviço fixos e móveis a fazer maior uso da banda SHF e, portanto, desafogar o crescente congestionamento nas bandas de frequência mais baixas, algumas aplicações foram consideradas ainda na década de 80 pelas entidades reguladoras dos serviços de rádio.

As aplicações foram divididas, basicamente, em dois grupos: curto e longo prazo. As primeiras, como o próprio nome sugere, eram esperadas de virem a ser utilizadas tão logo fosse feito um acordo entre a operadora e a entidade que gerencia as faixas de frequência, enquanto as do segundo grupo eram esperadas dentro das próximas décadas, conforme surgisse a demanda para os serviços.

As aplicações previstas para a banda SHF eram [3.1], [3.3], [3.4]:

- Enlaces terrestres curtos, ponto a ponto, para fazer a comunicação de última milha entre os clientes e redes de cabo e/ou fibras ópticas (transmissão de dados, voz, imagens, etc.);
- Teledifusão Ponto-Multiponto, por exemplo, sistemas de difusão de vídeo por microondas (MVDS);
- Redes Locais sem fio, por exemplo LAN e WAN;
- Interconexão entre centrais de PABX sem fio;
- Comunicação entre prédios com visada direta;
- Aplicações para telefonia móvel, por exemplo comunicação entre estações rádio base (celular).

Aplicações de longo prazo:

- Sistemas de frenagem/anti-colisão para carros e trens;
- Aplicações de gerenciamento de tráfego como, por exemplo, comunicação entre veículos e pontos de comunicação ao longo da estrada informando as condições de trânsito, acidentes, etc;
- Comunicação interna em navios e aeronaves;
- Enlaces entre aeronaves e satélites;
- Vídeo-conferência.

Como se pode ver, a partir da lista de aplicações, os órgãos reguladores já vislumbravam os mais diversos usos para a banda SHF. O uso desta banda deve aumentar cada vez mais ao longo desta década e da próxima na medida em que mais bandas tornem-se disponíveis e conforme surjam novas aplicações.

Atualmente há algumas aplicações de rede de comunicação em uso, basicamente servindo de acesso de última milha, onde não há infra-estrutura para passagem de cabos e o rádio é a opção rápida e de menor custo.

Outra aplicação em destaque é um sistema de Infra-estrutura rodoviária dedicada para segurança veicular (DRIVE), adotado na Europa, com o objetivo de aumentar a segurança nas estradas, eficiência no transporte e qualidade ambiental [3.5], [3.6].

3.4 PROCEDIMENTO E PONTOS IMPORTANTES NO PROJETO DE UM RÁDIO ENLACE OPERANDO NA FAIXA SHF, EM 23,6 GHZ

Antes de se iniciar o projeto de um rádio enlace operando na faixa de 23,6 GHz, deve-se ter de forma clara quais são os aspectos mais relevantes do mesmo.

Tendo-se estabelecido, inicialmente, a faixa de frequência de operação do enlace e pré-determinados os pontos a serem interligados através do mesmo, deve-se:

1. Verificar, utilizando-se os dados de topografia e morfologia disponíveis, *in loco* se possível, se ao menos 60 % da metade inferior da 1ª Zona de Fresnel encontra-se livre de obstáculos físicos, de forma a garantir a propagação do sinal [3.7], [3.8].
2. Ter o histórico com dados confiáveis sobre as condições climáticas do caminho de propagação do rádio enlace, visto que estas, tal como analisado no Capítulo 2, influem na disponibilidade e qualidade do sinal.
3. Com base no histórico dos dados hidrometeorológicos da região de interesse, deve-se analisar os 2 meses a 4 meses mais chuvosos, por ano, e transformá-los em uma base de dados que possa vir a ser utilizada na modelagem a fim de quantificar os efeitos de atenuação devido a:
 - chuva;
 - nuvens e Neblina;
 - neve;
 - granizo.
4. Tendo-se as altitudes de cada ponto, em relação ao nível do mar, e o azimute entre as duas antenas, deve-se, utilizando o modelo apresentado em 2.6, quantificar os efeitos de atenuação devido a gases atmosféricos.
5. Após ter-se calculado as respectivas atenuações específicas, devido aos itens 3 e 4 acima, deve-se verificar se estes juntamente com os parâmetros pertinentes às antenas, equipamentos de rádio, cabos, bem como demais acessórios e a atenuação devido à propagação em espaço livre ainda permitem que o sistema tenha uma margem de desvanecimento tal que esta possa vir a compensar a atenuação devido a outros efeitos [3.8], [3.9], tais como: propagação multipercurso, polarização cruzada, etc.

O fluxograma 1, página 48, indica a metodologia proposta para a realização de rádio-enlaces ponto-a-ponto operando na faixa de 23,6 GHz.

A metodologia pode ser sumarizada da seguinte forma:

Inicialmente, definem-se as coordenadas geográficas e altitudes dos pontos a serem interligados, a frequência de operação, o tempo de disponibilidade do sistema, e então deve-se estudar o caminho de propagação e realizar o levantamento topográfico da área de interesse.

Deve-se, então, verificar se há obstáculos naturais e/ou artificiais no caminho de propagação. Caso haja, deve-se verificar se ao menos 60 % da 1ª Zona de Fresnel está livre. Caso não esteja, deve-se tentar liberá-la, seja realocando a posição e/ou a altitude de um ou ambos os pontos do enlace de forma a tentar sobrepujar eventuais obstáculos presentes no caminho de propagação.

Tendo ao menos 60 % da porção inferior da 1ª Zona de Fresnel liberada, devem-se analisar as características meteorológicas e atmosféricas do caminho de propagação, utilizando-se dados de estações meteorológicas próximas, pertinentes, ao caminho de propagação.

A partir da base de dados da região de interesse, obtida a partir de institutos de pesquisa confiáveis, devem-se quantificar os principais fatores que podem causar atenuação do sinal (nuvens, chuva, gases atmosféricos, granizo, neve, entre outros).

Deve-se dar especial destaque à precipitação, e utilizar a distância efetiva da célula de chuva¹ a fim de se estimar, adequadamente, qual a extensão de seus efeitos sobre o enlace.

Ainda com base nos dados meteorológicos, já filtrados e contendo os dados dos 2 meses a 4 meses mais chuvosos, deve-se quantificar, seguindo os modelos descritos no capítulo 2, as contribuições individuais de cada um dos fenômenos e por fim calcular a atenuação total ao longo de todo o percurso.

O próximo passo é escolher, entre os equipamentos disponíveis, um conjunto de rádios, cabos, conectores, antenas e demais acessórios de forma a estimar o desempenho, real, do rádio enlace.

Tendo-se o conjunto de equipamentos, devem-se calcular as perdas do sistema, tal como descrito em 2.5, incluso a atenuação devido aos fenômenos

1 - Entidade constituída por uma área dentro da qual a taxa de chuva é maior que um determinado limiar pré-definido. Fonte: Journal of the Atmospheric Sciences. Volume 56, Issue 1 (January 1999), pp 57-70

atmosféricos/meteorológicos, a fim de verificar se o rádio enlace é tecnicamente viável ou não, ou seja se a F_m resultante é maior que 0 dB.

Caso não o seja, pode-se tentar ajustar uma ou mais das seguintes características do sistema:

- Variar a taxa de erro de bits;
- Escolher outro esquema de codificação, que apresente se possível algum ganho de codificação [3.10];
- Escolher um novo conjunto de rádios com maior sensibilidade;
- Aumentar a diretividade e o ganho das antenas;
- Escolher outro tipo de polarização, por exemplo, vertical ou horizontal.
- Aumentar a potência de saída dos equipamentos de rádio;
- Encurtar ou trocar os cabos utilizados (conseqüentemente diminuindo a perda de transmissão no mesmo);
- Redimensionar o tempo de disponibilidade do enlace;
- Reposicionar as antenas, em altitude.

Tendo-se pré-definido um sistema cujas características globais permitam que o mesmo supere as atenuações impostas pelo meio de propagação, deve-se verificar qual é a margem de desvanecimento do sistema. Uma margem aceitável seria de, no mínimo, 20 dB, segundo Sklar [3.11], [3.8] a fim de compensar outros fenômenos que afetam a propagação das ondas de rádio, [3.9], [3.12], tais como:

- Multipropagação;
- Polarização cruzada;
- Difração;
- Refração;
- Outros.

Caso a margem de desvanecimento esteja abaixo do mínimo, 20 dB, o enlace ficará propenso a falha (*system outage*) e provavelmente seu tempo de falha será superior ao estimado inicialmente pelo projetista. Para evitar tal situação deve-se verificar se há alterações que possam ser aplicadas aos parâmetros do sistema, já mencionadas anteriormente, que o permitam atingir ao menos o limiar de 20 dB.

Caso as alterações das características do sistema não sejam viáveis ou possíveis, constata-se que o pretense enlace, ao menos nesta frequência, é inviável tecnicamente e resta como alternativa reiniciar a análise do rádio enlace utilizando-se uma outra faixa de frequência.

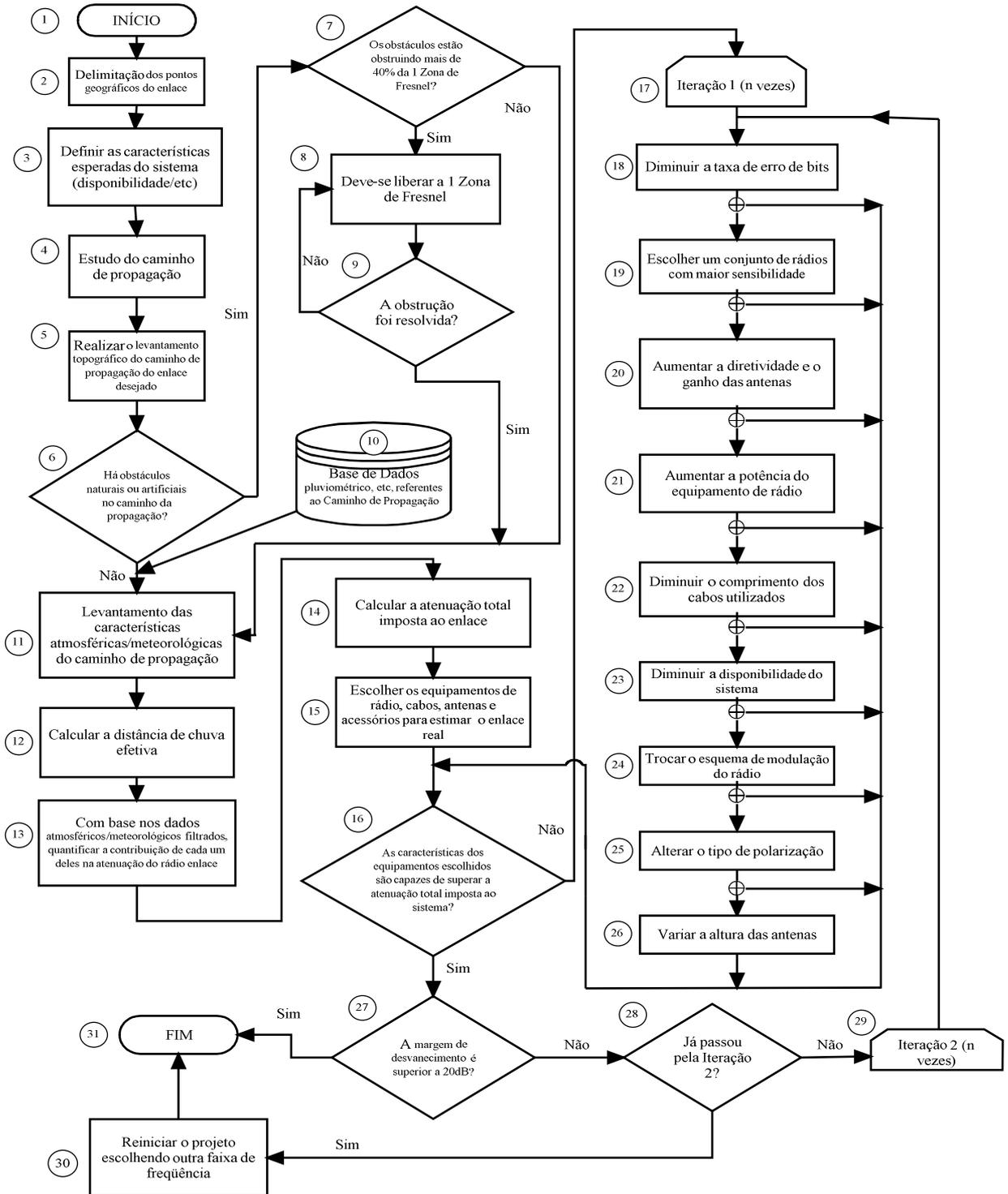
Os principais diferenciais e vantagens desta abordagem em relação a outras, Seidel [3.13] e Mattiello [3.14], residem no fato de:

1. Após escolher inicialmente uma faixa de frequências específica, levar em conta para a análise dos fenômenos meteorológicos (em especial da precipitação) a base de dados correspondente aos os 2 meses a 4 meses mais chuvosos, por ano. Com isto reduz-se expressivamente a quantidade de entradas a serem analisadas na base de dados, além de ser uma abordagem mais coerente a questão;
2. O cálculo da distância efetiva das células de chuva e a partir desta, e considerando-se os demais fatores atmosféricos/meteorológicos pertinentes, verifica-se se o enlace é tecnicamente viável ou não. Esta abordagem implica em não se superdimensionar, desnecessariamente, o enlace visto que células de chuva com tamanhos acima de D_{eff} , 2.4.1, são raras;
3. Ao se deparar com problemas, devido às características atmosféricas/meteorológicas da região, tentar contorná-los (na etapa de iteração do fluxograma 1), ajustando os parâmetros do sistema, até que as opções sejam esgotadas e só então cogitar-se a troca da faixa de frequência. Eventualmente, a troca de um ou outro parâmetro do sistema pode fazer com que um enlace "inviável" possa ser viabilizado com pequenas modificações.
4. É muito mais simples de ser empregada, visto que diversos fatores que prejudicam a propagação de um sinal são incorporados numa margem de desvanecimento de 20dB, Sklar [3.11], [3.8].

Como desvantagens em relação as metodologias propostas por Seidel [3.13] e Mattiello [3.14], tem-se :

1. Ao se restringir a análise dos fenômenos meteorológicos, devido a chuva principalmente, a apenas os 2 meses ou 4 meses mais chuvosos do ano corre-se o risco de se deixar de levar em conta pancadas de chuva, com intensidade superior a $R_{0,01\%}$ que possam vir a ocorrer nos outros meses do ano, o que poderia vir a causar eventual falha de comunicação no enlace;
2. Ao se tentar viabilizar/melhorar o rádio enlace, quando necessário, alterando suas características técnicas pode-se chegar à conclusão que os equipamentos e/ou acessórios para tal excedem o preço disposto a se pagar para o referido enlace.
3. Estas metodologias incluem explicitamente perdas devido a outros fatores, tais como: reflexão, refração, dentre outros, sendo neste ponto mais completos que a metodologia aqui proposta.
4. A metodologia proposta é válida considerando-se a intensidade de chuva de forma homogênea dentro da célula de chuva

FLUXOGRAMA 01 – METODOLOGIA PROPOSTA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE RÁDIO ENLACES



3.5 CONCLUSÃO

O presente capítulo descreve as vantagens e benefícios de se utilizar a banda SHF para transmissão de sinais. Aponta considerações que o planejador do sistema deve avaliar antes de escolher uma faixa de frequências para um dado enlace.

Aplicações potenciais para a banda SHF são apresentadas, e por fim, uma metodologia diferenciada para projetar enlaces na faixa SHF, com foco em 23,6 GHz, é apresentada e os pontos, macro, mais importantes no projeto do enlace descritos. Vantagens e desvantagens em relação a outras metodologias são apresentadas.

A partir da análise destes pontos, e seguindo a metodologia proposta, pode-se iniciar um estudo/projeto do enlace propriamente dito, operando na RUC, feito no Capítulo 4.

