

Fernando Jose de Almeida Andrade

**Planejamento de Sistemas Fixos para
Acesso Sem Fio em Faixa Larga
Operando em Ambientes Abertos
em Frequências entre 10 e 66 GHz**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro, abril de 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Fernando Jose de Almeida Andrade

**Planejamento de Sistemas Fixos para
Acesso Sem Fio em Faixa Larga
Operando em Ambientes Abertos
em Frequências entre 10 e 66 GHz**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento
de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro

Abril de 2006



Fernando José de Almeida Andrade

**Planejamento de Sistemas Fixos para
Acesso Sem Fio em Faixa Larga
Operando em Ambientes Abertos em
Frequências entre 10 e 66 GHz**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Geraldo Gil Ramundo Gomes
INATEL

Prof. Erasmus Couto Brazil de Miranda
UCP

Prof. Rodolfo Sabóia Lima de Souza
Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Fernando Jose de Almeida Andrade

Graduou-se em Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1989. Especializou-se em Engenharia de Redes e Sistemas de Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações em 2003. Trabalhou durante 13 anos com automação comercial e sistemas de telecomunicações.

Ficha Catalográfica

Andrade, Fernando Jose de Almeida

Planejamento de sistemas fixos para acesso sem fio em faixa larga operando em ambientes abertos em frequências entre 10 e 66 GHz / Fernando Jose de Almeida Andrade ; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

149 f. : il. (col.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. BWA. 3. WMAN. 4. WiMAX. 5. IEEE 802.16. 6. Banda larga. 7. Comunicações sem fio. 8. Radio-propagação. 9. Atenuação por chuvas. 10. Planejamento. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para minhas filhas, Fernanda e Mariana,
que chegaram durante a realização
deste trabalho.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Luiz Alencar Reis da Silva Mello, pela orientação e apoio para a realização deste trabalho e durante todo o curso;

À Professora Marlene Sabino Pontes pela confiança e pelo incentivo durante a realização do curso;

Ao Erasmus Miranda pela preciosa colaboração com valiosas sugestões;

À minha esposa, Maura, pelo apoio, paciência e colaboração que foram decisivos para a realização deste trabalho especialmente durante esta etapa da minha vida após o nascimento de nossas filhas;

Aos meus pais, Moacyr e Renita, pela educação, apoio e incentivo por toda a minha vida;

À minha tia, Thery, pelo carinho, incentivo e apoio permanentes;

À Maria Lúcia pela permanente disposição para colaborar na biblioteca do CETUC;

À PUC-Rio pela bolsa que viabilizou o início da realização dos estudos;

Ao CNPQ pelo auxílio concedido, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado;

À FAPERJ pelo auxílio concedido através do Programa Bolsa Nota Dez, imprescindível para a realização deste trabalho.

Resumo

Andrade, Fernando Jose de Almeida; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da. **Planejamento de Sistemas Fixos para Acesso Sem Fio em Faixa Larga Operando em Ambientes Abertos em Frequências entre 10 e 66 GHz.** Rio de Janeiro, 2006. 149p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O projeto de sistemas fixos de acesso sem fio em banda larga operando em ambientes abertos em frequências entre 10 e 66 GHz requer um planejamento criterioso devido à necessidade de maximizar a utilização da largura de banda disponível, maximizar a capacidade da rede, garantir requisitos mínimos de disponibilidade e minimizar os custos em um tipo de ambiente e em uma faixa de frequências em que as ondas eletromagnéticas são sujeitas a fenômenos específicos durante a propagação. Este trabalho apresenta os aspectos envolvidos no planejamento de sistemas deste tipo que utilizam topologia ponto-multiponto e atendem à recomendação IEEE 802.16. São apresentados modelos para previsão de cobertura, cálculo da atenuação diferencial por chuvas e previsão da atenuação por chuvas considerando a não-homogeneidade das chuvas em duas dimensões horizontalmente. Os efeitos das interferências no desempenho dos sistemas são analisados em conjunto com alguns exemplos de planejamento das células. Os aspectos importantes para o planejamento da capacidade são descritos e técnicas que permitem maximizar a capacidade são apresentadas. Com o objetivo de organizar todas as informações para ajudar em situações reais uma metodologia de planejamento é proposta incluindo considerações técnicas, mercadológicas e financeiras.

Palavras-chave

BWA; WMAN; WiMAX; IEEE 802.16; Banda Larga; Comunicações Sem Fio; Rádio-propagação; Atenuação por Chuvas; Planejamento.

Abstract

Andrade, Fernando Jose de Almeida; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Advisor). **Planning of Outdoor Broadband Fixed Wireless Access Systems Operating at 10-66 GHz Band.** Rio de Janeiro, 2006. 149p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The development of outdoor fixed broadband wireless access (BWA) systems operating at 10-66 GHz frequency requires a carefully planning in order to maximizing the use of the bandwidth, maximizing network capacity, assuring minimum requirements of availability and minimizing costs in an environment and in a frequency band where the propagation of electromagnetic waves are subjected to specific issues. This work presents the aspects related to the development of this kind of system in a point-to-multipoint architecture standardized by the IEEE 802.16 recommendation. Models to predict coverage, estimate differential rain attenuation and predict rain attenuation considering the un-homogeneity of the rain in horizontal plane. The effects of interference in the system performance are discussed with some examples of cell planning. The main aspects of capacity planning are described and techniques to maximize capacity are presented. In order to helping the planners in practical situations the information are organized in a proposal of planning methodology that includes technical, business and marketing issues.

Keywords

BWA; WMAN; WiMAX; IEEE 802.16; broadband; wireless; propagation; rain attenuation; planning.

Sumário

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Introdução | 16 |
| 1.1. | Histórico | 18 |
| 2 | Tecnologia IEEE 802.16 | 21 |
| 2.1. | Introdução | 21 |
| 2.2. | Faixas de frequências de operação | 21 |
| 2.3. | Topologias de rede | 22 |
| 2.4. | Camada de controle de acesso ao meio (MAC) | 24 |
| 2.5. | Camada física para a faixa de 10 a 66 GHz | 27 |
| 2.5.1. | Enlace de descida | 28 |
| 2.5.2. | Enlace de subida | 29 |
| 2.5.3. | Taxas de comunicação e larguras de canais | 29 |
| 2.5.4. | Subsistema de rádio | 30 |
| 2.5.5. | Requisitos de desempenho | 31 |
| 2.5.6. | Medidas de qualidade do canal | 32 |
| 3 | Propagação em ambientes abertos na faixa 10-66 GHz | 33 |
| 3.1. | Perdas na propagação | 35 |
| 3.1.1. | Atenuação por gases atmosféricos e vapor de água | 35 |
| 3.1.2. | Atenuação por chuva | 36 |
| 3.1.3. | Atenuação diferencial | 43 |
| 3.1.4. | Variação nos ângulos de partida e chegada das ondas | 45 |
| 3.1.5. | Desvanecimentos por outros mecanismos | 46 |
| 3.2. | Cálculo da atenuação total na propagação | 46 |
| 3.3. | Redução na discriminação da polarização cruzada (XPD) | 47 |
| 4 | Aspectos Técnicos para o Planejamento | 48 |
| 4.1. | Cobertura | 49 |
| 4.1.1. | Previsão da área não sujeita a obstrução por edificações | 51 |

| | |
|--|-----|
| 4.1.2. Efeitos das chuvas na cobertura | 54 |
| 4.1.3. Efeitos de outros fatores na cobertura | 58 |
| 4.1.4. Melhoria da cobertura | 59 |
| 4.2. Interferências | 59 |
| 4.2.1. Coexistência entre sistemas | 61 |
| 4.2.2. Interferências intra-sistema | 65 |
| 4.2.3. Minimização de interferência | 70 |
| 4.3. Planejamento de frequências e setorização | 72 |
| 4.3.1. Influência da setorização e do tipo de modulação na cobertura | 78 |
| 4.3.2. Exemplo de configuração para um conjunto de células | 79 |
| 4.4. Capacidade | 82 |
| 4.4.1. Aspectos que influem na capacidade de um sistema | 82 |
| 4.4.2. Técnicas para aumento da capacidade | 84 |
| 4.4.3. Escalabilidade no planejamento da capacidade | 86 |
| | |
| 5 Metodologia de Planejamento | 88 |
| 5.1. Proposta de metodologia de planejamento | 89 |
| 5.2. Projeto de rede | 94 |
| 5.2.1. Raio das células em sistemas baseados no padrão IEEE 802.16 | 94 |
| 5.2.2. Cálculo da capacidade | 111 |
| 5.2.3. Estimativa de interferência co-canal | 114 |
| 5.2.4. Metodologia de projeto de rede | 117 |
| | |
| 6 Estudo de caso | 124 |
| | |
| 7 Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros | 135 |
| | |
| 8 Referências bibliográficas | 137 |
| | |
| APÊNDICE A Informações sobre o Projeto Realizado | 146 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Arranjos de canais de RF [12] | 30 |
| Tabela 3.1 – Coeficientes para cálculo da atenuação específica na faixa de frequências em estudo [34] | 41 |
| Tabela 4.1 – Espaçamento necessário conforme o tipo de cenário [11] | 64 |
| Tabela 4.2 – Valores mínimos de S/I_a [12] | 68 |
| Tabela 4.3 – Influência do tipo de modulação e da quantidade de setores na área de cobertura [40] | 79 |
| Tabela 5.1 – Valores mínimos de potência no receptor em dBm para cada tipo de modulação conforme especificação de taxa de erro de bits (BER) [12] | 96 |
| Tabela 5.2 – Parâmetros de um sistema IEEE 802.16 no enlace de descida | 100 |
| Tabela 5.3 – Potência mínima de no receptor da estação assinante de um sistema IEEE 802.16. | 101 |
| Tabela 5.4 – Requisitos mínimos de relação $S/(N+I)$. | 101 |
| Tabela 5.5 – Níveis máximos de interferência em dBm no limiar do receptor de uma estação assinante. | 101 |
| Tabela 5.6 – Raio máximo das células em condições de céu claro para $BER = 10^{-6}$. | 102 |
| Tabela 5.7 – Raio máximo das células em condições de céu claro para $BER = 10^{-3}$. | 103 |
| Tabela 5.8 – Taxas de chuvas das cidades analisadas. | 105 |
| Tabela 5.9 – Raio máximo das células em condições de chuvas (Paris) | 105 |
| Tabela 5.10 – Raio máximo das células em condições de chuvas (Rio de Janeiro) | 106 |
| Tabela 5.11 – Raio máximo das células em condições de chuvas (Belém) | 106 |
| Tabela 6.1 – Raio máximo da célula na cidade de São Paulo | 127 |
| Tabela A.1 – Especificações das estações base | 146 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 – Propagação em visada direta [18]. | 33 |
| Figura 3.2 - Atenuação específica por gases atmosféricos e vapor de água [25]. | 37 |
| Figura 3.3 - Diferença de atenuação entre polarização horizontal e vertical [26] | 38 |
| Figura 3.4 – Situação de atenuação diferencial por chuvas [22]. | 44 |
| Figura 4.1 – Ilustração da localização das edificações entre as estações transmissora e receptora [43] | 52 |
| Figura 4.2 – Ilustração das distâncias envolvidas na determinação da condição de desobstrução entre as estações transmissora e receptora [43] | 53 |
| Figura 4.3 – Ilustração de uma célula de raio L e área de cobertura durante a ocorrência de chuvas limitada pelo raio d_0 [43] | 56 |
| Figura 4.4 – Variação da cobertura em função do raio da célula para diferentes alturas da antena da estação base [43]. | 60 |
| Figura 4.5 – Variação da cobertura em função do raio da célula para diferentes alturas das antenas das estações assinantes [43] | 60 |
| Figura 4.6 – Formas de interferência [11]. | 61 |
| Figura 4.7 – Interferências intra-sistema [46]. | 65 |
| Figura 4.8 – Diagrama de irradiação de uma das antenas da estação base G [46] | 66 |
| Figura 4.9 – Ilustração de relação sinal/interferência de canal adjacente [46] | 67 |
| Figura 4.10 – Ilustração de configuração com células retangulares e setores de 90° . | 74 |
| Figura 4.11 – Ilustração de configuração de células com repetição “espelhada” dos canais [54]. | 76 |
| Figura 4.12 – Configuração de células com o uso de polarizações diferentes [46]. | 77 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.13 – Distribuição de valores de S/I dentro de um setor [54]. | 78 |
| Figura 4.14 – Exemplo de configuração comum [55]. | 80 |
| Figura 4.15 – Minimização das áreas sujeitas a problemas de cobertura [55]. | 81 |
| Figura 4.16 – Configuração com uso de polarizações diferentes na fronteiras entre setores [46]. | 85 |
| Figura 4.17 – Aumento gradual da capacidade [53] | 86 |
| Figura 5.1 – Etapas principais do planejamento | 90 |
| Figura 5.2 – Raio máximo das células em condições de céu claro | 103 |
| Figura 5.3 – Regiões da célula com cada tipo de modulação. | 104 |
| Figura 5.4 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (QPSK) | 107 |
| Figura 5.5 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (16-QAM) | 108 |
| Figura 5.6 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (64-QAM) | 108 |
| Figura 5.7 – Efeito da especificação da disponibilidade no raio máximo da célula em condições de chuvas | 109 |
| Figura 5.8 – Variação do raio máximo da célula em condições de chuvas conforme a especificação da taxa de erro de bits e do tipo de modulação utilizado | 110 |
| Figura 5.9 – Exemplo de análise de visibilidade [60] | 119 |
| Figura 6.1 – Região da cidade de São Paulo onde a rede foi projetada | 125 |
| Figura 6.2 – O relevo da região escolhida está apresentado na área destacada | 125 |
| Figura 6.3 – Ilustração da área total com visibilidade para os locais escolhidos para as estações base | 127 |
| Figura 6.4 – Tamanho das células e área com cada tipo de modulação | 129 |
| Figura 6.5 – Mapa de cobertura com intensidade de sinal em situação de céu claro | 130 |
| Figura 6.6 – Mapa de cobertura conforme o melhor servidor em situação de céu claro | 130 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.7 – Mapa de cobertura conforme o tipo de modulação (céu claro) | 131 |
| Figura 6.8 – Cobertura através de modulação QPSK considerando as chuvas | 131 |
| Figura 6.9 – Mapa de níveis de relação $S/(N+I)$ | 133 |

*O amor somado ao perdão é a
fórmula infalível para se obter a paz.*

Isabel Salomão de Campos

1 Introdução

O avanço da tecnologia viabilizou a implementação de comunicação em faixa larga (“broadband”) que possibilita o tráfego de grandes volumes de informação em altas taxas. Novas tecnologias vêm despertando um grande interesse nos últimos anos e, conseqüentemente, a demanda das empresas e da população em geral por serviços de comunicação em faixa larga causou um forte aumento na quantidade de linhas de comunicação instaladas com este perfil em todo o mundo. Esta quantidade aumentou de 57 milhões em 2002 para cerca de 80 milhões no final de 2003 [1].

Uma parte das tecnologias foi viabilizada através da implantação das redes de fibra ótica e permitiu um avanço do uso dos serviços de comunicação em faixa larga. Os altos custos para disponibilização deste tipo de tecnologia, entretanto, ainda são um obstáculo para sua utilização por empresas de médio e pequeno porte e por clientes residenciais fazendo com que tais serviços sejam utilizados somente pelas grandes empresas.

O surgimento de tecnologias que permitiram a utilização das redes de cabos existentes das empresas operadoras de telefonia e de TV por assinatura para oferta de serviços de comunicação em faixa larga mudou este quadro. O uso das redes de pares metálicos e cabos coaxiais possibilitou a expansão destes serviços para as empresas de pequeno e médio porte e para as residências, especialmente em áreas de alta densidade populacional. A oferta destes serviços, entretanto, se tornou um desafio nas áreas com baixas densidades populacionais onde o alto custo de implantação de redes cabeadas e as limitações de distância para uso das tecnologias disponíveis não estimulam ou não possibilitam a oferta dos serviços.

Uma alternativa para ampliar o alcance do acesso a serviços de comunicação em faixa larga é o uso de tecnologias que permitem o tráfego de grandes volumes de informação em altas taxas, em conjunto com a facilidade e rapidez de implantação de redes sem fio a baixo custo em comparação com as redes baseadas em cabos. Estes são os principais atrativos das tecnologias de redes

sem fio em áreas metropolitanas (*Wireless Metropolitan Area Networks* - WMANs) que se tornaram de grande interesse nos últimos anos. Estas tecnologias viabilizam a implementação de comunicação em faixa larga sem a dependência das empresas proprietárias das redes cabeadas e permitem aplicações tais como :

- implementação de acesso sem fio na “última milha” como, por exemplo, a interconexão com a Internet de clientes residenciais ou de redes WLAN (*Wireless Local Area Networks*) que seguem o padrão 802.11 conhecido como Wi-Fi;

- implementação de sistemas ponto-a-ponto como, por exemplo, a interconexão de estações rádio base celulares ou de pontos de acesso de redes WLAN.

É possível prever que a implementação de redes deste tipo passe por uma fase de crescimento acelerado em curto prazo devido ao desenvolvimento e padronização das novas tecnologias. A expectativa de crescimento é confirmada pelos volumosos investimentos que vêm sendo feitos por mais de 120 empresas que atuam na área de comunicações como fabricantes de equipamentos e componentes (Intel, Alcatel, Motorola, Siemens, AT&T, Fujitsu, entre outras) e provedores de serviços que se uniram na formação de um grupo com o objetivo de garantir uma padronização para as tecnologias dos equipamentos de modo a permitir a interoperabilidade entre eles. Este grupo constitui o fórum denominado WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e as empresas que participam do grupo são responsáveis por mais de 75% das vendas de equipamentos para acesso fixo sem fio em banda larga operando em frequências abaixo de 11 GHz [2].

Uma destas tecnologias começou a ser padronizada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) em 1998 através do grupo 802.16 para prover o acesso de “última milha” em redes metropolitanas (*Metropolitan Area Networks* - MAN). O padrão recebeu a denominação de IEEE 802.16 - “*Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*” e é também conhecido como “*IEEE WirelessMAN Air Interface*” [3].

Para viabilizar a implantação de redes deste tipo em ambientes abertos é fundamental dispor de conhecimento de técnicas para o planejamento otimizado destas redes. Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de planejamento para sistemas fixos de acesso sem fio em faixa larga operando em ambientes abertos em frequências entre 10 e 66 GHz. Esta faixa de

frequências foi escolhida por ser uma das faixas consideradas na padronização desenvolvida pelo IEEE.

Serão abordadas neste estudo as características principais do padrão IEEE 802.16 para sistemas operando na faixa de frequências entre 10 e 66 GHz.

Será realizada uma descrição das principais influências climatológicas sobre a propagação das ondas eletromagnéticas na faixa de frequências escolhida. Entre estas influências climatológicas se destaca a atenuação por chuvas cuja análise precisa incluir tanto a abordagem temporal das precipitações como a abordagem sob o ponto de vista espacial que leva em consideração a não uniformidade das células de chuva e implica em problemas de limitação de cobertura e indisponibilidade espacial.

Serão apresentados aspectos importantes para planejamento de sistemas tais como minimização de interferências intra-sistêmicas e intersistêmicas, planejamento de frequências e da capacidade da rede e planejamento da área de cobertura.

Finalmente será apresentada uma proposta de metodologia de planejamento incluindo um estudo de caso para sua aplicação.

1.1. Histórico

O início do desenvolvimento de tecnologias para sistemas fixos de acesso sem fio em faixa larga (*Broadband Fixed Wireless Access – BFWA*) ocorreu nos anos 90 em diversas partes do mundo para operação em frequências próximas de 24 GHz, 28 GHz, 31, GHz e 40 GHz [4].

Em 1996 uma largura de banda de 1 GHz na faixa frequências próxima a 28 GHz foi regulamentada no Canadá para utilização pelas redes BFWA. Na Europa, nesta mesma época, particularmente no Reino Unido, foram desenvolvidos serviços para operação em frequências próximas a 40 GHz [4].

Em 1998 começaram a ser utilizados comercialmente nos Estados Unidos sistemas operando em faixas próximas a 24 e 38 GHz e surgiram os serviços de distribuição multiponto local (*Local Multipoint Distribution Service – LMDS*) operando na faixa 28-31 GHz [4].

O desenvolvimento de serviços operando nas frequências mencionadas não seguia, entretanto, nenhum tipo de padronização. A diversidade de larguras de banda alocadas em cada faixa de frequência foi uma característica da fase inicial de desenvolvimento de serviços para acesso fixo sem fio nos diferentes países. Na Alemanha, por exemplo, foram alocados 56 MHz na faixa de 26 GHz enquanto na França foram alocados 112 MHz [5]. Nos Estados Unidos foi alocada uma banda de 1150 MHz e outra de 150 MHz para operação dos serviços LMDS [4].

A falta de uma padronização fez com que os sistemas fossem proprietários e não possibilitassem interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes. Este fato fez com que não houvesse escala suficiente de fabricação e, por isto, os custos dos equipamentos eram muito altos, inviabilizando a utilização dos serviços por clientes residenciais e pequenas empresas.

Em abril de 1998, um projeto de duas agências do Departamento de Comércio do governo dos Estados Unidos começou a chamar a atenção para a necessidade de padronização [4] e, em novembro de 1998, o IEEE iniciou as discussões sobre o assunto. Em abril de 1999 o IEEE estabeleceu o grupo de trabalho 802.16 para desenvolver uma padronização de interface aérea.

Além do padrão do IEEE, outro padrão começou a ser desenvolvido na Europa pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*).

Em abril de 2001 foi criado o fórum WiMAX formado por um grupo de empresas com a finalidade de buscar a garantia de interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes e tecnologias.

Em setembro de 2001 o IEEE publicou o documento IEEE Std. 802.16.2-2001 definindo um conjunto de recomendações práticas para projeto e implementação de redes com o objetivo de possibilitar a coexistência entre os sistemas de acesso fixo sem fio em banda larga na faixa entre 23,5 GHz e 43,5 GHz [6].

Em outubro de 2001 o IEEE concluiu o padrão 802.16-2001 que foi publicado em março de 2002. Este padrão definiu a interface aérea *WirelessMAN* com esquema de modulação em portadora única para operação na faixa 10-66 GHz [7].

Em janeiro de 2003 o IEEE publicou a versão “c” do padrão, denominada IEEE Std. 802.16-c [8], que apresentou correções do padrão IEEE 802.16-2001 e incluiu a especificação de um conjunto de perfis de sistemas para operação na

faixa de frequências entre 10 e 66 GHz que contribui para garantir a interoperabilidade entre diferentes fabricantes [9].

Em abril do mesmo ano o IEEE publicou a versão “a” do padrão, denominada IEEE Std. 802.16-a. Esta versão ampliou a faixa de frequências de operação incluindo a faixa entre 2 e 11 GHz em bandas licenciadas e bandas isentas de licença e possibilitando a operação sem visada direta [10].

Em março de 2004 foi revisado pelo IEEE o conjunto de recomendações práticas para coexistência entre os sistemas (IEEE Std 802.16.2-2004 [11]) e em outubro do mesmo ano foi revisado o padrão IEEE Std. 802.16-2001 que passou a ser denominado IEEE Std. 802.16-2004 e incorporou todas as informações presentes nas versões anteriores “a” e “c” [12].

Atualmente está sendo desenvolvida uma versão do padrão (802.16-e) que irá incorporar mobilidade às estações em velocidades veiculares com operação em frequências entre 2 e 6 GHz. A previsão de conclusão desta versão é 2006 [9].

O padrão desenvolvido na Europa pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) também tem recebido a cooperação do WiMAX Forum para que exista interoperabilidade com equipamentos que seguem o padrão IEEE. O padrão europeu é denominado ETSI HiperACCESS para frequências acima de 11 GHz e ETSI HiperMAN para frequências abaixo de 11 GHz [13].

Para ratificar o uso dos padrões em todo o mundo o ITU (*International Telecommunication Union*) está desenvolvendo uma recomendação específica para identificar os padrões para acesso sem fio em faixa larga [13].

2 Tecnologia IEEE 802.16

2.1. Introdução

O padrão IEEE 802.16-2004 especifica a interface rádio aérea de sistemas fixos de acesso sem fio em banda larga (*Broadband Wireless Access* – BWA) para serviços de dados, voz e vídeo com segurança e especificação de qualidade de serviço (QoS) [12].