3.6 REFERÊNCIAS

- [3.1] STEMP, G., "The Development of the Use of the Millimetric Wavebands in the United Kingdom", Symposium of Frequency Resources Development, Tokyo, June 1993.
- [3.2] "Evolution of the Fixed Services above 20 GHz", ETNO June 1994.
- [3.3] KIDDLE, P., "Millimetric Wave Systems - The Attractive Access Radio Solution", Radio Relay Systems, 11-14 October 1993.
- [3.4] "The Use of the Radio Spectrum Above 30 GHz", UK DTI, September 1988.
- [3.5] JEACOCK, T.G. and DHAMRAIT, M.S., "Harmonization of Frequency Bands and Services", Seminar on business Opportunities in the Millimetric Wavebands, London, June 1990.
- [3.6] STEMP, G., "Broadband: Opportunities with Radio", Conference on Broadband Communications Networks, London, 1991.
- [3.7] "The Use of the Radio Spectrum Above 30 GHz", UK DTI, September 1988.
- [3.8] MCLARNON, B., "Microwave Radio Propagation: A Primer for Digital Experimenters", 1ed. Ottawa, 2000.
- [3.9] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004.
- [3.10] BERROU, C. et al, "Near Optimum Error Correcting Coding and Decoding", Communications, IEEE Transactions on Volume 44, Issue 10, Oct 1996 Page(s):1261 - 1271.
- [3.11] Sklar, B. "The Characterisation of Fading Channels". Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2a ed., Editora Prentice-Hall, 2001.

[3.12] HALL, M.P.M. et al, "Propagation of Radiowaves", UK, IEEE, 1996.

[3.13] SEIDEL, S.Y., "Radio propagation and planning at 28 GHz for local multipoint distribution service". Jun 1998.

[3.14] MATTIELLO, C. "Visibility estimation for urban radio-link design". UK, 1993.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO: ENLACE OPERANDO EM 23,6 GHz

Após a apresentação dos modelos de atenuação devido aos fenômenos meteorológicos, capítulo 2, das vantagens de utilizar a banda SHF e da proposta de uma metodologia diferenciada para projetar rádio enlaces, capítulo 3, é elaborado um estudo de caso dum rádio enlace operando na faixa de 23,6 GHz na região urbana de Curitiba. Os principais fatores que afetam a propagação são calculados, tendo-se como base dados meteorológicos reais do caminho de propagação e características técnicas de equipamentos e acessórios disponíveis comercialmente. Um rádio enlace equivalente é então simulado utilizando-se o programa CelPlanner, a fim de que se possa fazer um comparativo entre ambos apresentando os resultados e discussões no capítulo 5.

4.1 DESCRIÇÃO DO RÁDIO ENLACE

O rádio enlace, a ser analisado, deve servir de via bidirecional de transmissão de dados entre dois *sites*, com taxa de transmissão de 2xE1 (4 Mbit/s) e confiabilidade de 99,99 % do tempo de operação. O primeiro *site*, ilustrado pela figura 11, é o prédio do Sistema Meteorológico do Paraná e o segundo, figura 12, será a nova sede da empresa Fortex Ltda.

FIGURA 11 – SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ



FONTE: Sistema Meteorológico do Paraná

FIGURA 12 – SEDE DA FORTEX



FONTE: GFS Ind. Metalúrgica Ltda

Inicialmente, obteve-se *in loco*, utilizando-se um receptor GPS, as coordenadas geográficas das duas empresas. As respectivas coordenadas e altitudes encontram-se na tabela 6. Convém mencionar que as altitudes, dispostas na tabela 6, foram obtidas a partir de mapas topográficos.

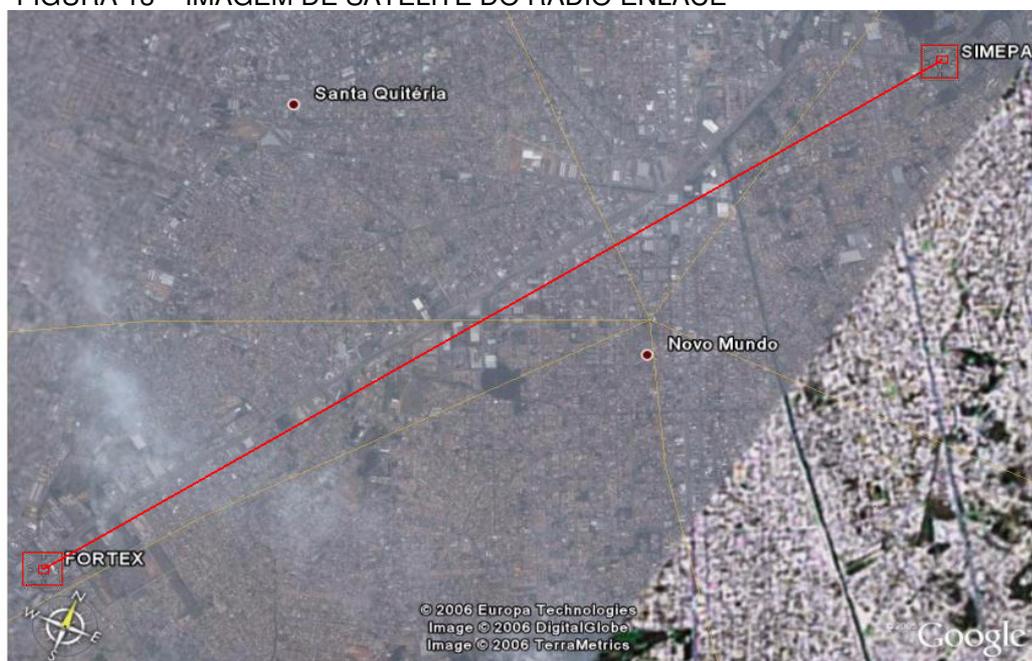
TABELA 06 - COORDENADAS DO RÁDIO ENLACE

DESCRIÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
Fortex	S 25°31'07.0"	W 049°17'31"	927 m
Simepar	S 25°27'05.0"	W 049°14'11.0"	944 m

No mapa 1, tem-se os dois pontos do sistema de rádio plotados sobre a imagem de satélite que abrange a área de interesse. A partir das coordenadas geográficas de ambos os pontos conclui-se que o enlace tem aproximadamente 9,32 km.

Deve-se salientar que este enlace foi escolhido, em meio a tantos os que seriam possíveis pelo fato de o estudo da viabilidade do mesmo ser de real interesse de ambas as partes (Simepar e Fortex), podendo vir a ser implementado num futuro próximo, o que poderia levar a comprovação ou não, na prática, da metodologia apresentada e do estudo proposto neste trabalho. O fato de o enlace apresentar uma distância relativamente curta, 9,32 km, não afeta a metodologia e nem o estudo realizado, pois a proposta não depende, em si, da distância considerada.

FIGURA 13 – IMAGEM DE SATÉLITE DO RÁDIO ENLACE



FONTE: Google Earth

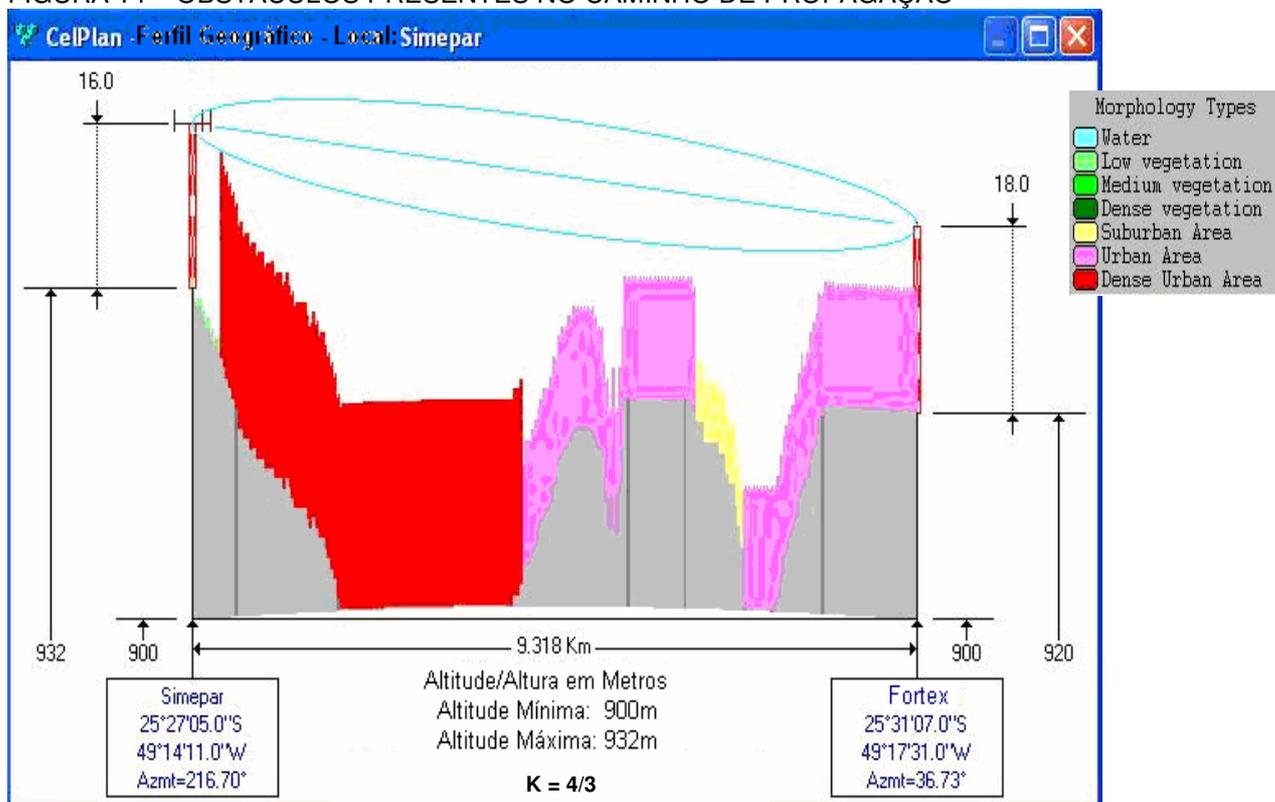
Utilizando-se a base de dados digital com a topografia e morfologia do Estado do Paraná, e o programa CelPlanner, plotou-se inicialmente os dois pontos de

interesse o que permitiu a visualização dos obstáculos naturais e artificiais que porventura estariam no caminho de propagação.

Inicialmente, verificou-se que caso fossem instaladas antenas no alto do prédio do Simepar e do prédio sede da Fortex, haveriam obstáculos artificiais que obstruiriam em torno de 50 % da 1ª Zona de Fresnel.

Seguindo a metodologia proposta buscou-se alternativas para manter livre ao menos 60 % da metade inferior da 1ª Zona de Fresnel. Para tal, alterou-se a altura das antenas, equivalente a inserção de dois pequenos mastros no topo de cada um dos edifícios, de 4 m sobre o prédio do Simepar e 5 m sobre o prédio da Fortex, e plotaram-se os pontos novamente, desta vez obtendo-se a figura 14.

FIGURA 14 – OBSTÁCULOS PRESENTES NO CAMINHO DE PROPAGAÇÃO



FONTE: CelPlanner

A partir da figura 14, verifica-se que a 1ª Zona de Fresnel está livre de obstáculos naturais ou artificiais, ou seja, há visada direta entre os dois pontos, o que, em um primeiro momento, garante a propagação do sinal.

A figura 15 ilustra o diâmetro da 1ª e da 2ª Zona de Fresnel, ao longo de todo o percurso de interesse, calculadas através da equação 44 [4.1].

$$\rho = 547,7 \cdot \sqrt{\frac{n \cdot d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}} \quad (44)$$

onde:

ρ : raio do elipsóide de Fresnel (m)

f : frequência (MHz)

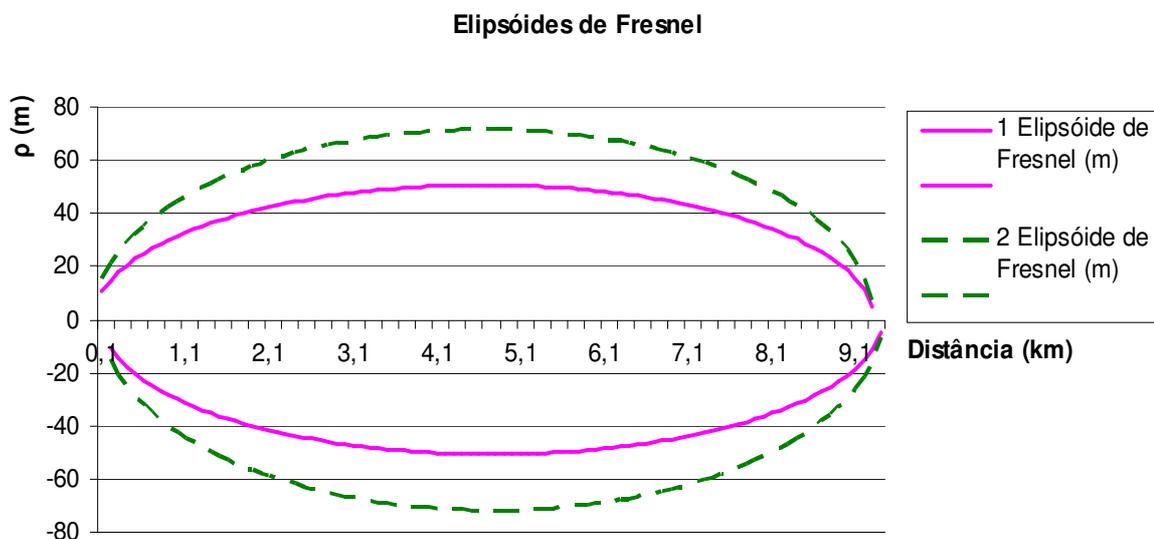
d : distância total do enlace (km)

d_1 : distância do ponto 1 ao obstáculo (km)

d_2 : distância do ponto 2 ao obstáculo (km)

n : número da zona de Fresnel

FIGURA 15 – ELIPSÓIDES DE FRESNEL



Nota-se também, a partir da base de dados do programa CelPlanner, figura 14, e a partir da imagem da região obtida via satélite, figura 13, que, aparentemente, não há vegetação de porte e monta significativa que possa oferecer problemas a propagação do sinal.

Entretanto, embora em um primeiro momento não existam barreiras físicas fixas que impeçam a realização do rádio enlace, não se pode dizer o mesmo do clima da região, por vezes instável apresentando nuvens de baixa altitude, chuvas e nevoeiro cujas interferências não devem ser ignoradas, bem como a atenuação devido aos gases atmosféricos, em especial o vapor d'água.

4.2 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS CONSIDERADOS

Entre os diversos tipos de antenas, equipamentos de rádio, cabos, conectores e acessórios disponíveis comercialmente, optou-se inicialmente pelos descritos em 4.2.1 a 4.2.4, tendo em vista suas relações custo/benefício quando comparadas aos demais equipamentos analisados. Seguindo a metodologia proposta, caso ao final do cálculo do enlace verifique-se que os equipamentos escolhidos não provêm as características necessárias para atender ao sistema de comunicação, ou estão superdimensionados, considerar-se-á sua troca por outros com características técnicas compatíveis, e preferencialmente mais acessíveis (financeiramente).