O padrão inclui a especificação da camada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* – MAC) e da camada física (*Physical Layer* – PHY).

A camada MAC é estruturada para suportar múltiplas especificações de camada física, cada qual apropriada para um tipo particular de ambiente operacional conforme a faixa de frequências da aplicação.

2.2. Faixas de frequências de operação

As faixas do espectro de frequências consideradas no padrão do IEEE são :
- 10 a 66 GHz

Nesta faixa é imprescindível a existência de visada direta (*Line of Sight* – LOS) entre os transceptores mas os efeitos de multipercursos podem ser desprezados em função do uso de antenas muito diretivas na estação assinante [12].

Canais com larguras de faixa de 25 ou 28 MHz são típicos e possibilitam taxas brutas de dados superiores a 120 Mbps, fazendo com que a operação nesta faixa seja apropriada para aplicações com acesso ponto-multiponto (PMP) tanto para residências e escritórios de pequeno porte como para médias e grandes empresas [12].

Esta faixa de frequência depende de licença para operação e é a faixa considerada neste estudo.

- Abaixo de 11 GHz

Esta faixa inclui frequências que dependem de licença para operação e frequências que não dependem de licença para operação.

Nesta faixa de frequências é possível a operação sem visada direta (*Non-Line-of-Sight* – NLOS) ou em visada quase direta (*Near-Line-of-Sight*) embora os efeitos de multipercursos deixem de ser desprezíveis [12].

A habilidade para operar neste cenário requer funcionalidades adicionais na camada física incluindo técnicas avançadas de gerenciamento de potência, mitigação de interferência e utilização de antenas múltiplas.

2.3. Topologias de rede

Uma rede que utiliza um meio compartilhado deve fornecer um mecanismo de compartilhamento eficiente. Neste caso o meio é o espaço livre, através do qual as ondas de rádio se propagam.

O padrão considera 2 tipos de topologias: ponto-multiponto (PMP) e malha completa, conhecida como *mesh*.

- Topologia ponto-multiponto (PMP)

Na topologia ponto-multiponto (PMP) um sistema no padrão 802.16 opera com uma estação central chamada estação base (BS) provida de antenas setorizadas de forma que possam tratar simultaneamente a comunicação com as estações dos usuários (denominadas estações assinantes (SS)) de setores múltiplos e independentes.

No enlace de descida (*downlink*) todas as estações assinantes que estão em um determinado setor e utilizam um dado canal de frequência recebem a mesma transmissão, ou parte dela. A estação base é o único transmissor operando nesta direção e, portanto, não necessita de coordenação com outras estações exceto no caso de duplexação por divisão de tempo (TDD) onde o tempo é dividido em períodos para transmissão do enlace de subida (*uplink*) e períodos para transmissão do enlace de descida.

A estação base realiza uma difusão para todas as estações assinantes de um setor e estas estações verificam o endereço de destino nas mensagens recebidas e processam somente as mensagens destinadas a elas.

As mensagens podem ser enviadas para todos os assinantes por difusão (*broadcast*) mas também podem ser enviadas individualmente ou para grupos de estações assinantes (*multicast*).

Na outra direção, as estações de assinantes compartilham o enlace de subida conforme a demanda. Dependendo da classe de serviço utilizada, a estação assinante pode receber o direito de transmitir continuamente ou o seu direito para transmitir pode ser dado pela estação base após receber uma requisição do usuário.

Dentro de cada setor, os usuários aderem a um protocolo de transmissão que controla a contenção entre usuários e habilita o serviço a ser transmitido adaptado aos requisitos de atraso e largura de faixa de cada aplicação do usuário.

- Topologia *mesh*

A principal diferença entre os sistemas ponto-multiponto e o modo *mesh* é que para o primeiro o tráfego ocorre somente entre estação base e estações assinantes enquanto no modo *mesh* o tráfego pode ser encaminhado através de outras estações assinantes e também pode ocorrer diretamente entre elas. Dependendo do algoritmo do protocolo de transmissão usado, isto pode ser feito de três modos: de forma igualitária usando planejamento distribuído, com base na superioridade da estação base *mesh* que efetivamente resulta em planejamento centralizado ou através da combinação de ambos.

Dentro de uma rede *mesh*, um sistema que tem uma conexão direta para interligar serviços para fora da rede *mesh* é denominado estação base *mesh*. Todos os outros sistemas são denominados estações assinantes *mesh*. Em geral, os sistemas de uma rede *mesh* são denominados nós. Neste mesmo contexto, o enlace de subida e o enlace de descida são definidos como o tráfego na direção da estação base *mesh* e tráfego a partir da estação base *mesh*, respectivamente.

Outros três importantes termos de um sistema *mesh* são os vizinhos, a vizinhança e a vizinhança estendida. As estações com as quais o nó possui enlaces diretos recebem a denominação de “vizinhos”. Vizinhos de um nó formam a “vizinhança”. Os vizinhos de um nó são aqueles distantes de um salto (um enlace) do nó. A “vizinhança estendida” contém, adicionalmente, todos os vizinhos da vizinhança.

Em um sistema *mesh* nem mesmo a estação base *mesh* pode transmitir sem coordenação com os outros nós. Usando planejamento distribuído, todos os nós, incluindo a estação base *mesh*, coordenarão suas transmissões com nós até dois saltos na vizinhança (vizinhos dos vizinhos) e realizarão a difusão do seu planejamento (recursos disponíveis, solicitações e concessões) para todos os vizinhos. Opcionalmente, o planejamento pode ser estabelecido por requisições e por concessões diretas, não-coordenadas entre dois nós. Os nós irão se certificar de que a transmissão resultante não causará colisões com o tráfego programado de dados e de controle de nenhum outro nó até dois saltos na vizinhança. Não há diferença no mecanismo usado para determinação do planejamento no enlace de descida e de subida.

Usando planejamento centralizado, recursos são concedidos de uma maneira centralizada. Uma estação base *mesh* reunirá solicitações de recursos de todas as estações assinantes *mesh* dentro de um certo alcance, determinará a quantidade de recursos concedidos para cada enlace na rede, tanto na descida quanto na subida, e comunicará às estações assinantes *mesh* em sua área de alcance. As mensagens de concessão não contêm o planejamento real mas cada nó deve calculá-lo utilizando o algoritmo pré-determinado com os parâmetros dados.

Os sistemas *mesh* usam tipicamente antenas omnidirecionais, mas podem também usar antenas setorizadas. No limite da área de cobertura de uma rede *mesh*, onde somente é necessária uma conexão para um único ponto, até mesmo antenas altamente diretivas podem ser usadas.

2.4. Camada de controle de acesso ao meio (MAC)

A camada MAC é dividida em três subcamadas que são descritas de maneira resumida a seguir.

- Subcamada CS (Service Specific Convergence Sublayer)

Esta é a subcamada mais acima dentro da camada MAC fazendo a interface com a rede externa. São necessárias múltiplas especificações desta subcamada para prover interface com protocolos diferentes.

O padrão 802.16 apresenta duas especificações para esta subcamada. Uma especificação é para convergência ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) que é

definida para serviços ATM. A outra especificação é para convergência de pacotes definida para serviços de pacotes tais como IPv4, IPv6, Ethernet e redes locais virtuais (VLAN) [14].

- Subcamada CPS (Common Part Sublayer)

Esta subcamada recebe dados de diversas subcamadas CS e provê as funções principais de acesso do sistema garantindo mecanismos eficientes de compartilhamento de recursos e alocação de largura de faixa.

Em redes com topologia PMP a camada MAC é orientada a conexão. Com propósitos de mapeamento para serviços nas estações assinantes e associação de níveis variáveis de qualidade a estes serviços, todas as comunicações de dados são realizadas no contexto de uma conexão. A subcamada CPS é responsável pelo estabelecimento e manutenção das conexões.

Cada estação assinante tem um endereço MAC universal de 48 bits. Este endereço é único e define a estação assinante dentro de um conjunto de todos os tipos de equipamentos e fabricantes possíveis. O endereço é usado durante o processo inicial de definição da largura de faixa para estabelecer as conexões apropriadas para uma estação assinante. Também é utilizado como parte do processo de autenticação através do qual a estação base e a estação assinante verificam suas identidades reciprocamente.

As conexões são endereçadas através de identificadores de conexão (CID) com 16 bits e podem necessitar de largura de faixa concedida continuamente ou largura de faixa sob demanda. O uso do identificador de conexão (CID) de 16 bits permite um total de 64.000 conexões dentro de cada canal de subida e descida.

Conexões, uma vez estabelecidas, podem requerer manutenção ativa. Os requisitos de manutenção variam conforme o tipo de serviço conectado. Por exemplo, serviços IP podem requerer uma quantidade substancial de manutenção contínua devido à sua natureza por rajadas e também à alta possibilidade de fragmentação. Da mesma forma que o estabelecimento de conexão, conexões modificáveis podem requerer manutenção e também podem ser encerradas por iniciativa da estação assinante ou da estação base. Novas conexões podem ser estabelecidas quando um serviço necessita de alteração.

No caso de redes com topologia Mesh todas as comunicações são no contexto de um enlace que é estabelecido entre dois nós. A qualidade de serviço é provida nos enlaces e pode ser configurada a cada mensagem.

Os parâmetros de serviço associados com cada mensagem devem ser comunicados junto com o conteúdo da mensagem.

Cada nó tem um endereço MAC universal de 48 bits como ocorre no caso PMP. Este endereço é usado no processo de entrada na rede. Após ser autorizado a operar na rede, o nó recebe um identificador de nó (Node ID) de 16 bits. Este identificador é a base de identificação do nó durante as operações.

Para endereçar os nós na vizinhança local, identificadores de enlace (*Link* IDs) de 8 bits são usados. Cada nó atribuirá um identificador para cada enlace que ele estabeleça com seus vizinhos. Os identificadores de enlaces são comunicados durante o processo de estabelecimento do enlace assim que os nós vizinhos estabelecem novos enlaces. O identificador de enlace é atribuído pelo nó transmissor ao enlace para o nó receptor.

- Subcamada SS (Security Sublayer)

Esta subcamada provê autenticação, troca de chave de segurança e criptografia proporcionando privacidade aos assinantes ao longo da rede e proteção aos operadores contra roubo de serviços através de acessos não autorizados.

A privacidade e a proteção são proporcionadas através da criptografia das conexões entre estação base e estação assinante.

A subcamada SS emprega ainda um protocolo de gerenciamento de chave cliente/servidor autenticada na qual a estação base (servidora) controla a distribuição de chaves às estações assinantes (clientes).

Adicionalmente, os mecanismos básicos de privacidade são reforçados através da inclusão de autenticação das estações assinantes. Esta autenticação é baseada em certificados digitais adicionados ao seu protocolo de gerenciamento de chave (*Privacy Key Management – PKM*). Um certificado digital contém a chave pública da estação assinante e seu endereço MAC.

2.5. Camada física para a faixa de 10 a 66 GHz

A especificação de camada física destinada à operação na faixa entre 10 e 66 GHz apresenta um alto grau de flexibilidade para permitir aos provedores de serviços a capacidade de otimizar o desenvolvimento de sistemas nos aspectos de planejamento, custos, características de rádio, serviços e capacidade. Nesta faixa de frequências do padrão a interface aérea é baseada em modulação em portadora única (*Single-Carrier*) e é chamada de interface *WirelessMAN-SC*.

Para permitir flexibilidade no uso do espectro durante a operação são possíveis configurações com duplexação por divisão de frequência (FDD) e duplexação por divisão de tempo (TDD) que são descritas a seguir.

Ambos os casos de duplexação usam formato de transmissão em rajadas cujo mecanismo de formação dos quadros possibilita um perfil adaptativo. Neste perfil adaptativo os parâmetros da transmissão, incluindo os esquemas de modulação e codificação, podem ser ajustados individualmente para cada estação assinante a cada quadro.

No modo FDD os canais dos enlaces de subida e descida ocupam frequências distintas. Os quadros têm duração fixa em ambos enlaces o que facilita o uso de diferentes tipos de modulação e simplifica os algoritmos de alocação de largura de faixa. É possível o uso simultâneo de estações assinantes *full-duplex* e *half-duplex*. Nos casos de estações *half-duplex*, o controlador de largura de faixa não alocará largura de faixa no enlace de subida ao mesmo tempo em que é esperada a recepção de dados no canal do enlace de descida.

No modo TDD as transmissões dos enlaces de subida e descida ocorrem em tempos diferentes e geralmente compartilham a mesma frequência. Um quadro TDD também tem duração fixa e contém um sub-quadro do enlace de subida e um sub-quadro do enlace de descida. Um quadro é dividido em um número inteiro de *slots* físicos que ajudam a partilhar a largura de faixa facilmente. A divisão do quadro é adaptativa, ou seja, a parte do quadro ocupada pelo enlace de subida pode variar em relação à parte ocupada pelo enlace de descida.

2.5.1. Enlace de descida

Os tipos de modulação utilizados no enlace de descida são QPSK, 16-QAM e 64-QAM (opcional). O esquema de modulação multi-nível é usado para maximizar a utilização do enlace aéreo. A constelação da modulação pode ser selecionada para cada assinante com base na qualidade do canal de RF. Se as condições do enlace permitirem, um esquema de modulação mais complexo pode ser utilizado para maximizar a vazão mantendo confiável a transferência de dados. Caso as condições do enlace rádio sofram alguma degradação durante a operação, o sistema pode retornar a um esquema menos complexo de modo a manter a confiabilidade dos dados.

O canal do enlace de descida é TDM. A informação para cada estação assinante é multiplexada em um fluxo único de dados e é recebida por todas as estações assinantes dentro da mesma área. Cada estação assinante processa somente as mensagens destinadas a elas após verificar o endereço de destino nas mensagens recebidas.

As transmissões são feitas em níveis decrescentes de robustez até que se estabeleça a melhor configuração para cada enlace. Por exemplo, com o uso de um tipo de código corretor de erro (*Forward Error Correction – FEC*) simples com parâmetros fixos, os dados começam com modulação QPSK, seguida por modulação 16-QAM, seguida por modulação 64-QAM.

No enlace de descida os bits de dados na camada física da estação base são randomizados, recebem código corretor de erros e são mapeados para uma constelação de sinais QPSK, 16-QAM ou, opcionalmente, 64-QAM.

A randomização é empregada para minimizar a possibilidade de transmissão de uma portadora não modulada e assegurar um número adequado de transições de bits para possibilitar recuperação de relógio.

O esquema empregado para correção de erro (*Forward Error Correction – FEC*) varia conforme a taxa de dados, o tamanho dos blocos de dados e relação sinal-ruído no enlace.

Na camada física da estação assinante ocorre o processo inverso.

2.5.2. Enlace de subida

Os tipos de modulação utilizados no enlace de subida são QPSK, 16-QAM (opcional) e 64-QAM (opcional).

A camada física do enlace de subida é baseada numa combinação de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) e acesso múltiplo atribuído por demanda (DAMA). O canal é dividido em um número de *slots* de tempo. O número de *slots* designados para as diversas funções (registro, disputas, faixa de guarda ou tráfego do usuário) é controlado pela camada de controle de acesso ao meio (MAC) na estação base e pode variar para otimizar o desempenho.

A largura de faixa disponível na direção do enlace de subida é definida em *minislots*. A extensão dos *minislots* é definida como sendo 2^m vezes a quantidade de *slots* físicos, com m variando de 0 a 7.

Uma vez que as estações assinantes não transmitem no canal do enlace de subida enquanto não recebem informações mínimas de configuração enviadas pela estação base, várias configurações diferentes são possíveis e podem ser definidas para cada canal de enlace de subida ou para cada rajada.

No enlace de subida os bits de dados na camada física da estação assinante passam por processo análogo ao que ocorre no enlace de descida na estação base. Os bits de dados são randomizados, recebem código corretor de erros e são mapeados para uma constelação de sinais (QPSK, ou opcionalmente, 16-QAM ou 64-QAM). Na camada física da estação base ocorre o processo inverso.

2.5.3. Taxas de comunicação e larguras de canais

Uma grande quantidade de espectro é disponível na faixa entre 10 e 66 GHz para sistemas ponto-multiponto. Embora os requisitos regulatórios variem nas diferentes regiões do mundo, existem atributos comuns suficientes para uma definição de larguras de canais de RF que atendam a maioria das regiões assegurando a interoperabilidade na *interface* aérea. A Tabela 2.1 apresenta os arranjos de canais de RF especificados pelo IEEE [12].

Tabela 2.1 – Arranjos de canais de RF [12]

| Largura do canal (MHz) | Taxa de símbolos (MBaud) | Taxa de bits (Mbps) QPSK | Taxa de bits (Mbps) 16-QAM | Taxa de bits (Mbps) 64-QAM | Duração recomendada do quadro (ms) | Número de <i>slots</i> físicos por quadro |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|---|
| 20 | 16 | 32 | 64 | 96 | 1 | 4000 |
| 25 | 20 | 40 | 80 | 120 | 1 | 5000 |
| 28 | 22,4 | 44,8 | 89,6 | 134,4 | 1 | 5600 |

Obs.: devido às diferenças nas regulamentações dos diferentes locais, nenhum plano de frequência é apresentado no padrão.

2.5.4. Subsistema de rádio

Algumas funções de controle importantes desempenhadas pelo subsistema de rádio são :

- Sincronização

A camada física necessita prover estimativas precisas de temporização na estação base e flexibilidade para ajustes da temporização na estação assinante. Uma sincronização precisa dos *slots* de tempo no enlace de subida é necessária para assegurar que as transmissões de múltiplos usuários não causem interferência entre si. Esta sincronização é possível através de um procedimento de calibração definido pela camada de controle de acesso ao meio (MAC).

- Controle de frequência

A frequência central das portadoras de RF das estações base e assinante necessita ter uma precisão especificada dentro de certos limites e que seja garantida durante todo o tempo de operação, considerando as variações de temperatura a que o sistema está submetido. A variação da frequência central da portadora da estação base deve estar dentro da faixa de $\pm 8 \times 10^{-6}$ enquanto, no caso da estação assinante, a variação também tem como referência a portadora da estação base e deve estar dentro da faixa de $\pm 1 \times 10^{-6}$ da frequência central.

- Controle de potência

Um algoritmo de controle de potência deve existir no canal do enlace de subida para ajustes de potência iniciais e ajustes periódicos durante a comunicação sem ocorrência de perda de dados. A estação base deve ser capaz de realizar medições precisas da potência do sinal recebido. Este valor é comparado com níveis de referência e eventuais diferenças podem ser informadas às estações assinantes através do envio de mensagens de calibração. O algoritmo de controle de potência deve ser projetado para administrar atenuação da potência causada por distância ou por flutuações de potência em taxas de no máximo 20 dB por segundo com profundidade de pelo menos 40 dB.

2.5.5. Requisitos de desempenho

O padrão define alguns requisitos de desempenho mínimo para sistemas operando na faixa de 24 a 32 GHz com o objetivo de garantir a interoperabilidade das estações assinantes. Para a estação base são apresentadas algumas especificações de desempenho mínimo do seu transmissor. Para a estação assinante são apresentadas especificações de desempenho mínimo de seu transmissor e do seu receptor.

Além destas especificações, o padrão estabelece alguns limites para operação dos transmissores como no caso da potência de saída em que uma estação base não deve produzir uma densidade espectral de potência efetiva irradiada isotropicamente superior a +28,5 dBm/MHz (ou conforme regulamentação local). No caso da estação assinante este valor limite é +39,5 dBm/MHz [12].

Ainda para garantir um desempenho mínimo dos sistemas, o padrão aborda as condições de propagação enfatizando que para a obtenção de serviços de alta qualidade e alta disponibilidade é necessária a existência de visada direta entre estação base e estação assinante. Além disto, as estações assinantes necessitam ter antenas altamente diretivas para minimizar o efeito de multipercursos e a interferência de outras fontes.

2.5.6. Medidas de qualidade do canal

Para avaliação da qualidade do canal são consideradas duas características: o indicador da intensidade do sinal recebido (RSSI) e a relação entre os níveis do sinal e da soma de ruído e interferência ($S/(N+I)$). Estas características facilitam o processo de seleção/atribuição de uma estação base e na seleção do perfil das rajadas. O processo de medição do RSSI não requer a demodulação do sinal possibilitando, desta forma, uma avaliação confiável mesmo em condições de sinais muito fracos. As medições da relação $S/(N+I)$, por outro lado, requerem a demodulação do sinal fornecendo informações sobre as condições reais de operação do receptor referentes a sinal, interferência e ruído.

Como o canal é variante no tempo, as medidas para avaliação da qualidade do canal consideram valor médio e desvio padrão.

Uma estação assinante realiza as medições do RSSI a partir de solicitação feita pela estação base. A medição é realizada durante a transmissão dos preâmbulos no enlace de descida. Os valores da média e do desvio padrão são informados à estação base em unidades de dBm quantizadas com incrementos de 1 dBm e podem estar na faixa entre -40 dBm e -123 dBm. Se o valor medido estiver fora da faixa, o valor informado à estação base será o valor limite da faixa que estiver mais próximo do valor medido.

A medição da relação $S/(N+I)$ também é realizada pela estação assinante a partir de solicitação feita pela estação base e também é realizada durante a transmissão dos preâmbulos no enlace de descida. Os valores da média e do desvio padrão são informados à estação base em unidades de dB quantizadas com incrementos de 1 dB e podem estar na faixa entre o mínimo de -20 dB e o máximo de 40 dB. Da mesma forma que no caso da RSSI, se o valor medido estiver fora da faixa, o valor informado à estação base será o valor limite da faixa que estiver mais próximo do valor medido.

3 Propagação em ambientes abertos na faixa 10-66 GHz

Na faixa de frequências de operação entre 10 e 66 GHz, a existência de visada direta é muito importante para viabilizar a comunicação de sistemas sem fio em ambientes abertos uma vez que quaisquer tipos de obstruções, até mesmo as causadas por vegetação [15, 16] causam degradação no sinal. A desobstrução de pelo menos 58% da 1ª zona de Fresnel, conforme ilustrado pela Figura 3.1, evita a ocorrência de perdas adicionais por difração. Na prática, deve-se buscar fazer com que a maior parte da 1ª zona de Fresnel esteja desobstruída o que pode ser alcançado através da elevação das antenas. [17].

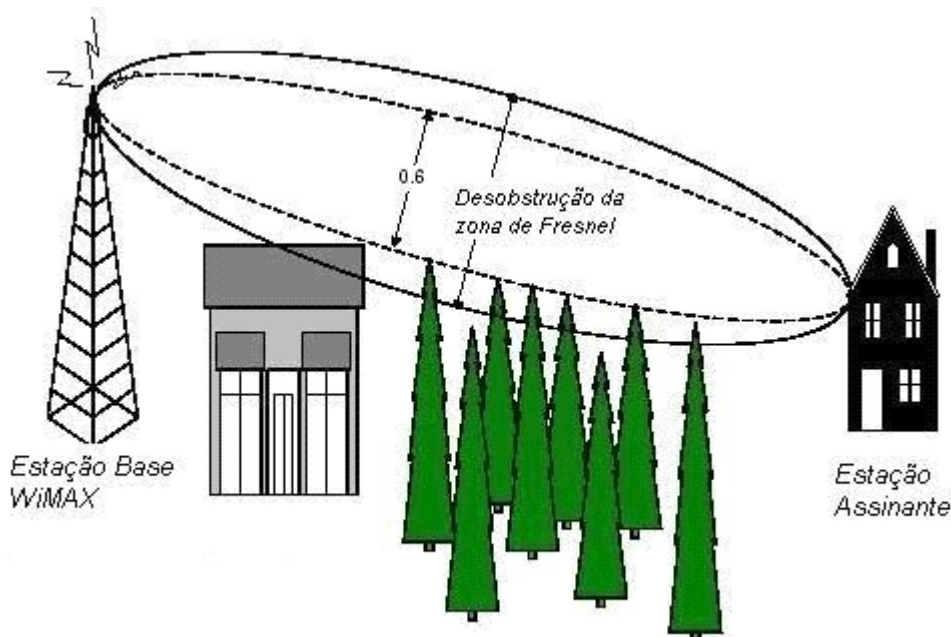


Figura 3.1 – Propagação em visada direta [18].