4.2.1 Antena do *Site* Simepar

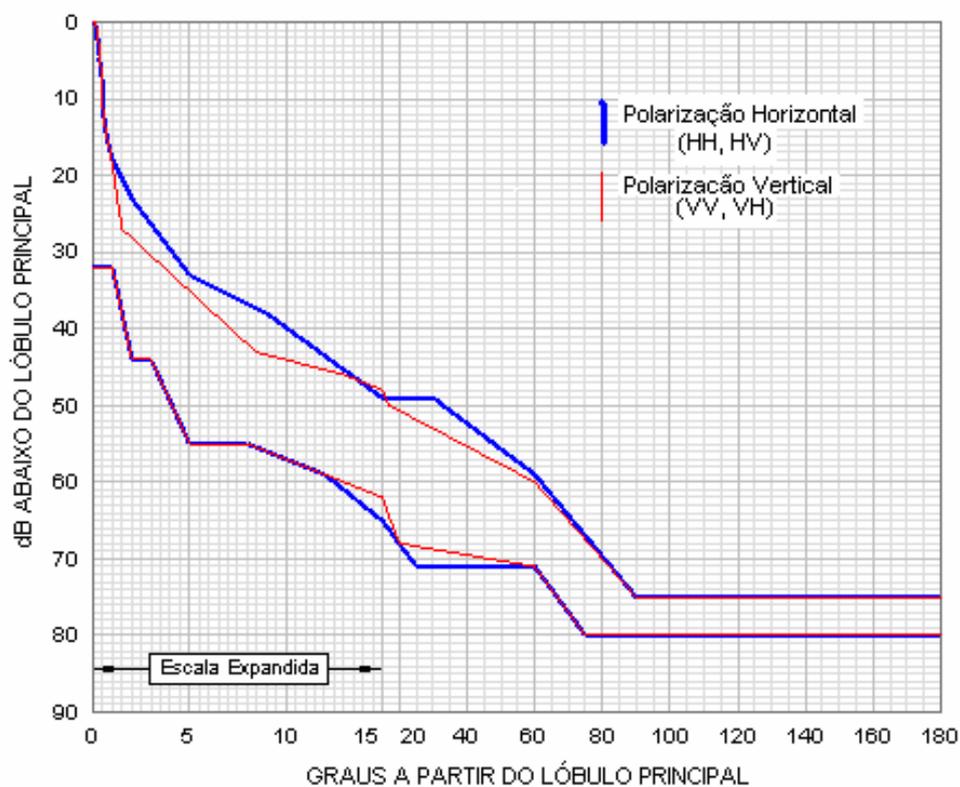
As características mais importantes da antena do *site* Simepar encontram-se em destaque na tabela 7. Na figura 16 tem-se o diagrama de radiação da referida antena. Informações adicionais podem ser encontradas no Anexo I.

DESCRIÇÃO		UNIDADE
Fabricante	Andrew	-
Modelo	VHP6-220A	-
Frequência	21,2 a 23,6	GHz
Ganho de Início de Faixa ⁽¹⁾	48,0	dBi
Ganho de Meio de Faixa ⁽¹⁾	49,4	dBi
Ganho de Final de Faixa ⁽¹⁾	49,9	dBi
Largura do Feixe	0,5	°
Diâmetro	1,95	m

FONTE: Andrew Corporation

NOTA: (1) G_T e G_R

FIGURA 16 – DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA - SIMEPAR



FONTE: Andrew Corporation

4.2.2 Antena do Site Fortex

As características mais importantes da antena do *site* Fortex encontram-se em destaque na tabela 7 (4.2.1). Na figura 16 (4.2.1) tem-se o diagrama de radiação da referida antena. Informações adicionais podem ser encontradas no Anexo I.

4.2.3 Cabos e Conectores

Os cabos de interconexão entre os equipamentos de rádio e as antenas foram escolhidos com base nas informações técnicas obtidas junto ao fabricante do equipamento de rádio digital. As principais características dos cabos e conectores considerados encontram-se respectivamente nas tabelas 8 e 9. Informações mais detalhadas a respeito de ambos encontram-se no Anexo I.

TABELA 08 – CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONSIDERADOS

DESCRIÇÃO	MODELO DO CABO	COMPRIMENTO (m)	ATENUAÇÃO (dB/m)	ATENUAÇÃO TOTAL (dB)
Cabo ⁽¹⁾	GrooveTube® 120	15	1,59	23,85
Cabo ⁽²⁾	GrooveTube® 120	15	1,59	23,85

FONTE: Megaphase Inc.

NOTA: (1) Site Fortex

(2) Site Simepar

TABELA 09 – CARACTERÍSTICAS DOS CONECTORES CONSIDERADOS

DESCRIÇÃO	TIPO DE CONECTOR	QUANTIDADE	ATENUAÇÃO/ CONECTOR (dB)	PERDA POR INSERÇÃO (dB)
Cabo ⁽¹⁾	Type N	2	0,12	0,24
Cabo ⁽²⁾	Type N	2	0,12	0,24

FONTE: Megaphase Inc.

NOTA: (1) Site Fortex

(2) Site Simepar

4.2.4 EQUIPAMENTO DE RÁDIO DIGITAL

O par de rádios digitais considerados, nos dois pontos do rádio enlace, tem suas principais características explicitadas na tabela 10. Informações mais detalhadas podem ser encontradas no Anexo I. Na figura 17, tem-se a foto do rádio digital sem a proteção externa.

TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DO RÁDIO DIGITAL

DESCRIÇÃO	UNIDADE
Fabricante	Harris
Modelo	Truepoint 4000
Frequência	23,6
Capacidade	4 a 32
Modulação	16QAM
Largura de Banda	3,5 a 28
FEC	Reed Solomon
Ganho de Saída	24
Sensibilidade ⁽¹⁾	-93,5
Sensibilidade ⁽²⁾	-96

FONTE: Harris S.A.

NOTA: (1) Para BER de 10^{-6}

(2) Para BER de 10^{-3}

FIGURA 17 – RÁDIO DIGITAL TRUEPOINT 4000



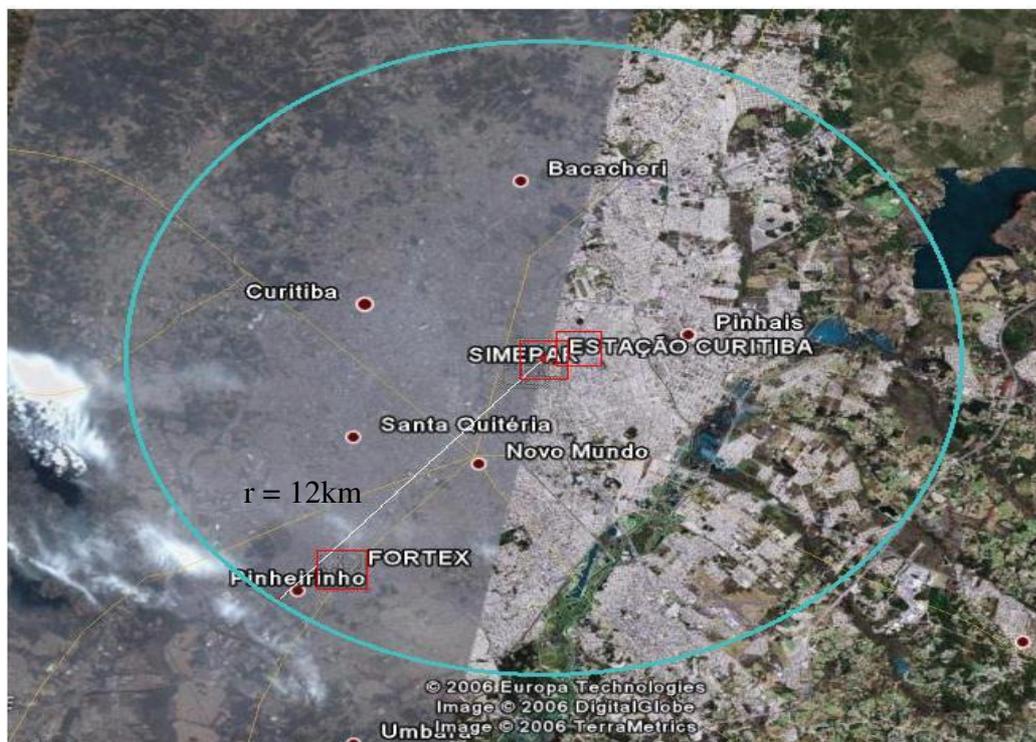
FONTE: Harris S.A.

4.3 ANÁLISE DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS DISPONÍVEIS E CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS PARA A RUC

A fim de quantificar a influência dos fatores meteorológicos sobre o desempenho do rádio enlace e se construir uma base de dados correspondente à RUC, buscou-se, junto ao Simepar, os dados pluviométricos do caminho de propagação do rádio enlace.

Os dados fornecidos pela instituição correspondem aos coletados pela estação meteorológica telemétrica de Curitiba, localizada no Centro Politécnico da UFPR, durante o período de 01/01/2003 a 18/05/2006, com informações sobre a intensidade de chuva na região, em mm/h. Segundo Braun [4.2], os dados obtidos pela estação de Curitiba correspondem a região de Curitiba e parte da região metropolitana, com boa precisão num raio de cerca de 12 km ao redor da estação. A figura 18 estima a área de cobertura da estação telemétrica de Curitiba.

FIGURA 18 – ÁREA DE COBERTURA DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE CURITIBA



FONTE: Google Earth

Inicialmente, analisando-se os dados fornecidos, obteve-se, para referência, os índices pluviométricos cumulativos anuais e os índices mensais médios referentes ao caminho de propagação, expostos na tabela 11.

TABELA 11 - ÍNDICES PLUVIOMÉTRICOS DE CURITIBA E REGIÃO METROPOLITANA

DESCRIÇÃO	2003 ⁽¹⁾	2004 ⁽²⁾	2005 ⁽³⁾	2006 ⁽⁴⁾
Total anual acumulado (mm/h/ano)	1189	1191,2	1333,2	404,8
Média Mensal (mm/h/mês)	99,08	99,27	111,10	88,38

NOTA: (1) Dados referentes ao período de 01/01/2003 a 31/12/2003

(2) Dados referentes ao período de 01/01/2004 a 31/12/2004

(3) Dados referentes ao período de 01/01/2005 a 31/12/2005

(4) Dados referentes ao período de 01/01/2006 a 18/05/2006

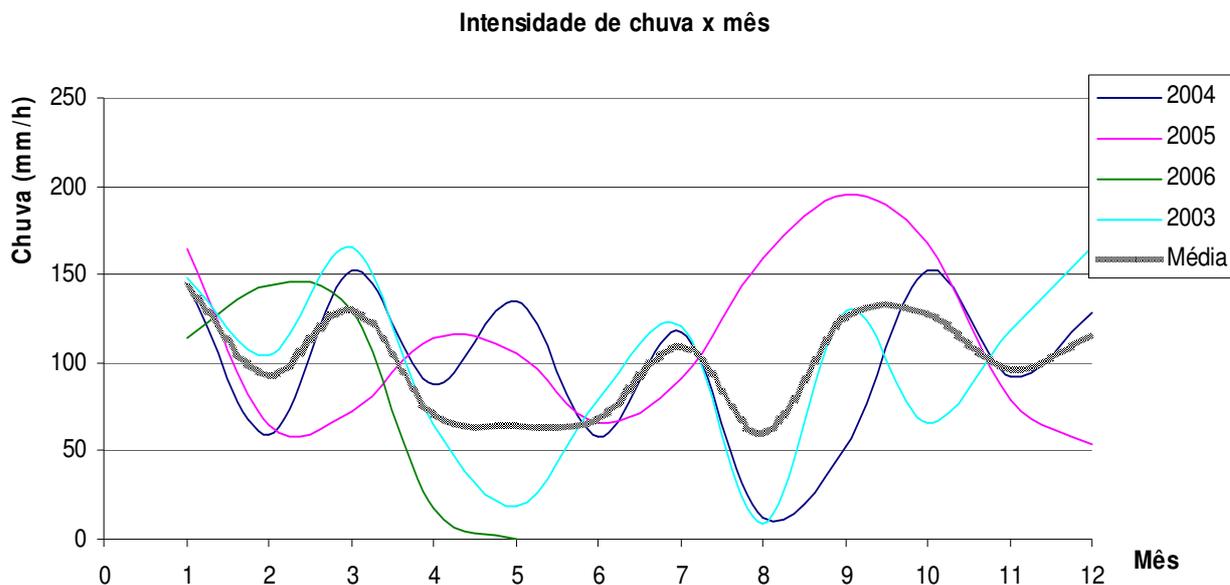
Ainda com base nestes dados, outro parâmetro importante para a avaliação de desempenho do sistema foi levantado: os quatro piores meses de cada ano no que se refere à precipitação. Constatou-se que os meses de Janeiro, Março, Setembro e Outubro são os 4 piores apresentando uma média de chuvas mensais superiores a 125 mm/h/mês (média considerando-se todo o período disponível). A tabela 12 ilustra a intensidade de chuvas/mês dos últimos anos, bem como a média de chuvas para os respectivos meses considerando-se o período de dados disponível. A figura 19 representa, graficamente, os valores expostos na tabela 12. No eixo horizontal tem-se os meses do ano (1 – Janeiro a 12 – Dezembro) e no eixo vertical a quantidade de chuva mensal, em mm/h/mês. As cinco curvas do gráfico, que estão sobrepostas, representam os dados obtidos, de 2003 a 2006, e a média de chuvas mensal ao longo do mesmo período.

TABELA 12 - MÉDIA DE CHUVAS PARA TODOS OS MESES DO ANO DURANTE OS ÚLTIMOS 4 ANOS

MESES	2003	2004	2005	2006	MÉDIA
Janeiro ⁽¹⁾	147,8	144,6	164,6	114,2	142,8
Fevereiro	103,8	59,6	64,8	143,6	93,0
Março ⁽¹⁾	165,2	152,4	72,8	129,6	130,0
Abril	64,6	87,4	114,4	17	70,9
Maio	18,6	134,6	104,8	0,4	64,6
Junho	79,4	58,4	66,2	-	68,0
Julho	120,8	117,8	91,2	-	109,9
Agosto	9,0	11,6	158,8	-	59,8
Setembro ⁽¹⁾	129,8	52,6	195	-	125,8
Outubro ⁽¹⁾	65,4	152	168,2	-	128,5
Novembro	118,6	92,2	78,4	-	96,4
Dezembro	166,0	128	54	-	116,0

NOTA: (1) Meses mais chuvosos do ano

FIGURA 19 – INTENSIDADE DE CHUVA MENSAL DURANTE O PERÍODO DE DADOS DISPONÍVEL



A partir da figura 19, analisando-se a curva “Média”, pode-se observar claramente quais os meses que apresentam a maior média de chuvas.

Analisando-se o total de chuvas acumulado, diariamente, durante todo o período de observação disponível, tem-se a tabela 13.

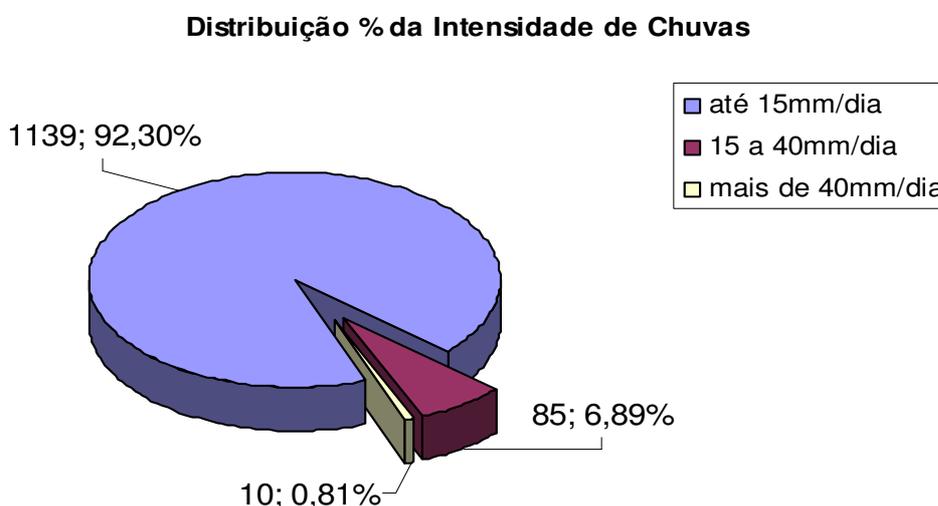
TABELA 13 – DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE DE CHUVAS AO LONGO DO PERÍODO EM ANÁLISE

INTENSIDADE DE CHUVA	NÚMERO DE DIAS	% DO TEMPO
Até 1mm/dia	892	72,29
1 a 5 mm/dia	143	11,59
5 a 10 mm/dia	57	4,62
10 a 15 mm/dia	47	3,81
15 a 20 mm/dia	24	1,94
20 a 25 mm/dia	19	1,54
25 a 30 mm/dia	19	1,54
30 a 35 mm/dia	9	0,73
35 a 40 mm/dia	14	1,13
40 a 45 mm/dia	1	0,08
45 a 50 mm/dia	3	0,24
50 a 55 mm/dia	3	0,24
55 a 60 mm/dia	0	0
Mais que 60 mm/dia	3	0,24

A partir da tabela 13 pode-se constatar que: durante 92,3 % do tempo o total de chuvas diário é inferior a 15 mm/dia, durante 99,19 % do tempo o total acumulado

é inferior a 40 mm/dia, e que em apenas 0,81 % do tempo ele é superior a 40 mm/dia. A figura 20 ilustra a distribuição percentual da intensidade de chuvas ao longo do período sob análise (Janeiro de 2003 a Maio de 2006). A partir dele pode-se ver claramente que durante 92,30 % do tempo sob análise, o que corresponde a 1139 dias, o total de chuvas acumulado no dia ficou entre 0 mm (sem chuva) e 15 mm, já durante 6,89 % do tempo, correspondendo a 85 dias, o total acumulado no dia ficou entre 15 mm e 40 mm e apenas durante 0,81 % do tempo, correspondendo a 10 dias, choveu no dia mais de 40 mm.

FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO % DA INTENSIDADE DE CHUVA AO LONGO DO PERÍODO EM ANÁLISE



Utilizando-se os critérios expostos em 2.9.1 obteve-se, com base nos dados pluviométricos, a taxa de chuvas, em mm/h, equivalente a 0,01 % do tempo de operação do enlace durante os 4 meses mais chuvosos do período observado ($R_{0,01\%}$).

A base de dados pluviométricos analisada tem 29616 entradas. Estas foram filtradas de forma a utilizar apenas as correspondentes aos 4 piores meses de cada ano no cálculo de $R_{0,01\%}$.

O número total de dados reduziu-se a 10275. Após ordená-las em ordem decrescente de intensidade, pegou-se as 10/1000 entradas mais significativas, ou seja, 103 no total. Estas, por sua vez, apresentaram valores entre 4,8 mm/h e 29,4 mm/h.

Tendo como base o exposto acima, aplicar-se-á no restante do trabalho:

$$R_{0,01\%} = 30 \text{ mm/h} \quad (45)$$

Há ainda um fato interessante. Analisou-se, individualmente, os dias de precipitação mais intensa, acima de 30 mm/dia, para os, quase, 4 anos de dados, a fim de verificar se estes dias apresentariam também as maiores intensidades de chuva por hora quando comparados as precipitações horárias dos demais dias, correspondentes aos 4 meses mais chuvosos.

Comparando-se a precipitação horária destes dias mais chuvosos, 10 no total, com as precipitações horárias dos demais dias dos meses mais chuvosos, chegou-se ao seguinte resultado: os dias mais chuvosos não apresentam necessariamente as maiores intensidades de chuva por hora, o que sugere que a ocorrência de pancadas de chuva, ou chuvas rápidas, pode vir a ser significativa sob o ponto de vista da propagação, além dos dias mais chuvosos em si. A tabela 14 ilustra os resultados obtidos levando-se em consideração as 30 horas mais chuvosas do período de dados analisado.

TABELA 14 – COMPARAÇÃO DA INTENSIDADE DE CHUVAS HORÁRIAS DOS MESES MAIS CHUVOSOS COM A DOS DIAS MAIS CHUVOSOS DO MESMO PERÍODO

30 PIORES HORAS	PRECIPITAÇÃO HORÁRIA MAIS INTENSA ⁽¹⁾ (mm/h)	PRECIPITAÇÃO HORÁRIA DOS DIAS MAIS CHUVOSOS ⁽²⁾ (mm/h)
1	14,6	14,6
2	14,8	-
3	14,8	-
4	14,8	-
5	15,2	-
6	15,4	-
7	15,8	-
8	15,8	-
9	16	-
10	16,4	-
11	16,6	-
12	16,6	-
13	16,8	-
14	16,8	-
15	17,2	17,2
16	18	-
17	18,6	-
18	18,6	18,6
19	19,0	-
20	19,4	-

21	20,2	20,2
22	20,6	-
23	21,2	-
24	24,2	-
25	25,2	-
26	26,4	26,4
27	27,8	27,8
28	28	-
29	28,4	-
30	29,4	29,4

NOTA: (1) Precipitação horária mais intensa dos 4 meses mais chuvosos
(2) Precipitação horária mais intensa dos 10 dias mais chuvosos dos 4 meses mais chuvosos

4.4 CONFIABILIDADE DO SISTEMA

A partir da equação 41, visto que necessita-se de uma confiabilidade de sistema de 99,99 % ($q = 99,99\%$) do tempo de operação do enlace, tem-se que p (tempo de indisponibilidade do sistema, em %) será de:

$$p = 100 - 99,99 \quad (46)$$

$$p = 0,01\% \quad (47)$$

Tendo-se definido quais eram os 4 meses mais chuvosos do ano, pode-se calcular o tempo de indisponibilidade do sistema em minutos, para um $p(\%)$ de 0,01 %.

$$p(\text{min}) = \{4(\text{meses}) \cdot 30(\text{dias}) \cdot 24(\text{horas}) \cdot 60(\text{min})\} \cdot \frac{p}{100} = 17,3 \text{ min} \quad (48)$$

Portanto, considerando-se os 4 meses mais chuvosos, tem-se que o sistema teria uma indisponibilidade de até 17 minutos, nestes 4 piores meses, e extrapolando-se, 17 minutos/ano.

4.5 ATENUAÇÃO DEVIDO A CHUVA

Tendo-se filtrado a base de dados, em 4.3, tem-se que a maior intensidade de chuva, em mm/h, correspondente a 0,01 % de tempo de operação do rádio enlace é próxima a 30 mm/h.

A distância efetiva da chuva foi considerada a partir das fórmulas 3, 4, 5 e 45 e é de 6,57 km.

Os valores dos coeficientes das equações 39 e 40 para as polarizações horizontal (α_H e k_H) e vertical (α_V e k_V), vide sub-capítulo 2.8, encontram-se na tabela 15, ambos calculados para a frequência de 23,6 GHz.

Aplicando-se os coeficientes respectivos, (α_H , k_H , α_V , k_V) na equação 38, vide sub-capítulo 2.8, obtiveram-se os valores de atenuação devido a precipitação, para as polarizações vertical e horizontal, tal como expostos na tabela 16.

Pode-se perceber, a partir da tabela 16, que a atenuação causada pela chuva é menor para o caso em que se utiliza a polarização vertical. Isto deve-se ao fato de que o formato da gota de chuva, ao cair, ser achatado de forma que para a polarização horizontal ela apresenta uma seção transversal maior, e portanto um maior impacto sobre a propagação com polarização horizontal.

TABELA 15 – VALORES CALCULADOS PARA OS COEFICIENTES α_V , α_H , k_H e k_V

COEFICIENTE	VALOR CALCULADO
$\alpha_V^{(1)}$	0,9588
$k_V^{(1)}$	0,1355
$\alpha_H^{(2)}$	0,1368
$k_H^{(2)}$	1,0145

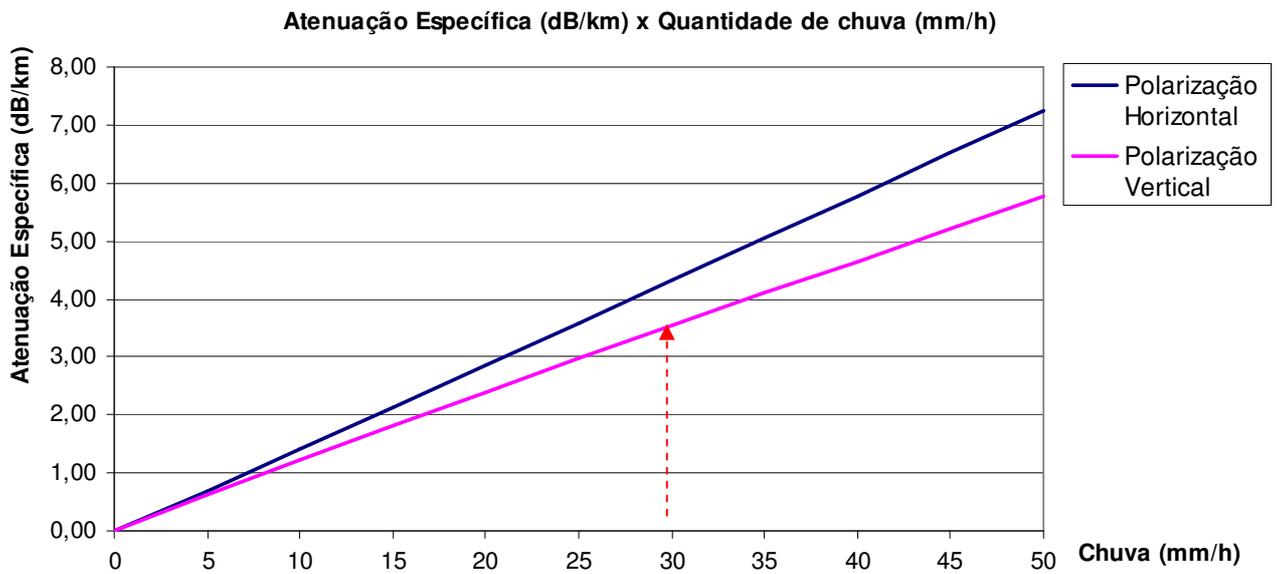
NOTA: (1) Polarização Vertical
(2) Polarização Horizontal

TABELA 16 – ATENUAÇÃO DEVIDO A CHUVA

POLARIZAÇÃO	DISTÂNCIA EFETIVA CONSIDERADA D_{eff} (km)	QUANTIDADE DE CHUVA $R_{0,01\%}$ (mm/h)	ATENUAÇÃO ESPECÍFICA y_r (dB/km)	ATENUAÇÃO TOTAL $A_{0,01\%}$ (dB)
Vertical	6,57	30	3,53	23,24
Horizontal	6,57	30	4,31	28,37

A figura 21 ilustra a variação de γ_R em função da intensidade de chuva, R, (mm/h) para os casos de polarização vertical e horizontal. Fica claro que a partir de uma intensidade de chuva de 5 mm/h a atenuação específica γ_R devido a polarização horizontal começa a ser muito mais expressiva que a devido a polarização vertical.

FIGURA 21 – ATENUAÇÃO ESPECÍFICA γ_R EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE DE CHUVA



Tendo em vista o exposto na tabela 16, que é ilustrada graficamente pela figura 21, escolheu-se a polarização vertical para ser aplicado ao estudo de caso, devido ao fato de esta ser menos afetada pelo fenômeno pluviométrico.

Devido a tal, a atenuação por chuva, com polarização vertical, correspondente à intensidade de chuvas durante 0,01 % do tempo é de:

$$A_{R_{0,01\%}} = 23,24 \quad \text{dB} \quad (49)$$

4.6 ATENUAÇÃO DEVIDO A NUVENS E A NEBLINA

Considerando-se um outro dado disponibilizado pelo Simepar, tem-se que a intensidade de neblina registrada, em g/m^3 , correspondente a 0,01 % do tempo de operação do rádio enlace seria de $1,15 \text{ g/m}^3$, o que corresponde a uma visibilidade de 50 m, segundo Harris [4.3].

A distância efetiva considerada foi igual a distância total do rádio enlace, assumindo que, especialmente durante o inverno, há a possibilidade real de se ter todo o trecho do enlace coberto por nevoeiro.

Sabe-se que o coeficiente de atenuação específica (γ_C) varia em função da temperatura e da frequência, segundo as fórmulas de 27 a 37. A frequência do rádio enlace é de 23,6 GHz e as temperaturas mínima e máxima, anuais, para a região de interesse, estão entre 4 °C e 32 °C, segundo Braun [4.4].

A tabela 17 mostra a atenuação específica γ_C e a atenuação total A_C devido a nuvens e neblina para o pior caso previsto, que ocorre quando a temperatura baixa a 4 °C.

TABELA 17 – ATENUAÇÃO DEVIDO A NUVENS E A NEBLINA

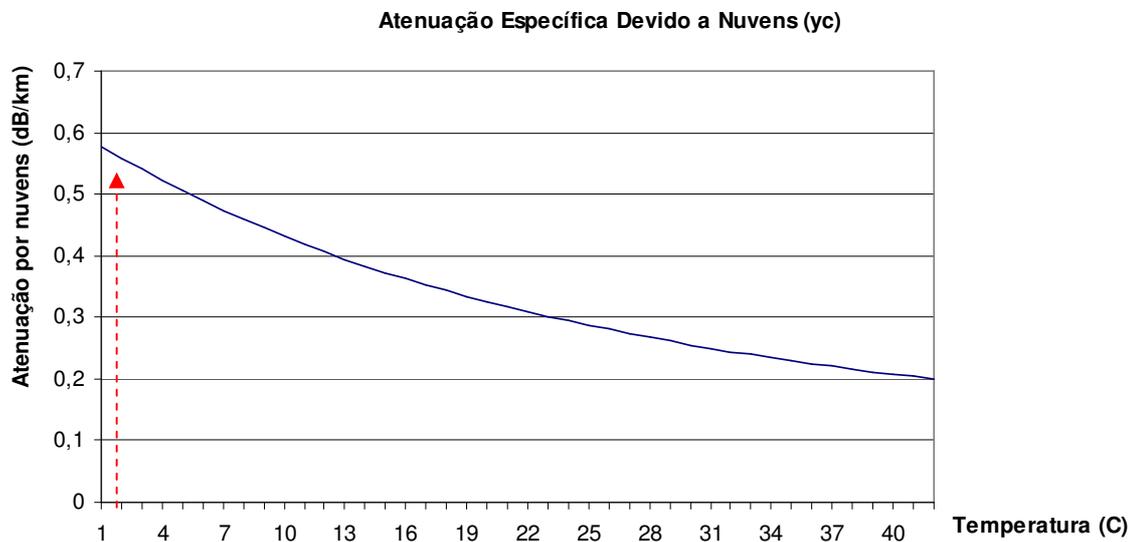
TEMPERATURA (°C)	ATENUAÇÃO ESPECÍFICA γ_C (dB/km)	DISTÂNCIA EFETIVA CONSIDERADA (km)	ATENUAÇÃO TOTAL A_C (dB)
4	0,506	9,32	4,71

Dado o caminho de propagação do rádio enlace escolhido, e a atenuação específica, considerando-se a temperatura de 4 °C e a frequência de operação do enlace de 23,6 GHz, tem-se que a atenuação total, devido a nuvens e a neblina, A_C , será de:

$$A_C = 4,71 \quad \text{dB} \quad (50)$$

A fim de ilustrar a variação de γ_C em função da temperatura, foi gerada a figura 22 para uma ampla faixa temperatura, de 1 °C a 40 °C, e frequência de 23,6 GHz.

FIGURA 22 – ATENUAÇÃO ESPECÍFICA γ_C EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA



A partir da figura 22 é fácil perceber que quanto menor a temperatura ambiente, maior é o coeficiente de atenuação específica e, portanto, maior é a atenuação total devido a nuvens e neblina.