Mesmo com a existência de visibilidade entre transmissor e receptor, podem existir ondas refletidas (denominadas multipercursos) chegando à antena do receptor. Multipercursos podem causar distorção de fase nos sinais e os multipercursos oriundos de percursos mais longos podem causar distorções na forma dos pulsos devido aos efeitos de dispersão dos componentes de frequência [19].

Os multipercursos devem ter seus efeitos considerados principalmente em situações onde existem superfícies muito lisas presentes no ambiente de propagação como, por exemplo, superfícies de água pois a intensidade das ondas refletidas que chegam ao receptor pode se tornar relevante.

Alguns testes experimentais realizados no estado da Virgínia (EUA) com três enlaces operando na frequência de 38 GHz [20] mostraram a existência de multipercursos durante a ocorrência de chuvas em um dos enlaces em que não havia sinal proveniente de multipercursos chegando ao receptor em condições de céu claro. Foi observado também que a potência dos multipercursos era ainda maior durante chuvas fortes que ocorriam exatamente antes e exatamente depois de ocorrer precipitação de granizo. Este efeito pode ser considerado como tendo sido causado pelas extremidades da célula de chuva de granizo como mostrou outra pesquisa apresentada em [19].

O padrão IEEE 802.16 [12] especifica a necessidade de existência de visada direta entre estações assinantes e estação base de uso de antenas altamente diretivas nas estações assinantes para minimizar o número de multipercursos e de interferências de outras fontes que chegam ao receptor. Sendo assim, neste estudo serão considerados somente os aspectos de propagação envolvidos nos casos em que a 1ª zona de Fresnel está totalmente desobstruída. Não serão consideradas as perdas causadas por vegetação e não serão abordados os efeitos de multipercursos e as perdas por difração.

Uma vez definidas estas premissas, os principais tipos de perdas na propagação durante a operação de sistemas sem fio operando na faixa entre 10 e 66 GHz estão apresentadas a seguir.

Na análise da propagação de ondas eletromagnéticas pelo ar, a primeira perda a ser considerada é a perda de propagação em espaço livre. Neste caso a frequência de operação e a distância entre antena do transmissor e antena do receptor são os fatores diretamente relacionados com tais perdas.

A propagação na atmosfera acima de 10 GHz, entretanto, não envolve somente perdas no espaço livre mas também outros fatores que contribuem para a degradação do sinal: a existência de não-homogeneidades na atmosfera, a presença de gases em atmosfera homogênea, a precipitação de chuvas, a existência de nevoeiro e partículas em suspensão na atmosfera [21]. Estes fatores causam atenuação por absorção e espalhamento.

No caso das chuvas, a absorção acontece pela dissipação da energia da onda incidente na gota. O espalhamento é provocado pelas modificações da onda para satisfazer às condições de contorno em cada gota, não havendo perda de energia [22].

As chuvas também podem causar uma redução na discriminação de polarização cruzada segundo indica a recomendação ITU-R P.530-10 [23]. Este assunto será analisado na seção 3.3.

Variações do índice de refração da atmosfera ao longo do enlace também contribuem para a degradação do sinal podendo causar atenuação por variação no ângulo de chegada e partida das ondas eletromagnéticas. Variações abruptas do índice de refração causam desvanecimento devido a espalhamento do feixe das ondas transmitidas (efeito que também é conhecido como desfocalização) [23].

3.1. Perdas na propagação

Dentre todos os fatores mencionados como causadores de perdas na propagação das ondas eletromagnéticas em ambientes abertos, este estudo irá se concentrar nos fatores mais comuns e mais importantes: chuvas, gases atmosféricos e vapor de água e variação do ângulo de partida/chegada. O estudo destes fatores é baseado na recomendação ITU-R P.530 [23]. Não serão abordados neste estudo os efeitos de precipitação de neve e granizo cuja influência é estudada na recomendação ITU-R P.840 [24].

3.1.1. Atenuação por gases atmosféricos e vapor de água

Em frequências superiores a 10 GHz ocorre atenuação do sinal devido à absorção por oxigênio e vapor de água. A atenuação é diretamente proporcional à distância do enlace e pode ser calculada através da Equação 3.1.

$$A_{gv} (dB) = \gamma_{gv} \cdot d \quad (3.1)$$

Onde d é a distância do enlace em quilômetros

γ_{gv} é a atenuação específica por quilômetro (dB/km) obtida a partir da recomendação ITU-R P.676 [25]

A Figura 3.2 apresenta um gráfico do valor da atenuação específica em função da frequência de operação. Neste gráfico podemos observar que a atenuação específica total é a soma da atenuação específica causada por vapor de água com a atenuação específica por gases atmosféricos em situação de céu claro.

Na faixa de frequências sob análise o vapor de água tem a maior influência em frequências próximas a 22 GHz enquanto moléculas de oxigênio causam grande atenuação em frequências entre 58 e 62 GHz.

Os efeitos de atenuação por gases atmosféricos e vapor de água, entretanto, são consideravelmente inferiores aos efeitos de atenuação por chuvas que serão analisados na próxima sub-seção deste estudo.

3.1.2. Atenuação por chuva

Na faixa entre 10 e 66 GHz o mecanismo predominante de desvanecimento é proveniente da atenuação por chuvas.

A intensidade do desvanecimento depende de diferentes fatores. Um deles é a intensidade da chuva que varia conforme o clima da região geográfica onde o enlace está localizado.

As estatísticas de incidência de chuvas na região geográfica do enlace possibilitam estimar a probabilidade de que uma determinada taxa de precipitação seja excedida na região e, conseqüentemente, a distribuição de probabilidades de atenuação por chuvas. A partir destas estatísticas é possível estabelecer para um sistema ponto-multiponto o máximo raio de célula que viabiliza a operação apropriada do sistema dado um requisito de disponibilidade do enlace e um conjunto de características dos equipamentos de transmissão. Um exemplo apresentado em [12] mostra que parâmetros típicos de equipamentos operando em 28 GHz resultam num raio máximo de célula de aproximadamente 3,5 km para uma região com taxa de chuvas de 42 mm/h que pode ser excedida em 0,01% do tempo.

Outros fatores que influem na intensidade do desvanecimento são: frequência de operação, distância do enlace e tipo de polarização utilizada.

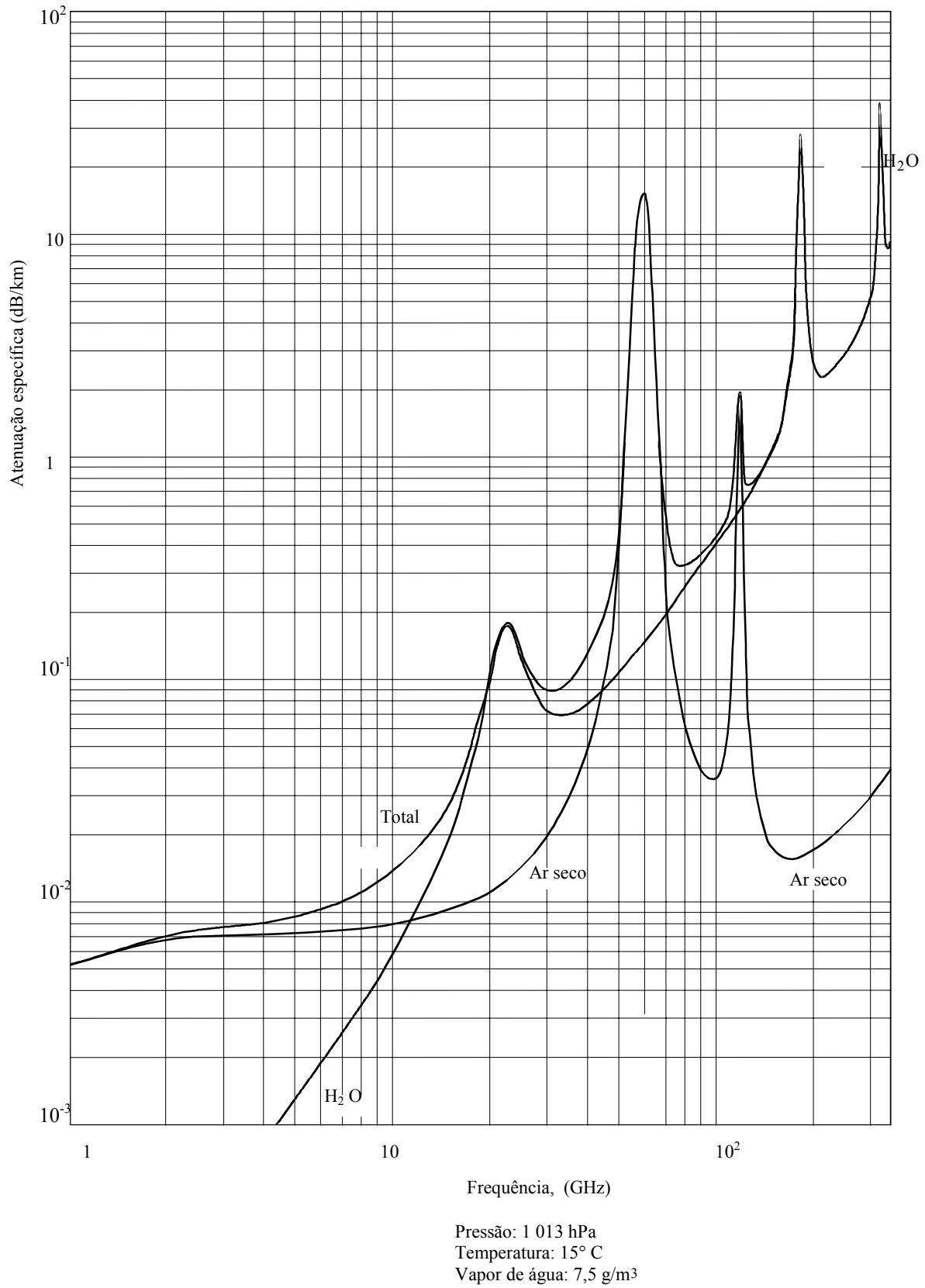


Figura 3.2 - Atenuação específica por gases atmosféricos e vapor de água [25].

A influência do tipo de polarização se deve ao fato de que as gotas de chuvas apresentam durante a queda o formato de um esferóide oblato devido à resistência do ar, podendo sofrer também uma rotação devido à ação dos ventos. A orientação do eixo maior na seção reta da gota é mais próxima da horizontal e, por isto, uma onda eletromagnética com polarização linear horizontal sofre uma atenuação maior que uma onda com polarização linear vertical [22].

Testes realizados em Cingapura em um enlace ponto-a-ponto operando na frequência de 26 GHz com distância de 3,8 km [26] mostraram que a diferença entre a atenuação de uma onda com polarização horizontal e a atenuação de outra com polarização vertical na mesma frequência é diretamente proporcional à taxa de precipitação conforme mostra o gráfico da Figura 3.3.

É possível observar também na Figura 3.3 que existe uma diferença de 3 dB de atenuação entre os 2 tipos de polarização em situações de chuvas cujas taxas sejam de 90 mm/h e quase 6 dB para taxas de 150 mm/h.

Na faixa de frequência de 10 a 40 GHz também foi mostrado em [27] através de testes experimentais realizados para uma das regiões mapeadas pelo ITU em [28] que a diferença de atenuação entre polarização horizontal e vertical é diretamente proporcional à frequência de operação.

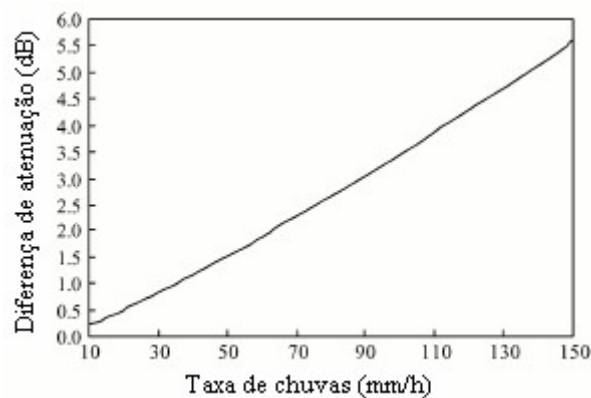


Figura 3.3 - Diferença de atenuação entre polarização horizontal e vertical [26]

Para estimar as estatísticas de atenuação em larga escala causada por chuvas em enlaces ponto-a-ponto existem diversos métodos empíricos e semi-empíricos entre os quais podemos citar os métodos ITU [23], CETUC-98 [29], Pérez-Mello [30], Crane [31] e Fedi [32].