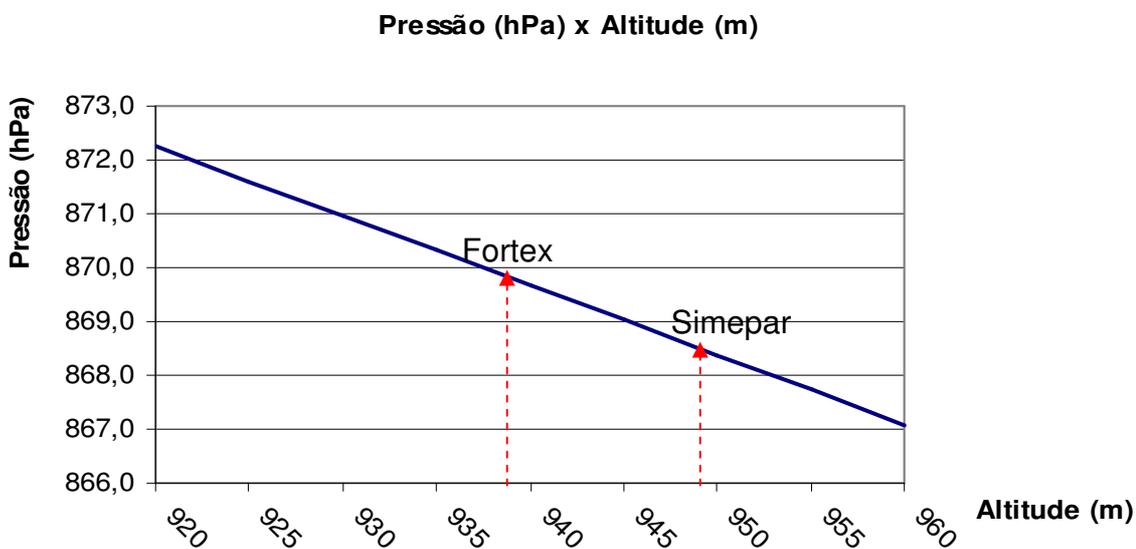
4.7 ATENUAÇÃO DEVIDO AO OXIGÊNIO (AR SECO) E AO VAPOR D'ÁGUA

As atenuações devido ao ar seco (oxigênio) e ao vapor d'água dependem de fatores ambientais, geográficos e técnicos do enlace, tais como altitude (pressão), temperatura, quantidade de vapor d'água dispersa na atmosfera, frequência de operação e distância.

A frequência de operação do enlace é fixa em 23,6 GHz, bem como a distância efetiva, neste caso, de aproximadamente 9,32 km.

Estando os dois pontos do enlace praticamente a mesma altitude em relação ao nível do mar, e sendo que o caminho do rádio enlace é praticamente plano, ou seja, a inclinação α próxima a 0° , tem-se que a pressão atmosférica média, a partir da tabela 6 e da figura 23, é próxima a 870 hPa.

FIGURA 23 – VARIAÇÃO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA EM FUNÇÃO DA ALTITUDE



Na figura 23, tem-se os pontos de altitude referentes às antenas dos sites Fortex e Simepar, o que corresponde a uma pressão de 869,9 hPa e 868,6 hPa, respectivamente.

A temperatura utilizada para o cálculo é a temperatura anual média, 15 °C, e a densidade de vapor d'água (ρ), ainda segundo Braun, é de 7,5 g/m³ [4.4].

Considerou-se a distância efetiva como o percurso total do enlace, 9,32 km.

Aplicando-se os parâmetros acima as equações 16 a 24, obteve-se os seguintes valores para os coeficientes de atenuação específicos do oxigênio, γ_o , e do vapor d'água, γ_w , e a atenuação total individual de ambos, expostos na tabela 18.

TABELA 18 – ATENUAÇÃO DEVIDO AO OXIGÊNIO (AR SECO) E AO VAPOR D'ÁGUA

TEMPERATURA (°C)	PRESSÃO (hPa)	ρ (g/m ³)	γ_o (dB/km)	γ_w (dB/km)	DISTÂNCIA EFETIVA (km)	ATENUAÇÃO TOTAL (dB)
15	870	0	0,01	-	9,32	0,09
15	870	7,5	-	0,37	9,32	3,45

A atenuação total devido ao ar seco e ao vapor d'água é obtida a partir da equação 26. Considerando-se, como já mencionado, $\alpha=0^\circ$, tem-se que a contribuição total ao longo de todo o percurso do enlace é:

$$A_o + A_w = 3,54 \quad \text{dB} \quad (51)$$

4.8 ATENUAÇÃO DEVIDO A NEVE

Visto que, de acordo com a base de dados, não há ocorrência de neve na região de interesse nas últimas décadas, seu efeito não será, portanto, considerado.

$$A_{NEVE} = 0 \quad \text{dB} \quad (52)$$

4.9 ATENUAÇÃO DEVIDO AO GRANIZO

Tendo em vista que não há equipamentos adequados para a coleta de informações referentes a granizo, quantidade e periodicidade, e sabendo-se que este fenômeno é incomum além de possuir curta duração na região de interesse, segundo o Braun [4.4], seus efeitos não serão considerados.

$$A_{GRANIZO} = 0 \quad \text{dB} \quad (53)$$

4.10 PERDAS DE TRANSMISSÃO NO RÁDIO ENLACE

4.10.1 Perda de Transmissão em Espaço Livre

A perda de transmissão em espaço livre (L_{bf}) é obtida através da equação 10, dados $f = 23,6$ GHz e $d = 9,32$ km.

$$L_{bf} = 139,25\text{dB} \quad (54)$$

4.10.2 Perda Básica de Transmissão

A perda básica de transmissão (L_b) é obtida através da equação 11, onde o termo L_m incorpora as atenuações devido aos fenômenos meteorológicos, tal como ilustra a tabela 19.

TABELA 19 – COMPOSIÇÃO DE L_m

DESCRIÇÃO	ATENUAÇÃO (dB)	L_m (dB)
Chuva	23,24	
Nuvens e Neblina	4,71	
Oxigênio	0,09	31,49
Vapor d'água	3,45	
Neve	0	
Granizo	0	

$$L_b = 170,74\text{dB} \quad (55)$$

Já a partir desta pode-se ver que a atenuação devido à chuva, para o enlace sob estudo, representa a maior atenuação imposta ao sistema.

4.10.3 Perda de Transmissão

A perda de transmissão (L) é obtida através da equação 13, onde os ganhos das antenas do Simepar e da Fortex são extraídos a partir das tabelas 7 e 8.

$$L = 70,94\text{dB} \quad (56)$$

4.10.4 Perda de Sistema

A perda de sistema (L_S) é obtida através da equação 14. Os dois fatores considerados são as perdas de inserção devido aos pares de conectores N, um par por rádio, e aos cabos que ligam as antenas aos respectivos equipamentos de rádio, cujas atenuações encontram-se nas tabelas 9 e 10.

$$L_S = 119,12\text{dB} \quad (57)$$

4.10.5 Perda Total

A perda de sistema (L_S) é obtida através da equação 14. No caso do cálculo de perda total deve-se fazê-lo definindo um ponto de referência. Neste caso o ponto de referência utilizado é a entrada do rádio digital (transmissor) e a saída do rádio digital (receptor), ou seja, não incluindo perdas internas inerentes aos rádios, e portanto, tem-se que L_I é igual a L_S .

$$L_I = 119,12\text{dB} \quad (58)$$

4.10.6 Margem de Desvanecimento

A margem de desvanecimento, F_m , é obtida através da equação 15. Considerando-se a sensibilidade do receptor de rádio e a potência de saída do mesmo, para a configuração escolhida, tem-se que a margem de desvanecimento é de:

$$F_m = -1,62\text{dB} \quad (59)$$

4.11 VIABILIDADE E DISTÂNCIA MÁXIMA DO ENLACE

A partir de 4.10.6, nota-se que o sistema, para as características e equipamentos escolhidos, apresenta uma margem de desvanecimento de -1,62 dB, muito abaixo dos 20 dB mínimos exigidos. Neste caso, seguindo o fluxograma proposto na metodologia deve-se verificar se há alterações que possam ser feitas as características ou aos equipamentos de forma a atingir a margem de desvanecimento mínima.

Na etapa de “Iteração 1” buscou-se possíveis melhorias do sistema. Analisando-se os itens que poderiam ser melhorados percebe-se a partir da tabela 8 que, mesmo utilizando-se um cabo com baixa perda, quando comparado a outros cabos comerciais [4.5], [4.6], a atenuação imposta pelo mesmo devido ao seu

tamanho é muito expressiva. Tendo isto em vista optou-se por alterar o sistema utilizando-se as antenas “integradas” aos equipamentos de rádio, ou seja, conectadas através de um pequeno trecho de cabo, em torno de 1 metro, diretamente ao mesmo, sendo a alimentação e as informações fornecidas através de um cabo de FI de 14 metros, com atenuação de 0,12 dB/m. Isto fez com que a atenuação total devido a cabos caísse de 23,85 dB para 3,27 dB por rádio, tal como ilustra na tabela 20.

TABELA 20 – NOVAS CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONSIDERADOS

DESCRIÇÃO	MODELO DO CABO	COMPRIMENTO (m)	ATENUAÇÃO (dB/m)	ATENUAÇÃO TOTAL (dB)
Cabo ⁽¹⁾	GrooveTube® 120	1	1,59	1,59
Cabo ⁽²⁾	GrooveTube® 120	1	1,59	1,59
Cabo FI ⁽¹⁾		14	0,12	1,68
Cabo FI ⁽²⁾		14	0,12	1,68

FONTE: Megaphase Inc.

NOTA: (1) Site Fortex

(2) Site Simepar

Recalculando-se a item 4.10.1 a 4.10.6, verifica-se que a partir da escolha de se utilizar a antena “integrada” ao equipamento de rádio, tem-se que:

$$L_{bf} = 139,25 \text{ dB} \quad (60)$$

$$L_b = 170,74 \text{ dB} \quad (61)$$

$$L = 70,94 \text{ dB} \quad (62)$$

$$L_s = 77,96 \text{ dB} \quad (63)$$

$$L_l = 77,96 \text{ dB} \quad (64)$$

$$F_m = 39,54 \text{ dB} \quad (65)$$

Agora pode-se ver que a nova margem de desvanecimento é de 39,54 dB, apresentando 19,54 dB de “sobra”, em relação aos 20 dB exigidos.

Esta “sobra” que agora poderia caracterizar um superdimensionamento dos equipamentos para o enlace, poderia ser retrabalhada, por exemplo, trocando-se as antenas propostas por outras com menor ganho, ou ainda um equipamento de rádio

com menor potência de saída, visando reduzir o custo do sistema sem prejudicar seu desempenho.

Conclui-se agora que o rádio enlace, seguindo a metodologia proposta, é viável visto que apresenta uma margem de desvanecimento de 39,54 dB e não seriam mais necessários quaisquer ajustes ou alterações.

Um orçamento dos equipamentos e instalação do enlace analisado, obtidos a partir da empresa Harris do Brasil, pode ser encontrado no Anexo 3.

Apenas por curiosidade movida em saber qual seria a maior distância a que o enlace após os ajustes poderia vir a atingir dentro da área urbana de Curitiba, refez-se todos os cálculos teóricos, mantendo-se as duas condições seguintes:

- Visada Direta;
- Equipamentos e acessórios.

Constatou-se que o enlace poderia atingir uma distância máxima de operação próxima a 15,5 km, cuja validade esta circunscrita a área em que os dados coletados pela estação meteorológica de Curitiba são válidos, conforme ilustra a tabela 21.

TABELA 21 – DISTÂNCIA DO ENLACE E MARGEM DE DESVANECIMENTO

DISTÂNCIA DO ENLACE (km)	MARGEM DE DESVANECIMENTO (dB)
10	37,15
10,5	35,46
11	33,80
11,5	32,19
12	30,62
12,5	29,09
13	27,59
13,5	26,12
14	24,69
14,5	23,28
15	21,90
15,5	20,55

4.12 SIMULAÇÃO DO RÁDIO ENLACE UTILIZANDO O CELPLANNER

Para a simulação utilizou-se o programa CelPlanner. Os dados e principais características técnicas referentes ao enlace e aos equipamentos utilizados, empregados na simulação, encontram-se na tabela 22.

TABELA 22 – PRINCIPAIS DADOS E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

DESCRIÇÃO	TIPO	VALOR E UNIDADE
Localização Geográfica	Simepar	S 25°27'05.0" W 049°14'11.0"
	Fortex	S 25°31'07.0" W 049°17'31"
Chuva	R _{0,01} %	30 mm/h
Cabos Conectores	Perda / cabo	3,27 dB
	Perda / Con. N	0,12 dB
Rádio Digital	Sens ⁽²⁾	-93,5 dBm
	Potência de Saída	24 dBm
Antenas	Gt e Gr	49,9 dB
	Largura de Feixe	0,5 °
	Frequência TX	22.585,5 MHz
	Frequência RX	23.593,5 MHz
	Altura ⁽¹⁾ - Simepar	16 m
Altura ⁽¹⁾ - Fortex	18 m	

NOTA: (1) Altura da antena acima do nível do terreno
(2) BER 10⁻⁶

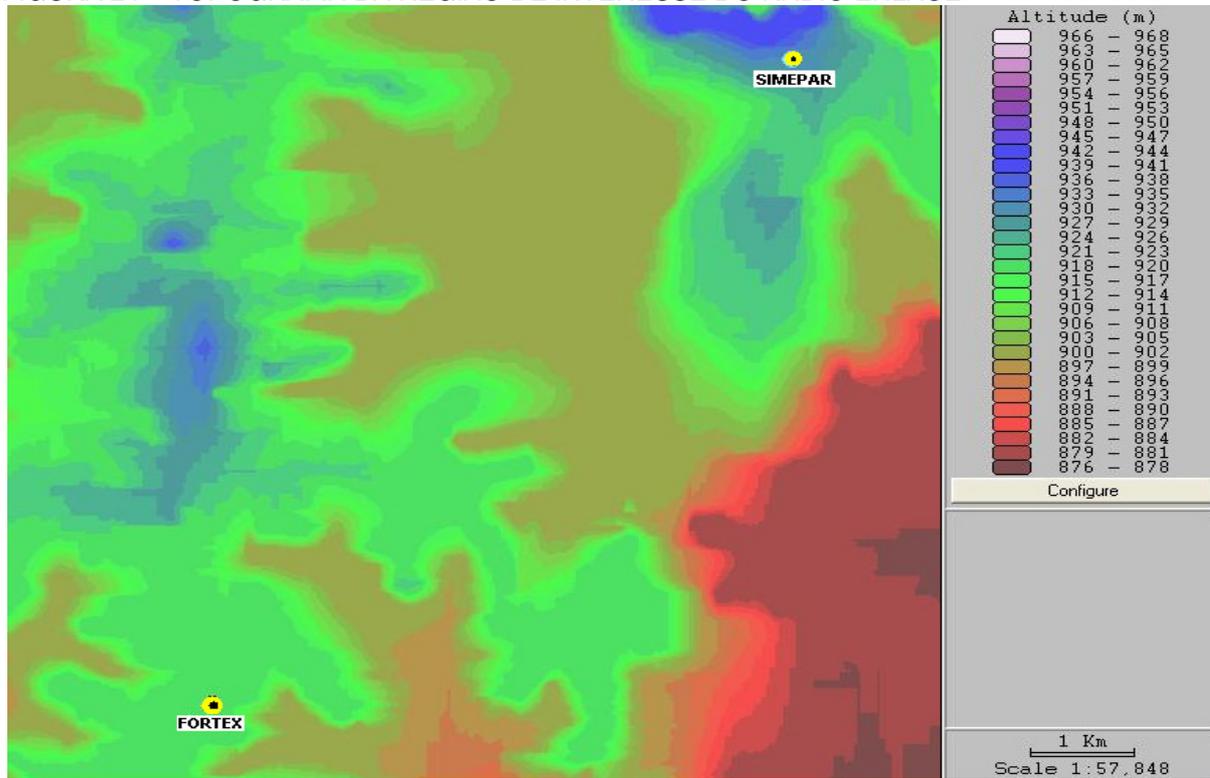
Para a simulação, foi criado no CelPlanner um modelo dos diagramas de radiação das antenas escolhidas, VHP6 220A, a partir das características técnicas informadas pelo fabricante, vide Anexo I.

As figuras 24, 26 e 28 ilustram a topografia, a morfologia e o arruamento, respectivamente, da região de interesse do rádio enlace.

As figuras 25 e 27 ilustram, respectivamente, a topografia e a morfologia em 3D da região de interesse.

Nas figuras 24 a 28 tem-se localizados os dois pontos do enlace, o Simepar e a Fortex.

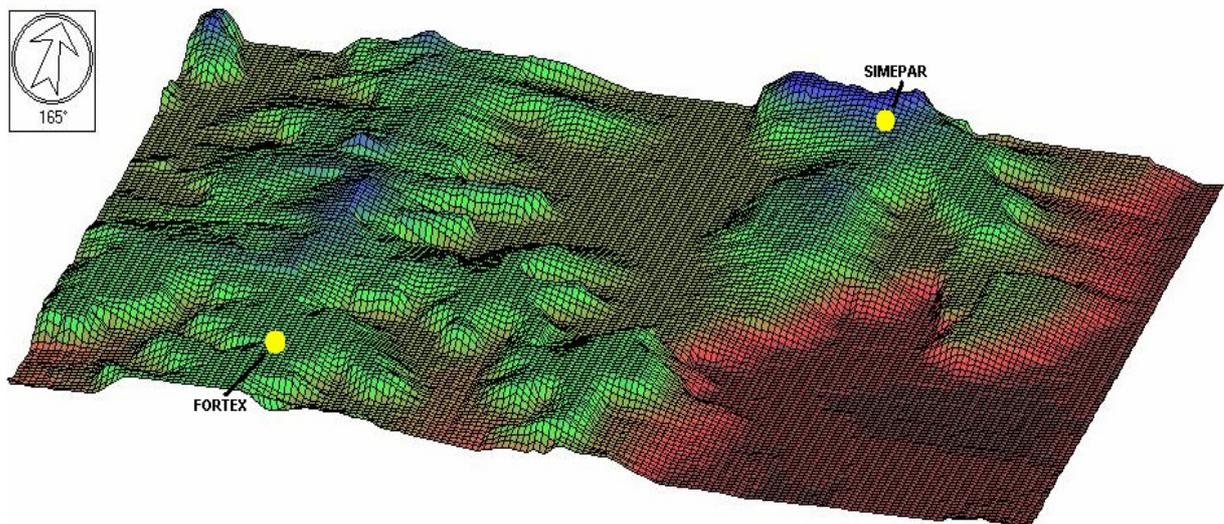
FIGURA 24 – TOPOGRAFIA DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE



FONTE: Base de dados do Paraná - CelPlanner

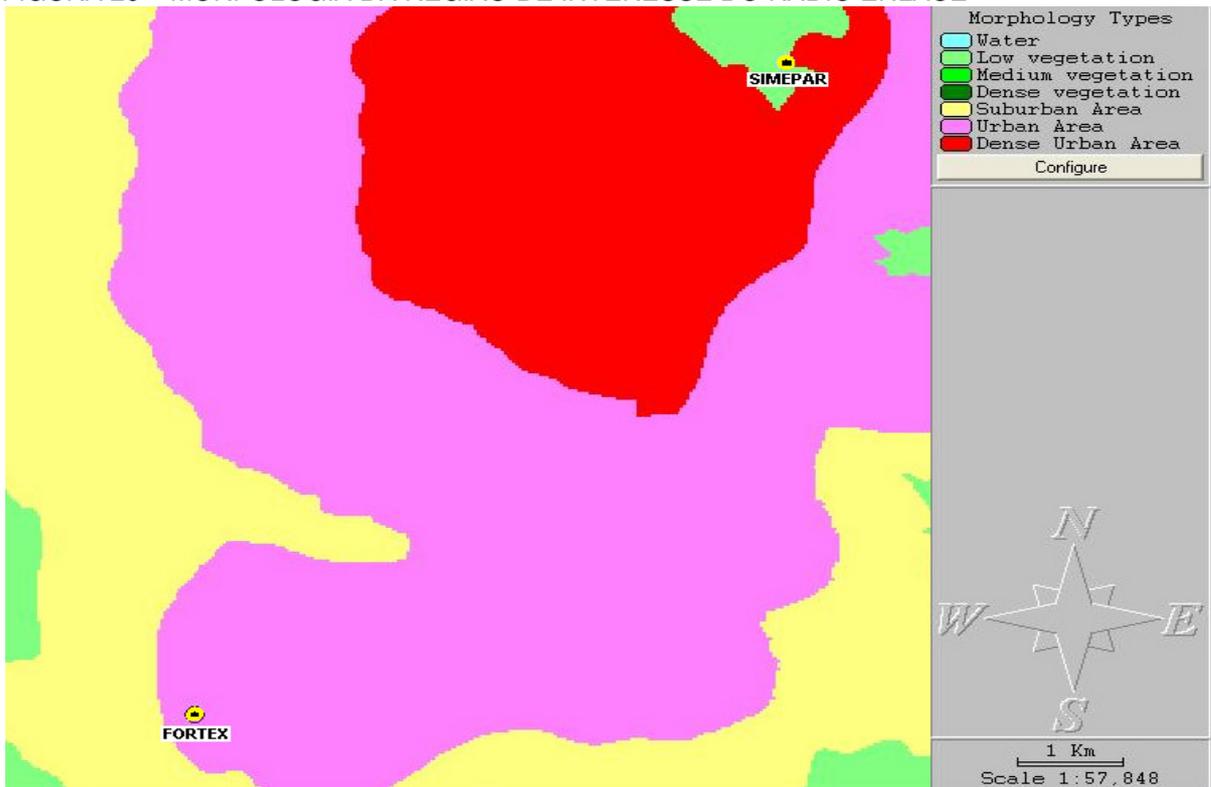
Na figura 24 tem-se a partir da base de dados digital do CelPlanner os dados referentes a altitude de ambos os pontos em relação ao nível do mar, conforme indicado pela respectiva legenda.

FIGURA 25 – TOPOGRAFIA EM 3D DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE



FONTE: Base de dados do Paraná - CelPlanner

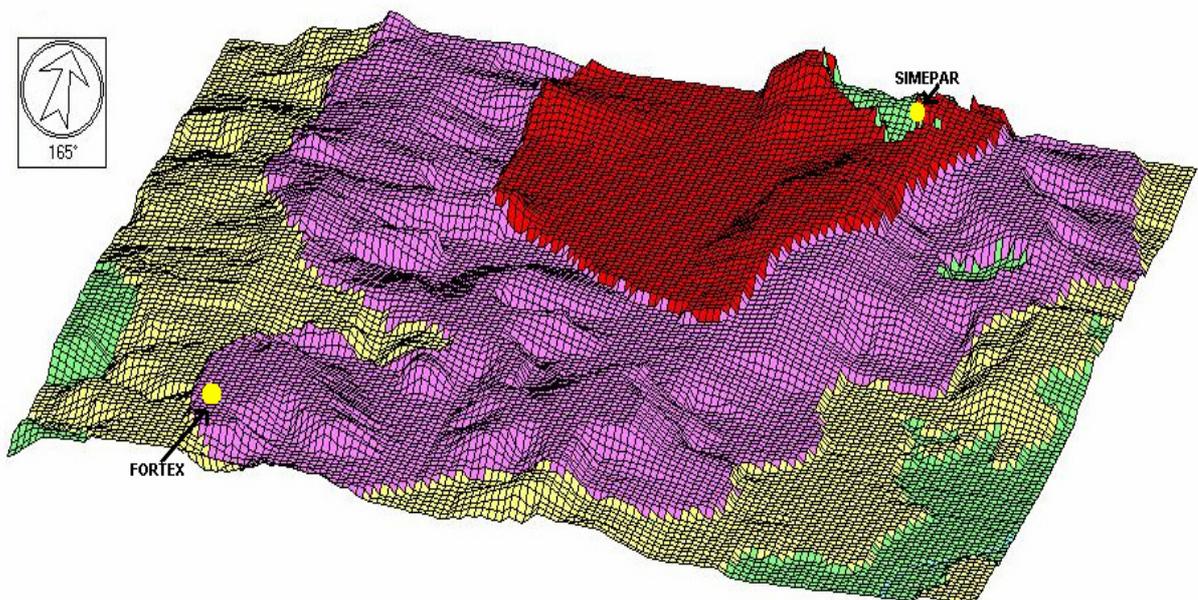
FIGURA 26 – MORFOLOGIA DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE



FONTE: Base de dados do Paraná - CelPlanner

Na figura 26 tem-se a partir da base de dados digital do CelPlanner os dados referentes a morfologia de ambos os pontos, mostrando que o enlace situa-se numa região urbana/região urbana densa, conforme indicado pela respectiva legenda.

FIGURA 27 – MORFOLOGIA EM 3D DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE



FONTE: Base de dados do Paraná - CelPlanner

FIGURA 28 – ARRUEAMENTO DA REGIÃO DE INTERESSE DO RÁDIO ENLACE



FONTE: Base de dados do Paraná - CelPlanner

A figura 28 tem a finalidade meramente ilustrativa de situar os dois pontos do enlace sobre o mapa rodoviário da região.

Ao total foram realizadas duas simulações distintas para o mesmo enlace, a primeira utilizando-se o modelo de predição LOS (*Line of Sight*) e outra utilizando o modelo de predição MODEL II, ambos implementados no programa CelPlanner.

As características básicas do modelo LOS são:

- Empregado em sistemas de alta frequência (acima de 3 GHz);
- Inclui a atenuação devido a propagação em espaço livre;
- Inclui desvanecimento e perdas devido a gases atmosféricos;
- Inclui atenuação devido a chuva;
- Não incorpora a atenuação devido a difração em obstáculos.

As características básicas do modelo MODEL II são:

- Empregado em sistemas de alta frequência (acima de 3 GHz);
- Inclui a atenuação devido a propagação em espaço livre;
- Inclui desvanecimento e perdas devido a gases atmosféricos;
- Inclui atenuação devido a chuva;
- Incorpora a atenuação devido a difração em obstáculos.

4.12.1 Resultados da Simulação – Modelo LOS

O resultado da simulação encontra-se, condensado, na tabela 23, onde os principais parâmetros de entrada e saída encontram-se devidamente identificados. O resultado integral encontra-se no Anexo 2.

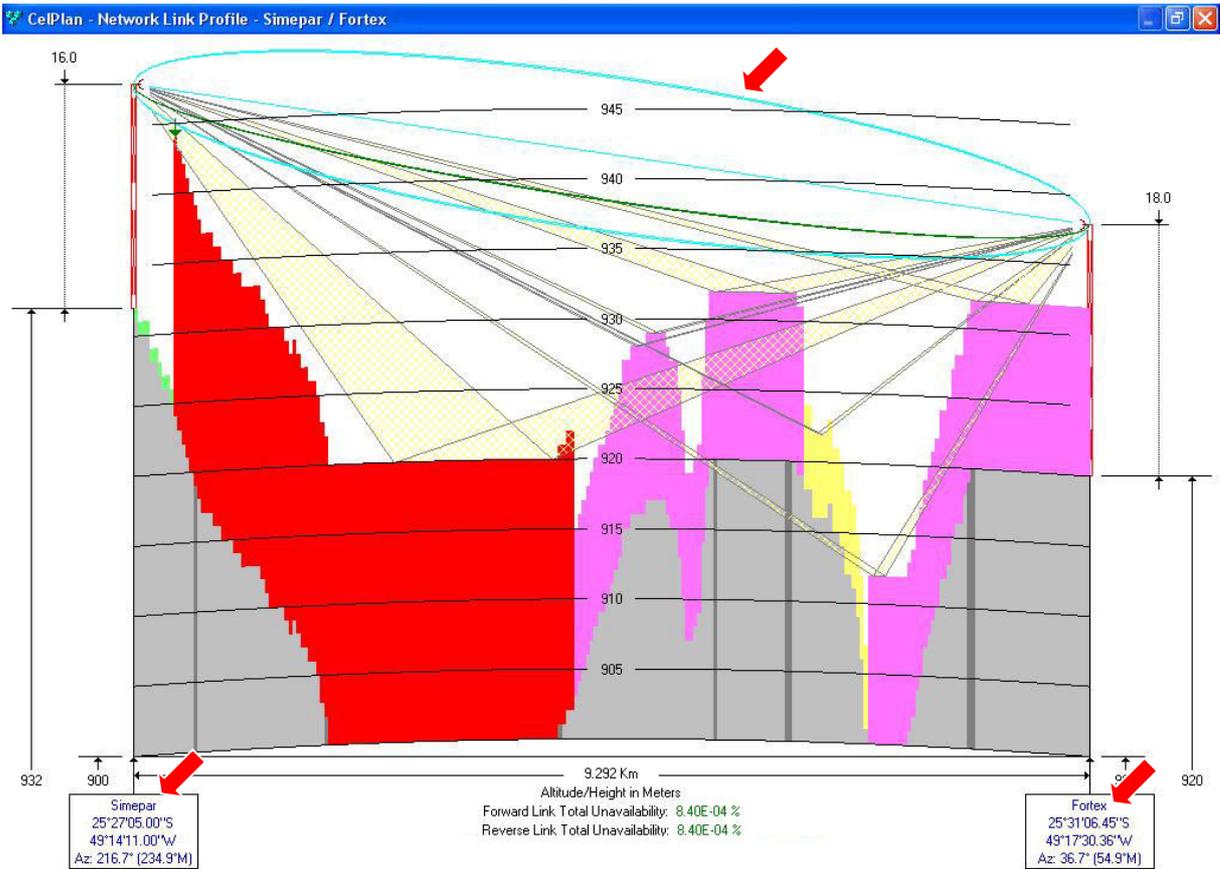
FIGURA 29 – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO – MODELO LOS

The screenshot displays the 'CelPlan - Network Link' window. It is divided into several sections for configuring the simulation between Site 'A' (Simepar) and Site 'B' (Fortex). The 'Link' section is set to 'Bidirectional [A <-> B]' and 'Type' is 'Wireless'. The 'Forward Link [A -> B]' section includes 'Objective' (ITU Quality Grade: Short Haul SDH Networks), 'Earth Curvature' (Earth Radius Factor [K]: 4/3), and 'Gases Loss' (Atmospheric Pressure [hPa]: 870, Standard Temperature [°C]: 15, Water Vapor Density [g/m³]: 7.5). The 'Reverse Link [A <-> B]' section includes 'Multipath' (Multipath Model: ITU, Link Area: Inland Link, Terrain Type: High altitude (>700 m) Plains, Multipath Climatic Variable [pL]: 14.5, Link Path Fraction Close to Water [%]: 50) and 'Rainfall' (Precipitation Model: ITU, Precipitation Rate @ 0.01% [mm/h]: 30). Red arrows point to the 'Bidirectional' link type, 'Wireless' type, 'High altitude (>700 m) Plains' terrain type, and the '30' precipitation rate value.

FONTE: CelPlanner

A figura 29 ilustra uma das telas de configuração do enlace no CelPlanner, para o modelo LOS, onde se tem definidos alguns dos parâmetros do sistema, indicados pelas setas.

FIGURA 30 – PERFIL DO ENLACE – MODELO LOS



FONTE: CelPlanner

A figura 30 mostra o perfil do enlace obtido a partir da simulação realizada, onde fica fácil visualizar a 1ª Zona de Fresnel, livre de obstáculos, bem como os pontos de reflexões das ondas eletromagnéticas sobre a morfologia (em vermelho – região urbana densa e em rosa – região urbana).