Para regiões tropicais e equatoriais, entretanto, é necessário algum cuidado na aplicação dos métodos ITU [23], Crane [31] e Fedi [32] pois eles foram elaborados com base em resultados obtidos em testes experimentais realizados no hemisfério norte onde prevalece o clima temperado. A aplicação de tais métodos em regiões tropicais e equatoriais pode levar a valores subestimados de atenuação por chuva conforme mostram testes experimentais realizados com enlaces de 15 e 18 GHz na cidade de São Paulo [33]. Testes experimentais realizados no estado da Virgínia (EUA) com enlaces de 38 GHz também apresentaram resultados de atenuação superiores aos valores estimados pelo método Crane [20].

A seguir estão apresentados o método do ITU que é internacionalmente aceito e o método Pérez-Mello que foi desenvolvido a partir de medidas realizadas no Brasil.

Método ITU [23]

As estatísticas de atenuação em larga escala causada por chuvas podem ser estimadas a partir dos seguintes passos :

1 - obter o valor da taxa de chuvas ($R_{0,01}$) excedida em 0,01 % do tempo na região de interesse.

O valor de $R_{0,01}$ é medido em mm/h e deve ser obtido a partir de dados de incidência de chuva na região do enlace considerando tempo de integração igual a 1 minuto. Caso tais dados não sejam disponíveis, é possível obter os valores em mapas de unidades climáticas apresentados na recomendação ITU-R P.837 [28].

2 - calcular a atenuação específica γ_R (dB/km) para a taxa de chuvas obtida e para a frequência e o tipo de polarização através da Equação 3.2 [34].

$$\gamma_R = k \cdot R^\alpha \quad (3.2)$$

Onde k e α são coeficientes que dependem da frequência e da polarização utilizada e podem ser obtidos através das Equações 3.3 e 3.4.

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2 \quad (3.3)$$

$$a = [k_H a_H + k_V a_V + (k_H a_H - k_V a_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k \quad (3.4)$$

Onde θ é o ângulo de elevação do enlace

τ é o ângulo *tilt* de polarização em relação à horizontal

k_H , k_V , α_H e α_V são obtidos através de equações apresentadas em [34] a partir das quais são obtidos os dados da Tabela 3.1 conforme o tipo de polarização linear utilizada (horizontal ou vertical)

As Equações 3.3 e 3.4 também podem ser utilizadas para polarização circular. Neste caso o valor do ângulo τ utilizado é 45°.

Para frequências com valores intermediários aos valores apresentados na Tabela 3.1 é possível fazer um processo de interpolação para obter os valores dos coeficientes.

3 - calcular o comprimento efetivo do percurso do enlace d_{eff} .

A distância efetiva do enlace é um parâmetro utilizado nos cálculos para considerar o fato de que as chuvas ocorrem em regiões delimitadas (denominadas células de chuva) e não estão presentes em todo o percurso do enlace. O cálculo é feito através da Equação 3.5.

$$d_{eff} = d \cdot r \quad (3.5)$$

Onde d é a distância do enlace

r é um fator de encurtamento da distância e pode ser calculado através da Equação 3.6.

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0} \quad (3.6)$$

Onde d é a distância do enlace em quilômetros

d_0 é calculado através da Equação 3.7 se a taxa de chuvas $R_{0.01}$ for menor ou igual a 100 mm/h.

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0,015 R_{0,01}} \tag{3.7}$$

Se $R_{0,01} > 100$ mm/h, o valor 100 mm/h deve ser usado para a taxa de chuvas $R_{0,01}$. Neste caso, $d_0 = 7,8$ km.

Tabela 3.1 – Coeficientes para cálculo da atenuação específica na faixa de frequências em estudo [34]

| Frequência (GHz) | k_H | k_V | α_H | α_V |
|------------------|---------|---------|------------|------------|
| 10 | 0,01217 | 0,01129 | 1,2571 | 1,2156 |
| 12 | 0,02386 | 0,02455 | 1,1825 | 1,1216 |
| 15 | 0,04481 | 0,05008 | 1,1233 | 1,0440 |
| 20 | 0,09164 | 0,09611 | 1,0568 | 0,9847 |
| 25 | 0,1571 | 0,1533 | 0,9991 | 0,9491 |
| 30 | 0,2403 | 0,2291 | 0,9485 | 0,9129 |
| 35 | 0,3374 | 0,3224 | 0,9047 | 0,8761 |
| 40 | 0,4431 | 0,4274 | 0,8673 | 0,8421 |
| 45 | 0,5521 | 0,5375 | 0,8355 | 0,8123 |
| 50 | 0,6600 | 0,6472 | 0,8084 | 0,7871 |
| 60 | 0,8606 | 0,8515 | 0,7656 | 0,7486 |
| 66 | 0,9670 | 0,9598 | 0,7458 | 0,7313 |

4 – calcular através da Equação 3.8 a atenuação em dB no enlace $A_{0,01}$ que é excedida em 0,01% do tempo.

$$A_{0,01}(db) = \gamma_R \cdot d_{eff} \tag{3.8}$$

5 – para enlaces localizados em latitudes iguais ou superiores a 30° (norte ou sul), a atenuação excedida para outros percentuais de tempo p entre 0,001% e 1% pode ser estimada através da Equação 3.9.

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0.12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \tag{3.9}$$

Para enlaces localizados em latitudes inferiores a 30° (norte ou sul), a Equação 3.10 é usada na estimativa da atenuação [23].

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0.07 p^{-(0.855 + 0.139 \log p)} \quad (3.10)$$

Este procedimento de estimativa da atenuação por chuvas que é recomendado pelo ITU é válido em todas as partes do mundo, pelo menos para frequências até 40 GHz e distâncias até 60 km [23].

Método Pérez-Mello [30]

Analogamente ao método ITU, a atenuação por chuvas é diretamente proporcional à atenuação específica por quilômetro e à distância efetiva do enlace mas no método Pérez-Mello estes parâmetros são determinados para qualquer percentual de tempo p enquanto o método ITU faz a estimativa para um percentual de tempo de 0,01% e utiliza um fator para extrapolar o valor da atenuação para outros percentuais de tempo.

As etapas do cálculo são apresentadas a seguir.

A atenuação total excedida durante um determinado percentual de tempo p é dada pela expressão apresentada na Equação 3.11.

$$A_p (db) = \gamma_{R_p} \cdot d_{eff} \quad (3.11)$$

Onde γ_{R_p} é a atenuação específica (dB/km) e é obtida pela expressão da Equação 3.12

d_{eff} é a distância efetiva (km) e é obtida pela expressão da Equação 3.13.

$$\gamma_{R_p} = k \cdot R_p^\alpha \quad (3.12)$$

Onde k e α são parâmetros relacionados com a frequência de operação e com o tipo de polarização utilizado. Estes parâmetros são obtidos através da recomendação ITU-R 838 [34].

$$d_{eff} = d \cdot r_p \quad (3.13)$$

Onde d é a distância em km do enlace

r_p é calculado pela expressão da Equação 3.14.

$$r_p = 3,445 \cdot d^{-0,164} \cdot R_p^b \quad (3.14)$$

Onde R_p é a taxa de chuvas na região do enlace para um determinado percentual de tempo p

b é calculado pela expressão apresentada na Equação 3.15.

$$b = -0,369 + \frac{0,115}{d} \quad (3.15)$$

Portanto, reescrevendo a Equação 3.11, temos o valor da atenuação total excedida durante um determinado percentual de tempo p :

$$A_p = 3,445 \cdot k \cdot R_p^{(\alpha - 0,369 + \frac{0,115}{d})} \cdot d^{0,836} \quad (3.16)$$

3.1.3. Atenuação diferencial

Conforme apresentado na sub-seção 3.1.2, existem diversos métodos para previsão de atenuação por chuvas em enlaces terrestres. Estes métodos, entretanto, são aplicados a enlaces ponto-a-ponto. Nos casos de enlaces ponto-multiponto, considerações adicionais são necessárias. A distribuição espacial da chuva não é uniforme e, portanto, os sinais dos enlaces convergentes que formam um sistema ponto-multiponto podem ser submetidos a atenuações de diferentes intensidades mesmo que tais enlaces tenham a mesma distância. Isto ocorre em situações em que a precipitação da chuva está localizada no percurso de apenas um dos enlaces.

A diferença entre os valores de atenuação a que são submetidos dois enlaces convergentes é definida como atenuação diferencial.

O fato das chuvas serem distribuídas espacialmente de maneira não uniforme tem grande importância no planejamento de sistemas fixos de acesso sem fio que utilizam topologia ponto-multiponto. Nestes sistemas a área de abrangência do sistema é dividida em áreas menores denominadas células e em cada célula a cobertura é provida por uma estação rádio-base. Conforme será estudado no Capítulo 4, para possibilitar um aumento da capacidade dos sistemas, as mesmas frequências são utilizadas em diferentes células. Devido a este fato, o enlace entre a estação base de uma determinada célula e uma estação assinante localizada dentro da mesma célula forma um enlace convergente com um sinal interferente recebido pela mesma estação base e que foi transmitido por uma estação assinante de outra célula que utiliza a mesma frequência.

Na maioria dos eventos de chuva ocorrerá uma melhora na relação sinal-interferência (S/I) do enlace desejado na estação base uma vez que o percurso do sinal desejado é normalmente menor que o percurso dos sinais interferentes sendo, portanto, sujeito a menos atenuação. Durante pequenos percentuais de tempo, entretanto, poderá ocorrer a degradação da relação sinal-interferência devido a eventos de chuvas localizados apenas no percurso do sinal desejado, conforme ilustrado na Figura 3.4. Neste caso, dependendo da intensidade da chuva, o sinal desejado pode ser submetido a atenuações maiores que os sinais interferentes podendo levar à indisponibilidade do enlace desejado.

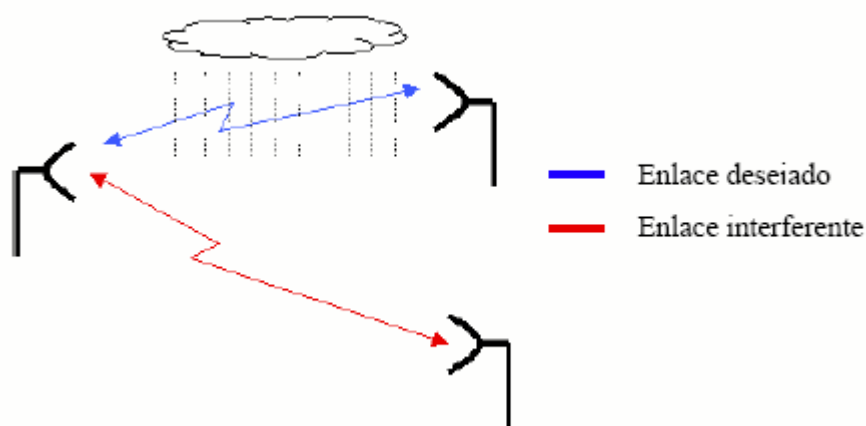


Figura 3.4 – Situação de atenuação diferencial por chuvas [22].

Se a atenuação diferencial for alta, a discriminação das antenas pode também ser insuficiente para recepção apropriada quando diferentes polarizações

são utilizadas em setores vizinhos [35] pois o sinal desejado pode sofrer uma atenuação tão significativa que um sinal interferente, mesmo usando outra polarização, acaba sendo recebido pela antena.

Uma previsão precisa da atenuação diferencial, portanto, é fundamental para prevenir ou minimizar os efeitos das interferências durante a ocorrência de chuvas em regiões cobertas por sistemas rádio ponto-multiponto.

Um modelo empírico de previsão de atenuação diferencial foi proposto a partir de testes experimentais em enlaces localizados em duas cidades no Brasil em frequências de 15, 18, 23 e 38 GHz [23, 35].

A expressão obtida para a previsão da distribuição de probabilidade cumulativa de atenuação diferencial para dois enlaces A e B está apresentada na Equação 3.17.

$$A_{AB}(p) = [A_A(p) - 0,34 A_B(p)] \cdot (2,65 \cdot |\theta|^{0,23} + 0,004 \cdot |\Delta d|^{2,25}) \cdot f^{-0,4} \quad (3.17)$$

Onde θ (rad) é o ângulo entre os enlaces

Δd (km) é a diferença entre as distâncias dos enlaces

f (GHz) é a frequência

A_A e A_B são, respectivamente, as atenuações dos enlaces A e B excedidas durante o percentual de tempo p .

Outros modelos de previsão de atenuação diferencial foram propostos em [36] e [37].

3.1.4.

Varição nos ângulos de partida e chegada das ondas

Variações anormais no índice de refração da atmosfera ao longo do enlace podem causar variação nos ângulos de partida e chegada das ondas transmitidas e recebidas. Esta variação é independente da frequência e ocorre no plano vertical das antenas. A faixa de variação dos ângulos é maior em regiões costeiras úmidas do que em regiões mais interiores e secas mas nenhuma variação significativa é observada durante condições de ocorrência de chuvas [23].

Este efeito é particularmente importante em enlaces com antenas de alto ganho e feixe estreito (que são as antenas especificadas pelo padrão IEEE 802.16

para uso nas estações assinantes) pois podem ocorrer desvanecimentos quando ocorrerem variações nos ângulos.

Sendo assim, nos enlaces em que as estações assinantes estiverem localizadas nas regiões onde a variação do índice de refração da atmosfera é mais acentuada é importante verificar o alinhamento das antenas frequentemente.

3.1.5. Desvanecimentos por outros mecanismos

Alguns mecanismos de desvanecimento causados por camadas muito refrativas da atmosfera podem ser considerados no planejamento dos enlaces em condições de céu claro: espalhamento de feixe (desfocalização), multipercurso de superfície e multipercurso atmosférico. Estes mecanismos podem ocorrer isoladamente ou combinados entre si.

Desvanecimento por cintilação devido a irregularidades em menor escala na atmosfera está sempre presente em conjunto com estes mecanismos e deve ser considerado nos casos de frequências superiores a 40 GHz [23].

Os efeitos destes desvanecimentos são analisados na recomendação ITU-R P.530 [23] e podem ser incluídos no planejamento dos enlaces. Conforme esta recomendação do ITU é possível calcular o percentual de tempo em que um desvanecimento excederá um valor pré-determinado no mês de pior média.

3.2. Cálculo da atenuação total na propagação

Considerando os principais fatores causadores de perdas considerados neste estudo, a atenuação total em um enlace na faixa de frequências entre 10 e 66 GHz é a soma da atenuação em espaço livre com as atenuações por chuvas e por gases atmosféricos e vapor de água podendo ser estimada através da expressão da Equação 3.18.

$$A_{total}(dB) = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d + A_{gv} + A_{ch} \quad (3.18)$$

Onde d (km) é a distância do enlace

f (GHz) é frequência de operação

A_{gv} (dB) é a atenuação causada por gases atmosféricos e vapor de água

A_{ch} (dB) é a atenuação causada por chuvas

3.3.

Redução na discriminação da polarização cruzada (XPD)

Conforme foi apresentado na sub-seção 3.1.2, as gotas de chuvas apresentam o formato de um esferóide oblato durante a queda devido à resistência do ar e podem sofrer uma rotação devido à ação dos ventos. Por causa desta assimetria, os componentes horizontais e verticais das ondas eletromagnéticas propagadas podem sofrer diferentes atenuações resultando em rotação da polarização ou despolarização.

A redução da discriminação da polarização cruzada (*Cross-Polarization Discrimination* – XPD) pode levar à ocorrência de interferências co-canal ou, menos frequentemente, interferência de canal adjacente e pode ocorrer em situações de céu claro ou de chuva [23].

Nas situações de céu claro a redução da discriminação está relacionada com os multipercursos que não estão considerados neste estudo.

As estatísticas de despolarização das ondas eletromagnéticas durante a ocorrência de chuvas podem ser estimadas através de método proposto em [38].

Testes realizados no Rio de Janeiro com um enlace ponto-a-ponto na frequência de 28 GHz e distância de 2,98 km mostraram, entretanto, que os valores de discriminação de polarização cruzada (XPD) apresentaram poucas variações durante todo o período de medidas, mesmo durante a ocorrência de chuva no percurso de propagação. Ainda que não tenham ocorrido condições extremas de chuvas, os resultados indicam que para enlaces curtos a despolarização não deve afetar significativamente o desempenho do sistema [39].

4

Aspectos Técnicos para o Planejamento

A propagação de ondas eletromagnéticas em frequências acima de 10 GHz é sujeita a algumas influências específicas que resultam em degradação dos sinais, conforme foi abordado no Capítulo 3. Devido a isto, a distância alcançada pelo sinal de estações de rádio operando em frequências acima de 10 GHz é de poucos quilômetros. Um sistema fixo de acesso sem fio em banda larga operando em uma frequência nesta faixa com topologia ponto-multiponto tem, portanto, sua cobertura restrita a uma região limitada.

Para ampliar a área de cobertura os sistemas utilizam uma configuração celular onde cada célula corresponde a uma região geográfica limitada e possui uma estação rádio-base que se comunica com diversas estações de usuários localizados dentro da região. Além disto, os sistemas implementam o reuso de frequências que consiste na utilização de todos os canais do espectro disponível de frequências uma ou mais vezes dentro de cada uma das células.

O reuso de frequências, além de permitir um aumento da área de cobertura, possibilita o aumento da capacidade dos sistemas mas cria um potencial significativo para ocorrência de interferência co-canal, uma vez que áreas adjacentes poderão utilizar os mesmos canais de frequências. Sendo assim, a implementação destes sistemas requer um planejamento cuidadoso.

O planejamento de sistemas fixos de acesso sem fio operando em ambientes abertos inclui a especificação da área onde os serviços estarão disponíveis, a quantidade de usuários que serão atendidos, a capacidade de tráfego e de taxas de comunicação dos usuários e os requisitos de disponibilidade.

O planejamento deve ser feito para atender a uma demanda inicial de serviços com uma quantidade mínima de equipamentos mas deve incluir uma a previsão de alterações que permitam o incremento da capacidade do sistema à medida que a demanda aumentar. Este aumento de capacidade pode ser em termos de número de assinantes, taxas de comunicação e cobertura geográfica. É recomendável, portanto, que o planejamento seja feito de maneira que o sistema

seja escalável para possibilitar economia em uma eventual expansão do mesmo e causar o mínimo de interrupção na disponibilidade do serviço durante a implementação das alterações [40].

Para atingir as características desejadas para o sistema é necessário levar em consideração os fatores que causam degradação dos sinais e prever as perdas que ocorrerão na propagação conforme apresentado no Capítulo 3.

As características dos equipamentos e antenas também são fatores necessários para o planejamento. O padrão IEEE 802.16 apresenta requisitos que devem ser atendidos pelos fabricantes de equipamentos e antenas para utilização nesta tecnologia.

Os tipos de polarização a serem utilizados também são importantes uma vez que a atenuação por chuvas influi de maneira diferente em cada tipo, conforme foi abordado no Capítulo 3.

Além destes itens, as interferências e as ações para minimizá-las também fazem parte do planejamento pois são fatores limitantes do desempenho de um sistema de comunicação sem fio.

A abordagem de todos os aspectos envolvidos no processo de planejamento será feita neste Capítulo.

4.1. Cobertura

Um sistema fixo de acesso sem fio operando em ambiente aberto na faixa de 10 a 66 GHz tem sua área de cobertura dependente da existência de visada direta nos enlaces entre as estações assinantes e a estação base de cada célula.

A condição de visada direta consiste na desobstrução de pelo menos 58% da 1ª zona de Fresnel e faz com que a topografia da região de operação, incluindo as características da vegetação e das edificações existentes, seja um fator de grande importância no planejamento da área de cobertura do sistema. A análise desta condição também deve considerar que a vegetação no percurso do enlace pode não impedir a visada direta na época da implantação do sistema mas a vegetação poderá crescer e bloquear o sinal no futuro. A atenuação devido a apenas uma árvore é bastante variável e depende de fatores como espécie da árvore, época do ano e se a árvore está seca ou molhada [15] podendo atingir 30 dB [41].

Consideração análoga deve ser feita em relação à possível construção de edificações após o enlace estar implantado.

Outro fator de grande importância na definição da área de cobertura é a atenuação por chuvas. As estatísticas de incidência e intensidade de chuvas na região de operação do sistema deverão ser consideradas na previsão da área de cobertura para que possa ser garantido um dado requisito de disponibilidade do sistema.

A condição de visada direta em conjunto com a atenuação por chuvas que é relevante para frequências acima de 10 GHz torna a área de cobertura de cada estação base de sistemas baseados no padrão IEEE 802.16 muito menor que a área de cobertura de uma estação base de um sistema de telefonia celular, por exemplo. As células de sistemas que usam a tecnologia IEEE 802.16 na faixa de 10 a 66 GHz têm raio da ordem de poucos quilômetros [12]. Além de menor, a área de cobertura está sujeita a ter “buracos” que são regiões onde o sinal direto não chega por causa da obstrução por edifícios e vegetação [42]. Em sistemas operando na frequência de 28 GHz, por exemplo, o percentual de área geográfica com cobertura em ambientes suburbanos pode variar de 50% ou menos até o máximo de 100% dependendo de fatores como tamanho da célula, altura das antenas e densidade de vegetação e de edifícios na área de interesse [41]. Uma cobertura menor pode ocorrer em ambientes suburbanos porque neste tipo de região as árvores geralmente são mais altas que a maioria das edificações e bloqueiam enlaces cujas antenas das estações assinantes estejam instaladas no telhado das edificações [15].

A existência de “buracos” na cobertura de uma área geográfica pode fazer com que as células sejam planejadas de maneira que exista uma sobreposição geográfica entre elas fazendo com que “buracos” de uma célula possam ser cobertos por estações base de outras células [42].

A determinação do raio das células depende do desempenho requerido para o sistema, das características dos equipamentos a serem utilizados e das condições de propagação da região onde o sistema irá operar [22] entre as quais destacam-se a existência de visada direta, a atenuação por chuvas e o nível de interferência a que as estações estarão sujeitas. A abordagem das interferências será feita na seção 4.2 deste estudo e a determinação do raio das células será apresentada no Capítulo 5.

O planejamento da cobertura é auxiliado pelo uso de programas que fazem a simulação da propagação no ambiente desejado, desde que haja uma caracterização detalhada do ambiente.

4.1.1.

Previsão da área não sujeita a obstrução por edificações

O ITU apresenta na recomendação ITU-R P.1410 [43] um método para estimar o percentual da área da célula que atende ao requisito de existência de visada direta. Esta estimativa é feita a partir da probabilidade de bloqueio dos enlaces por edificações.

A probabilidade de bloqueio por edificações pode ser calculada de maneira precisa através da técnica de traçado de raios usando dados detalhados da topografia e das edificações da região de interesse, mas estes dados nem sempre são disponíveis. Por isto, o ITU sugere um modelo estatístico como alternativa para estimar a probabilidade de bloqueio.

O modelo ITU é de utilidade pois permite que a cobertura seja estimada a partir de apenas três parâmetros que são: a proporção de área coberta por edificações em relação à área total da célula (α), o número médio de edificações por unidade de área (β) expresso em edificações/km² e a distribuição de alturas das edificações representada pela variável γ .

A partir destes parâmetros, um algoritmo de cálculo é proposto pelo ITU e está apresentado a seguir.