TABELA 23 – SÍNTESE DO RESULTADO DA SIMULAÇÃO UTILIZANDO O CELPLANNER -LOS

PARÂMETROS	ENLACE DIRETO ⁽³⁾	ENLACE REVERSO ⁽⁴⁾
BER ⁽¹⁾	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Sensibilidade ⁽¹⁾ (dBm)	-93.5	-93.5
S/N ⁽²⁾ mín (dB)	10.034	10.034
Frequência ⁽¹⁾ (MHz)	22585.5	23593.5
Polarização ⁽¹⁾	Vertical	Vertical
<i>Lbf</i> ⁽²⁾ (dB)	138.879	139.258
<i>k</i> ⁽¹⁾⁽⁵⁾	4/3	4/3
Perda por Difração ⁽²⁾ (dB)	0	0
Perda por Gases ⁽²⁾ (dB)	1.801	1.638
Perda Total de Caminho ⁽²⁾ (dB)	140.68	140.896
<i>F_m</i> Bruta ⁽²⁾ (dB)	74.36	74.144
Modelo de Multipercurso ⁽¹⁾	ITU	ITU
Fator de Ocorrência de Multipercurso ⁽²⁾	6.80e ⁻⁰²	7.07e ⁻⁰²
Desvanecimento ⁽²⁾ (%)	2.49e ⁻⁰⁹	2.72e ⁻⁰⁹
Atenuação chuva ⁽²⁾ (dB)	20.786	22.358
Indisp. por Devanecimento ⁽²⁾ (s/Year)	0.001	0.001
Indisp. devido a chuva ⁽²⁾ (s/Year)	265.013	265.013
Indisp. Total ⁽²⁾ (s/Year)	265.014	265.014
Indisp. Objetiva ITU ⁽²⁾ (s/Year)	5203.44	5203.44

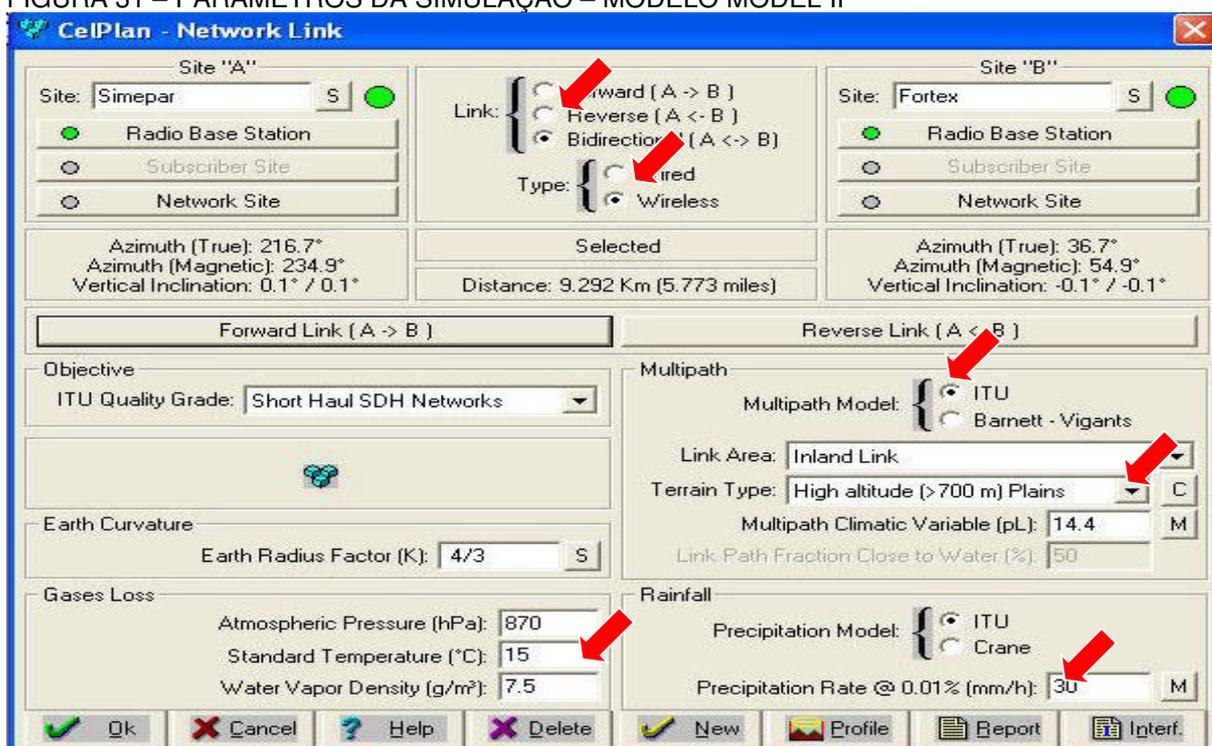
FONTE: CelPlanner

NOTAS: (1) Fornecido ao CelPlanner
 (2) Saída do Programa
 (3) Simepar – Fortex
 (4) Fortex - Simepar
 (5) Fator de raio da Terra

4.12.2 Resultados da Simulação – Modelo MODEL II

O resultado da simulação encontra-se, condensado, na tabela 24, onde os principais parâmetros de entrada e saída encontram-se devidamente identificados. O resultado integral encontra-se no Anexo 2.

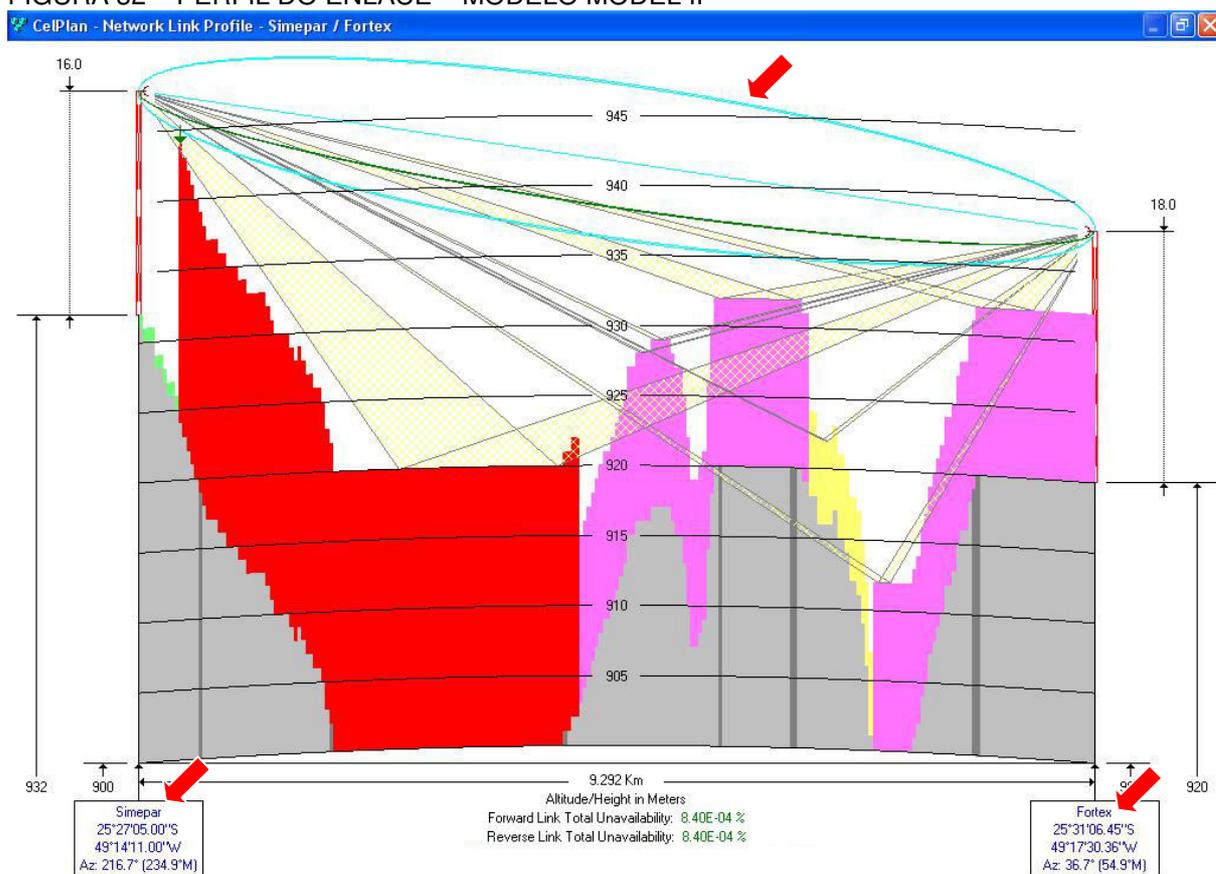
FIGURA 31 – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO – MODELO MODEL II



FONTE: CelPlanner

A figura 31 ilustra uma das telas de configuração do enlace no CelPlanner, para o modelo MODEL II, onde se tem definidos alguns dos parâmetros do sistema, indicados pelas setas.

FIGURA 32 – PERFIL DO ENLACE – MODELO MODEL II



FONTE: CelPlanner

A figura 32 mostra o perfil do enlace obtido a partir da simulação realizada, onde fica fácil visualizar a 1ª Zona de Fresnel, livre de obstáculos, bem como os pontos de reflexões das ondas eletromagnéticas sobre a morfologia (em vermelho – região urbana densa e em rosa – região urbana).

TABELA 24 – SÍNTESE DO RESULTADO DA SIMULAÇÃO UTILIZANDO O CELPLANNER – MODEL II

PARÂMETROS	ENLACE DIRETO ⁽³⁾	ENLACE REVERSO ⁽⁴⁾
BER ⁽¹⁾	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Sensibilidade ⁽¹⁾ (dBm)	-93.5	-93.5
S/N ⁽²⁾ mín (dB)	10.034	10.034
Frequência ⁽¹⁾ (MHz)	22585.5	23593.5
Polarização ⁽¹⁾	Vertical	Vertical
<i>L_{bf}</i> ⁽²⁾ (dB)	138.879	139.258
<i>K</i> ⁽¹⁾⁽⁵⁾	4/3	4/3
Perda por Difração ⁽²⁾ (dB)	0	0
Perda por Gases ⁽²⁾ (dB)	1.801	1.638
Perda Total de Caminho ⁽²⁾ (dB)	140.68	140.896
<i>F_m</i> Bruta ⁽²⁾ (dB)	74.36	74.144
Modelo de Multipercurso ⁽¹⁾	ITU	ITU
Fator de Ocorrência de Multipercurso ⁽²⁾	6.80e ⁻⁰²	7.07e ⁻⁰²
Desvanecimento ⁽²⁾ (%)	2.49e ⁻⁰⁹	2.72e ⁻⁰⁹
Atenuação chuva ⁽²⁾ (dB)	20.786	22.358
Indisp. por Devanecimento ⁽²⁾ (s/Year)	0.001	0.001
Indisp. devido a chuva ⁽²⁾ (s/Year)	265.013	265.013
Indisp. Total ⁽²⁾ (s/Year)	265.014	265.014
Indisp. Objetiva ITU ⁽²⁾ (s/Year)	5203.44	5203.44

FONTE: CelPlanner

NOTAS: (1) Fornecido ao CelPlanner
 (2) Saída do Programa
 (3) Simepar – Fortex
 (4) Fortex - Simepar
 (5) Fator de raio da Terra

4.12.3 Comparativo Entre as Simulações e a Metodologia Proposta

O resultado das simulações encontram-se dispostos lado a lado com os obtidos a partir da metodologia proposta na tabela 25. Os principais parâmetros de entrada/saída referentes a cada um encontram-se devidamente especificados.

TABELA 25 – COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DAS SIMULAÇÕES E DA METODOLOGIA PROPOSTA

PARÂMETROS	ENLACE DIRETO	ENLACE REVERSO	ENLACE DIRETO	ENLACE REVERSO	METODOLOGIA PROPOSTA
	LOS		MODEL II		
BER ⁽¹⁾	10 ⁻⁶		10 ⁻⁶		10 ⁻⁶
Sensibilidade ⁽¹⁾ (dBm)	-93.5		-93.5		-93.5
S/N mín (dB)	10.034 ⁽²⁾		10.034 ⁽²⁾		20 ⁽¹⁾
Frequência ⁽¹⁾ (MHz)	22585.5	23593.5	22585.5	23593.5	23000
Polarização ⁽¹⁾	Vertical		Vertical		Vertical
Lbf ⁽²⁾ (dB)	138.879	139.258	138.879	139.258	139.25
K ⁽¹⁾	4/3		4/3		-
Perda por Difração ⁽²⁾ (dB)	-		0		-
Perda por Gases ⁽²⁾ (dB)	1.801	1.638	1.801	1.638	3.54
Perda Total de Caminho ⁽²⁾ (dB)	140.68	140.896	140.68	140.896	142.79
F _m Bruta ⁽²⁾ (dB)	74.36	74.144	74.36	74.144	67.99
Modelo de Multipercurso ⁽¹⁾	ITU		ITU		-
Fator de Ocorrência de Multipercurso ⁽²⁾	6.80e ⁻⁰²	7.07e ⁻⁰²	6.80e ⁻⁰²	7.07e ⁻⁰²	-
Desvanecimento ⁽²⁾ (%)	2.49e ⁻⁰⁹	2.72e ⁻⁰⁹	2.49e ⁻⁰⁹	2.72e ⁻⁰⁹	-
Atenuação chuva ⁽²⁾ (dB)	20.786	22.358	20.786	22.358	23.24
Indisp. por Devanecimento ⁽²⁾ (s/Year)	0.001	0.001	0.001	0.001	-
Indisp. devido a chuva ⁽²⁾ (s/Year)	265.013	265.013	265.013	265.013	-
Indisp. Total ⁽²⁾ (s/Year)	265.014	265.014	265.014	265.014	-
Indisp. Objetiva ITU ⁽²⁾ (s/Year)	5203.44	5203.44	5203.44	5203.44	-

NOTAS: (1) Dados fornecidos
(2) Resultados obtidos

A discussão sobre os resultados obtidos, dispostos na tabela 26, é feita no capítulo 5.

4.13 CONCLUSÃO

Seguindo-se a metodologia proposta no capítulo anterior, após ter-se definido os pontos do enlace sob estudo, trabalhou-se e filtrou-se a base de dados pluviométricos disponíveis da região de interesse a fim de se poder quantificar, em especial, os efeitos da atenuação devido a chuva. Convém mencionar que a base de dados filtrada pode ser aplicada a quaisquer outros enlaces operando em regiões similares. Os demais fatores meteorológicos relevantes, sob o ponto de vista da atenuação, foram calculados através dos modelamentos expostos no capítulo 2.

Na seqüência um enlace com as mesmas características técnicas, utilizando a base de dados morfológicos e topográficos do caminho de propagação foi simulado utilizando-se o CelPlanner. Os resultados que foram obtidos a partir dos cálculos, e da simulação, servem como base para a análise e discussão feitas no capítulo 5.

4.14 REFERÊNCIAS

- [4.1] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004, pág. 216.
- [4.2] BRAUN, S. Em entrevista concedida nos dias 30/03/2006 e 05/04/2006 no Instituto Tecnológico Simepar.
- [4.3] HARRIS, D. "The attenuation of electromagnetic waves due to atmospheric fog". Volume 16, Number 6. June 1995.
- [4.4] BRAUN, S. – Em entrevista concedida nos dias 30/03/2006 e 05/04/2006 no Instituto Tecnológico Simepar.
- [4.5] TIMES MICROWAVE SYSTEMS. "<http://www.timesmicrowave.com/tcom/index.shtml>". Acesso em 05/2006.
- [4.6] W.L. GORE & ASSOCIATES. "http://www.gore.com/en_xx/products/cables/microwave/index.html?xcmp=ej11&s_kwcid=0111570000000076". Acesso em 05/2006.
- [4.7] Sklar, B. "The Characterisation of Fading Channels". Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2a ed., Editora Prentice-Hall, 2001.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem por objetivo, utilizando-se os resultados obtidos no capítulo anterior para os enlaces calculado e simulados, avaliar quais são os principais fatores meteorológicos que causam atenuação em rádio enlaces operando em 23,6GHz, além de comparar os resultados obtidos a partir de ambos. Serão mostradas também algumas propostas para trabalhos futuros, que poderão dar uma continuidade a esta linha de pesquisa.

A fim de iniciar a discussão, tem-se a partir da tabela 26 a síntese, quantitativa, das atenuações devido aos principais fenômenos atmosféricos/meteorológicos apresentados no capítulo 2 e calculados no capítulo 4. A partir dela, pode-se concluir que, dentre os vários fenômenos atmosféricos analisados, a chuva é o que tem um efeito dominante sobre a atenuação de ondas de rádio na faixa de frequência de interesse, 23,6 GHz.

A atenuação devido a mesma, para 0,01 % do tempo, é de 23,24 dB ao longo de todo o caminho de propagação, considerando-se a distância efetiva de chuva de 6,57 km. Esta é uma atenuação bastante expressiva e que deve, obrigatoriamente, ser levada em conta quando do projeto do sistema de comunicação visto que o sistema poderia ter um desempenho abaixo do esperado, toda vez que uma célula de chuva passasse pelo caminho de propagação.

Tendo em vista que os dois pontos do rádio enlace, estações base Simepar e Fortex, encontram-se em altitudes similares, em relação ao nível do mar, e que a distribuição de O₂ na atmosfera é quase constante a baixas altitudes, abaixo de 2 km, tem-se que a atenuação causada por ele é praticamente constante ao longo de todo o percurso.

A partir da tabela 26 tem-se que a atenuação devido ao oxigênio é de, aproximadamente, 0,09 dB ao longo de todo o enlace para a frequência de operação desejada, podendo, do ponto de vista prático, vir a ser desconsiderada, exceto caso o enlace fosse operado numa frequência próxima a de ressonância da molécula de Oxigênio (60 GHz).

No caso do vapor d'água, tem-se, a partir da tabela 26, que mesmo operando o enlace em uma frequência próxima de um dos picos de ressonância da molécula

de vapor d'água, em torno de 22,23 GHz, a atenuação imposta ao sistema é de apenas 3,45 dB. Embora seja um valor relativamente baixo, especialmente se comparado a atenuação devido a propagação em espaço livre e a causada pela chuva, não pode ser desconsiderado, pois somando-a com os demais fatores pertinentes pode-se atingir valores totais expressivos.

Considerando-se a existência periódica de nuvens e em especial neblina na região de interesse, tem-se, a partir da tabela 26, considerando-se, o pior caso, uma visibilidade de apenas 50 m ($M = 1,15 \text{ g/m}^3$), e considerando-se que a neblina pode cobrir de forma uniforme toda a região de interesse, a atenuação resultante é próxima a 4,71 dB. Percebe-se claramente que a neblina (ou nuvem), quando houver, pode vir o segundo maior fator de atenuação mais expressivo.

A partir dos dados meteorológicos fornecidos constatou-se que não houve qualquer ocorrência de neve nos últimos anos e, portanto, a atenuação devido a neve, que em linhas gerais seria pouco superior a da chuva (no caso da neve “molhada”), não é considerada.

Segundo informações obtidas junto ao Simepar, [5.1], não há nenhuma estimativa de queda de granizo na região de interesse do rádio enlace. Isto se deve ao fato de não haver equipamentos instalados que possam registrar a quantidade e as dimensões dos hidrometeoros¹. Mesmo tendo a disposição um sistema de radar meteorológico, o máximo que se pode conseguir é avaliar condições em que a ocorrência de granizo seria possível ou provável. A ocorrência de granizo só pode ser constatada, *in loco*, mediante queixa de pessoas ou empresas lesadas pelo fenômeno.

Tendo em vista a situação exposta não há dados disponíveis para estimar a atenuação causada pelo granizo.

TABELA 26 – SÍNTESE DAS ATENUAÇÕES DEVIDO A FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS

DESCRIÇÃO	DISTÂNCIA EFETIVA CONSIDERADA (km)	ATENUAÇÃO ESPECÍFICA (dB/km)	ATENUAÇÃO TOTAL (dB)
Precipitação	6,57	3,53 ⁽¹⁾	23,24
Oxigênio	9,32	0,01	0,09
Vapor d'água	9,32	0,37	3,45
Nuvens/Neblina	9,32	0,506 ⁽²⁾	4,71
Granizo ⁽³⁾	-	-	-
Neve ⁽⁴⁾	-	-	0

NOTA: (1) Considerando-se polarização vertical

(2) Para $1,15 \text{ g/m}^3$ (Visibilidade de 50 m) e temperatura de 0 °C

(3) Não há dados disponíveis

(4) Não houve ocorrência de neve no período de tempo considerado

1 - Meteoro constituído por um conjunto de partículas de água, na fase líquida ou sólida, em queda livre ou em suspensão na atmosfera. Os hidrometeoros mais comuns são: chuva, chuvisco e a neve. Fonte: INMET.

Comparando-se os resultados obtidos a partir do enlace calculado utilizando-se a metodologia proposta e os obtidos através do programa CelPlanner, expostos na tabela 25, pode-se dizer que:

- Em linhas gerais ambas as abordagens, proposta e as utilizadas pelo programa CelPlanner, apresentam resultados similares;
- As diferenças específicas que surgem nos itens margem de desvanecimento bruta (F_m bruta) e perda total do caminho, podem ser explicadas pelo fato de o modelo do CelPlanner utilizar a EIRP da antena, ao invés do valor de ganho disponibilizado pelo fabricante, o que leva a valores pouco diferentes (2 dB a 4 dB) dos obtidos através da metodologia proposta;
- Mesmo levando-se em conta explicitamente outras formas de atenuação, como difração e propagação multipercurso, e o raio efetivo da terra, k , não contempladas explicitamente na metodologia proposta, tem-se que a influência das mesmas ao menos para este enlace em particular é praticamente nula, o que confirma a viabilidade do enlace proposto e estudado.
- A relação S/N mínima indicada pelas simulações é da ordem de 10 dB e a fixada pela metodologia é de 20 dB, portanto o valor assumido (20 dB) supre a necessidade mínima estimada pelo enlace para que se tenha uma BER de 10^{-6} .
- A maior diferença percentual entre valores calculado e simulado apresentada refere-se a atenuação devido a gases atmosféricos o que pode ser devido a diferenças de qual o algoritmo, do ITU, foi implementado no CelPlanner, modelo simplificado ou completo [5.3], e do implementado utilizado pela metodologia, simplificado.

5.1 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- O enlace estudado no capítulo 4, que possui visada direta, operando na região urbana de Curitiba não apresenta, segundo a metodologia proposta e as simulações realizadas, perdas totais devido a atenuação por fenômenos meteorológicos que inviabilizem o uso desta faixa de frequência;
- Quanto maior for a quantidade de chuva, pior será o desempenho do rádio enlace.
- Pode-se afirmar que caso o sistema seja dimensionado de forma a superar a atenuação imposta pela precipitação, os demais fatores atmosféricos, exceto em casos específicos onde as frequências utilizadas estivessem muito próximas a picos de ressonância de alguns poucos elementos químicos e moléculas, são de menor importância para o desempenho do rádio enlace em si, e em alguns casos podem até mesmo ser descartados da análise.
- Segundo a metodologia proposta, caso haja visada direta, enlaces com até 15,5 km podem ser operados na área de interesse da RUC, considerando-se os mesmos equipamentos e antenas utilizadas no capítulo 4.
- O comparativo entre o enlace calculado, utilizando a metodologia proposta, e o simulado através do programa CellPlanner apresentam resultados similares. As pequenas divergências entre ambos podem ser explicadas pelo fato de o CellPlanner implementar os modelos de atenuação de forma pouco diferente, bem como levar em conta nos cálculos, outros fatores inerentes ao enlace tais como: tipo de morfologia, diferentes frequências de transmissão e recepção (canais de transmissão e recepção), a EIRP das antenas utilizadas, entre outros.

5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

O presente trabalho deixa como perspectivas futuras:

- Montagem e operação real do rádio enlace proposto de forma a avaliar se na prática os resultados obtidos corroboram com os teóricos;
- Simular a propagação de um sinal de banda larga, através do rádio enlace estudado, utilizando diferentes esquemas de modulação, tais como: QAM8, QAM16, BPSK, QPSK, entre outros. Nestes sistemas o efeito do oxigênio atmosférico e vapor d'água devem ser diferentes e talvez grandes o suficiente de forma a resultar em erros de decodificação da informação transmitida, resultando em uma BER maior [5.2];
- Análise dos dados meteorológicos da região por um maior intervalo de tempo, especificamente no que tange a: temperatura, umidade, chuva, ocorrência de granizo, etc., de forma a proporcionar aos projetistas dados mais precisos que possam vir a ser utilizados no projeto de sistemas de rádio enlace operando em Curitiba e região metropolitana;
- Os cálculos e simulações realizadas no capítulo 4 correspondem a um enlace terrestre ponto-a-ponto cujo caminho de propagação é praticamente horizontal e, portanto, não incluem o efeito das camadas atmosféricas como seria no caso de um caminho de propagação inclinado, por exemplo, em um enlace entre uma estação terrestre e um satélite. Uma vez que sinais na faixa de 30 GHz, tem certa dificuldade em penetrar na atmosfera terrestre, seria interessante verificar para que altitudes e ângulos de elevação o sinal pode ou não ser recebido;
- Os problemas de interferência, efeitos de polarização cruzada, entre outros não foram objeto do presente trabalho.

5.3 REFERÊNCIAS

[5.1] BRAUN, S. Em entrevista concedida nos dias 30/03/2006 e 05/04/2006 no Instituto Tecnológico Simepar.

[5.2] ADACHI, F. SAWAHASHI, M. "Performance analysis of various 16 level modulation schemes under Rayleigh fading". NTT Mobile Communications Network Inc., Electronics Letters. Vol: 28, Issue: 17, Pages: 1579-1581. Kanagawa, 1992

[5.3] ITU-R Recommendation 676-1, "Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1-350 GHz", 1992

REFERÊNCIAS

- [1.1]. GIBBINS, C.J., "Radiowave Propagation in the Millimetric Bands", Rutherford Appleton Laboratories, presented at the Seminar "Business Opportunities in the Millimetric Wavebands", London, 27 June 1990.
- [1.2]. STEMP, G., "The Development of the Use of the Millimetric Wavebands in the United Kingdom", Symposium of Frequency Resources Development, Tokyo, June 1993.
- [1.3]. KIDDLE, P., "Millimetric Wave Systems - The Attractive Access Radio Solution", Radio Relay Systems, 11-14 October 1993.
- [1.4]. GIBBINS, C.J., "Millimetre-Wave Propagation Studies over a 500 m Path", Rutherford Appleton Laboratories.
- [1.5]. "Summary of RAL Research Projects", 1994.
- [1.6]. ITU-R Report 721-2, "Attenuation by Hydrometeors, in Particular Precipitation, and Other Atmospheric Particles", Recommendations and Reports of the CCIR, 1986, Vol. V, ITU, Geneva.
- [1.7]. ITU-R Report 719-3, "Attenuation by Atmospheric Gases", Recommendations and Reports of the CCIR, ITU, Geneva.
- [1.8]. ITU-R Recommendation 840, "Attenuation due to cloud and fog", 1992
- [1.9]. ITU-R Recommendation 676-1, "Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1-350 GHz", 1992.
- [2.1] KIDDLE, P., "Millimetric Wave Systems - The Attractive Access Radio Solution", Radio Relay Systems, 11-14 October 1993.
- [2.2] GIBBINS, C.J., "Radiowave Propagation in the Millimetric Bands", Rutherford Appleton Laboratories, presented at the Seminar "Business Opportunities in the Millimetric Wavebands", London, 27 June 1990.
- [2.3] GIBBINS, C.J., "Millimetre-Wave Propagation Studies over a 500 m Path", Rutherford Appleton Laboratories.
- [2.4] "Summary of RAL Research Projects", 1994.
- [2.5] HAL, M. P. M. et al. Propagation of Radiowaves. IEE, London, 1996. Pág. 15, 16
- [2.6] Shibuia, S. A Basic Atlas of Radio Wave Propagation. Japan: John Wiley & Sons, 1987.
- [2.7] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004. Pág. 110
- [2.8] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004. Pág. 111
- [2.9] MONDAL, N. C. ET AL. Some rain rate and rain attenuation statistics at millimeter wavelengths in the tropics. Theoretical and Applied Climatology. Publisher: Springer Wien
- [2.10] COLLIN, R.E., "Antennas and Radiowave Propagation", McGraw-Hill International, 1985, pp. 401-410.

- [2.11] MARSHALL, J. S., PALMER, W. "The Distribution of Raindrops with Size". Journal of the Atmospheric Sciences: Vol. 5, No. 4, pp. 165–166.
- [2.12] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. P.839-3: Rain height model for prediction methods, 2001.
- [2.13] HALLIKAINEN, M. et al, "Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range". IEEE, nov 1986.
- [2.14] JAIN, Y. et al, "Attenuation in melting snow on microwave- and millimetre-wave terrestrial radio links". IEEE, 1985.
- [2.15] ITU-R Recommendation 840, "Attenuation due to cloud and fog", 1992.
- [2.16] EDWIN F. A Review of Hail Growth by Stochastic Collection in a Cumulonimbus Model. Journal Pure and Applied Geophysics. Issue Volume 113, Number 1 / December, 1975. Pages 1019-1034.
- [2.17] ITU-R Recommendation 676-1, "Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1-350 GHz", 1992
- [2.18] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004.
- [2.19] Kerr, D. E. et al. Propagation of Short Radio Waves. England: Peter Peregrinus Ltd, 1997.
- [2.20] LIEBEL, H. "A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz". Colorado, 1991.
- [2.21] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. P.676-6: Attenuation by atmospheric gases, 2005.
- [2.22] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. P.838-3: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, 2005.
- [2.23] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. P.841-4: Conversion of annual statistics to worst-month statistics, 2005.
- [3.1] STEMP, G., "The Development of the Use of the Millimetric Wavebands in the United Kingdom", Symposium of Frequency Resources Development, Tokyo, June 1993.
- [3.2] "Evolution of the Fixed Services above 20 GHz", ETNO June 1994.
- [3.3] KIDDLE, P., "Millimetric Wave Systems - The Attractive Access Radio Solution", Radio Relay Systems, 11-14 October 1993.
- [3.4] "The Use of the Radio Spectrum Above 30 GHz", UK DTI, September 1988.
- [3.5] JEACOCK, T.G. and DHAMRAIT, M.S., "Harmonization of Frequency Bands and Services", Seminar on business Opportunities in the Millimetric Wavebands, London, June 1990.
- [3.6] STEMP, G., "Broadband: Opportunities with Radio", Conference on Broadband Communications Networks, London, 1991.
- [3.7] "The Use of the Radio Spectrum Above 30 GHz", UK DTI, September 1988.
- [3.8] MCLARNON, B., "Microwave Radio Propagation: A Primer for Digital Experimenters", 1ed. Ottawa, 2000.

[3.9] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004.

[3.10] BERROU, C. et al, "Near Optimum Error Correcting Coding and Decoding", Communications, IEEE Transactions on Volume 44, Issue 10, Oct 1996 Page(s):1261 - 1271.

[3.11] Sklar, B. "The Characterisation of Fading Channels". Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2a ed., Editora Prentice-Hall, 2001.

[3.12] HALL, M.P.M. et al, "Propagation of Radiowaves", UK, IEEE, 1996.

[3.13] SEIDEL, S.Y., "Radio propagation and planning at 28 GHz for local multipoint distribution service". Jun 1998.

[3.14] MATTIELLO, C. "Visibility estimation for urban radio-link design". UK, 1993.

[4.1] RIBEIRO, J. A. J., "Propagação das Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações", 1ed. São Paulo, Erica, 2004, pág. 216.

[4.2] BRAUN, S. Em entrevista concedida nos dias 30/03/2006 e 05/04/2006 no Instituto Tecnológico Simepar.

[4.3] HARRIS, D. "The attenuation of electromagnetic waves due to atmospheric fog". Volume 16, Number 6. June 1995.

[4.4] BRAUN, S. Em entrevista concedida nos dias 30/03/2006 e 05/04/2006 no Instituto Tecnológico Simepar.

[4.5] TIMES MICROWAVE SYSTEMS. "<http://www.timesmicrowave.com/tcom/index.shtml>". Acesso em 05/2006.

[4.6] W.L. GORE & ASSOCIATES. "http://www.gore.com/en_xx/products/cables/microwave/index.html?xcmp=ej11&s_kwcid=011157000000076". Acesso em 05/2006.

[4.7] Sklar, B. "The Characterisation of Fading Channels". Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2a ed., Editora Prentice-Hall, 2001.

[5.1] BRAUN, S. Em entrevista concedida nos dias 30/03/2006 e 05/04/2006 no Instituto Tecnológico Simepar.

[5.2] ADACHI, F. SAWAHASHI, M. "Performance analysis of various 16 level modulation schemes under Rayleigh fading". NTT Mobile Communications Network Inc., Electronics Letters. Vol: 28, Issue: 17, Pages: 1579-1581. Kanagawa, 1992

[5.3] ITU-R Recommendation 676-1, "Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1-350 GHz", 1992

ANEXOS

ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÕES DE ANTENAS E EQUIPAMENTOS DE RÁDIO

**ANEXO 2 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES UTILIZANDO OS MODELOS LOS E
MODEL II**

**ANEXO 3 – ORÇAMENTO PARA IMPLEMENTAÇÃO DO ENLACE PROPOSTO
NO ESTUDO DE CASO**