1 – O número esperado de edificações b_l existente na linha de percurso do raio a cada quilômetro entre a estação transmissora e a estação receptora é calculado pela seguinte expressão :

$$b_l = \sqrt{\alpha \beta} \quad (4.1)$$

Sendo assim, para um percurso de comprimento r_{rx} (km), o número total de edificações no percurso b_r é calculado pela Equação 4.2, desprezando-se a casas decimais, caso existam :

$$b_r = r_{rx} \cdot b_l \quad (4.2)$$

2 – As edificações são consideradas espaçadas igualmente entre a estação transmissora e a receptora conforme ilustra a Figura 4.1 e a distância das edificações d_i até a estação transmissora é dada por :

$$d_i = (i + 1/2) \delta_r \quad i \in \{0, 1, \dots, (b_r - 1)\} \quad (4.3)$$

Onde $\delta_r = r_{rx}/b_r$ é a separação entre as edificações conforme ilustrado na Figura 4.1

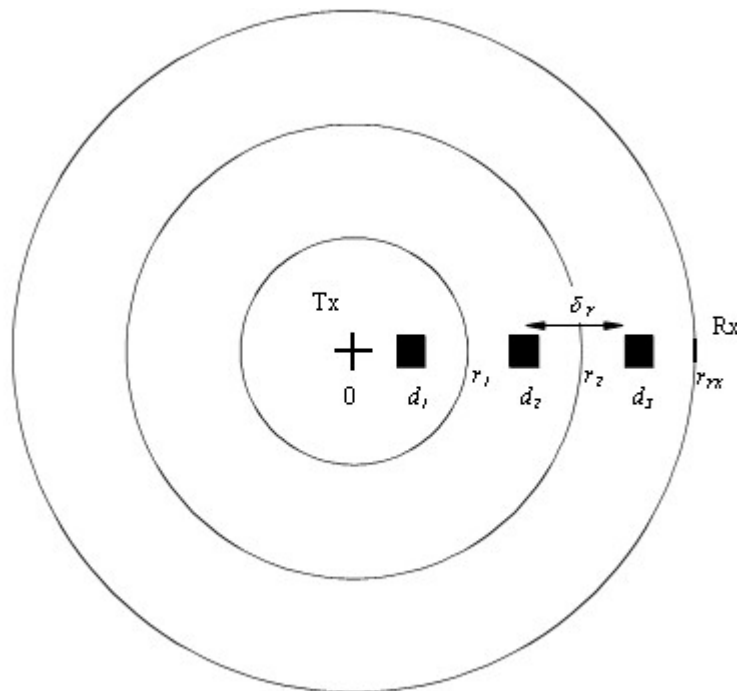


Figura 4.1 – Ilustração da localização das edificações entre as estações transmissora e receptora [43]

3 – A cada distância d_i , a altura h_i de uma edificação que obstruiria o raio direto entre transmissor e receptor é calculada pela expressão :

$$h_i = h_{tx} - \frac{d_i (h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (4.4)$$

Onde h_{tx} é a altura acima do solo da antena transmissora

h_{rx} é a altura acima do solo da antena receptora

r_{rx} é a distância entre as antenas transmissora e receptora

d_i é a distância entre a antena transmissora e a edificação.

A Figura 4.2 ilustra estes parâmetros.

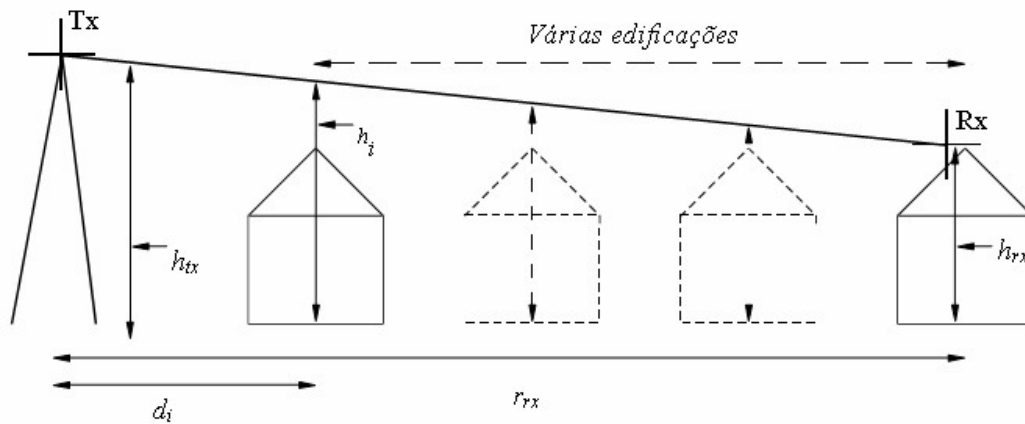


Figura 4.2 – Ilustração das distâncias envolvidas na determinação da condição de desobstrução entre as estações transmissora e receptora [43]

4 – A probabilidade P_i de que uma edificação seja menor que a altura h_i é dada por :

$$P_i = \int_0^{h_i} P(h) dh = 1 - e^{-h_i^2 / 2\gamma^2} \quad (4.5)$$

5 – A probabilidade $P_{los,i}$ de que exista visada direta a uma distância d_i é dada por:

$$P_{los,i} = \prod_{j=0}^i P_j \quad j \in \{0, \dots, i\} \quad (4.6)$$

6 – A cobertura cumulativa é obtida ponderando cada valor de $P_{los,i}$ com um peso determinado por W_i que depende da distância do transmissor. Isto irá contabilizar o número de edificações dentro de um anel.

7 – Somando as probabilidades ponderadas e normalizando pela área do anel cumulativa multiplicada pela densidade de edificações teremos a cobertura para uma célula de raio r_{rx} :

$$CP_{rx} = \frac{\sum_{i=0}^{b_y-1} P_{los,i} W_i}{b_y^2} \quad (4.7)$$

Este método, entretanto, tem algumas limitações [43]:

- nenhuma variação na topografia é levada em consideração o que pode ser aperfeiçoado combinando os valores estatísticos usados com um banco de dados detalhado do terreno do enlace;
- geralmente a densidade e a altura das edificações variam bastante o que faz com que a predição em uma direção seja diferente da predição em outra direção. Isto pode ser melhorado através da subdivisão da região de interesse em regiões menores com conjuntos de parâmetros específicos; e
- as antenas das estações assinantes não são instaladas na mesma altura conforme o método considerou. Uma alternativa é variar as alturas das antenas das estações assinantes conforme a distribuição de alturas das edificações.

4.1.2. Efeitos das chuvas na cobertura

Uma vez atendida a condição de existência de visada direta, o nível de sinal recebido por uma estação pode ser estimado pela expressão apresentada na Equação 4.8.

$$P_{RX} (dB) = P_{TX} + G_T + G_R - A_{total} \quad (4.8)$$

Onde P_{TX} é a potência da estação transmissora (dBm)

G_T e G_R são os ganhos das antenas das estações transmissoras e receptoras, respectivamente (dB)

A_{total} é a atenuação total que considera espaço livre, chuvas, gases atmosféricos e vapor de água e é calculada conforme Equação 3.18 (dB)

A análise dos aspectos de propagação apresentados no Capítulo 3 e das Equações 3.18 e 4.8 permitem verificar que, além das características dos equipamentos utilizados como potência transmitida e ganhos das antenas, os

fatores que influenciam o nível do sinal recebido são a distância entre as estações, a frequência de operação e a taxa de chuvas da região de operação. Sendo assim, o raio da célula e, conseqüentemente, a área de cobertura de uma estação base dependerão fortemente das características do clima da região de operação. A atenuação por chuvas é alta em frequências acima de 10 GHz o que faz com que as células tenham raios de poucos quilômetros. Como a atenuação por chuvas, assim como a atenuação em espaço livre, cresce com a frequência de operação, quanto maior a frequência de operação menor será a área coberta.

A área de cobertura considerando a influência das chuvas pode ser prevista mas, para esta previsão ser mais precisa, é necessário considerar que as chuvas são não-uniformes em duas dimensões horizontalmente.

O método para previsão de atenuação por chuvas apresentado na recomendação ITU-R P.530 [23] e o método Pérez-Mello [30] consideram que enlaces de mesmas distâncias sofrem as mesmas atenuações o que não corresponde à realidade em situações ponto-área por causa da não-uniformidade das chuvas na área de interesse. Estes métodos, portanto, não podem ser utilizados diretamente na previsão do percentual de área da célula com cobertura.

A não-uniformidade das chuvas em duas dimensões horizontalmente pode ser levada em consideração através da aplicação de uma distribuição de taxas médias de chuvas para a área sob investigação ao invés de considerar apenas o percurso de um enlace [43].

O ITU apresenta um método de cálculo de previsão de área de cobertura na recomendação ITU-R 1410 [43] que foi desenvolvido baseado em medidas de precipitação realizadas por radares no Reino Unido. O método considera uma célula com geometria circular e raio L , conforme ilustrado na Figura 4.3, com uma estação base situada em seu centro e uma área circular delimitada pelo raio d_0 onde existe cobertura durante a ocorrência de chuvas para um determinado percentual de tempo.

O problema deste método é que ele introduz no cálculo o parâmetro R_{area} que é um valor normalizado da taxa pontual de chuvas para a área sob investigação considerando apenas células com dois raios diferentes (2,5 km e 5 km) e não apresenta o modo de calcular este parâmetro [44]. A recomendação apresenta apenas alguns valores específicos para a região do Reino Unido e, ainda assim, estes valores são específicos para 7 percentuais diferentes de tempo p em

que os valores de atenuação podem ser excedidos. Para contornar esta limitação, um outro método foi desenvolvido baseado no modelo do ITU e inclui uma expressão simples para cálculo da taxa média de chuvas na área de interesse a partir da taxa pontual de chuvas [44].

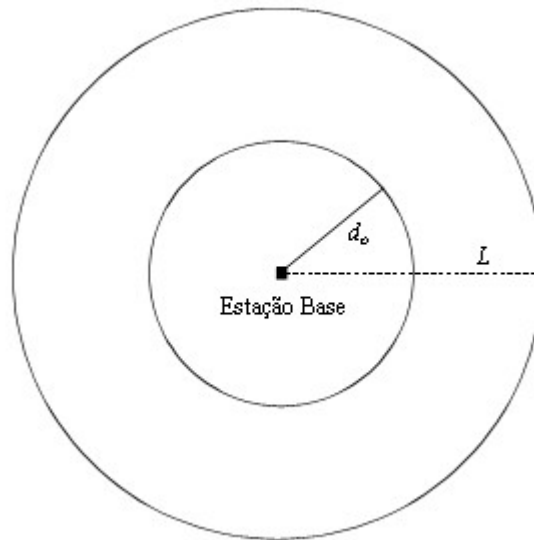


Figura 4.3 – Ilustração de uma célula de raio L e área de cobertura durante a ocorrência de chuvas limitada pelo raio d_o [43]

O método está descrito em [45] e é apresentado a seguir. Ele calcula o percentual de cobertura para uma célula com a geometria ilustrada na Figura 4.3. A cobertura dependerá da posição da estação base, do raio L (km) da célula, da atenuação máxima A_{max} (dB) a que o sistema poderá estar sujeito e do percentual de tempo p em que a atenuação pode ser excedida. Nos momentos em que a atenuação for excedida ocorrerá a redução da área de cobertura. A atenuação máxima A_{max} considera a atenuação em espaço livre, a atenuação por gases atmosféricos e vapor d'água e a atenuação por chuvas.

Descrição do método :

1 – Obter a taxa média de precipitação (R_{area}) para a área onde o sistema irá operar, taxa está que pode ser excedida por um percentual de tempo p .

A expressão apresentada na Equação 4.9 calcula esta taxa a partir da taxa pontual de chuvas R_{point} para o mesmo percentual de tempo p . O valor da taxa pontual

pode ser obtido na recomendação ITU-R 837-4 [28] caso não esteja disponível na região de interesse.

$$R_{area}(p) = k(p\%) \cdot f(L) \cdot R_{point}^{g(L)} \quad (4.9)$$

Onde L é o raio da célula

$f(L)$ e $g(L)$ são obtidos através das expressões apresentadas nas Equações 4.10 e 4.11

$$f(L) = 0,3174 \cdot L^{0,058} + 1 \quad (4.10)$$

$$g(L) = 1 - 0,1667 \cdot L^{0,2255} \quad (4.11)$$

$k(p\%)$ é um fator incluído no cálculo para considerar a não homogeneidade espacial das chuvas que difere conforme a região geográfica onde o sistema irá operar e é calculado pela expressão da Equação 4.12

$$k(p\%) = \frac{C_{Ch}(p\%)}{C_R(p\%)} = \frac{d_{Ch}^2(p\%)}{d_R^2(p\%)} \quad (4.12)$$

Onde C_{Ch} é a cobertura correspondente à cidade de Chilbolton (Reino Unido) para a qual foi proposto o método ITU

C_R é a cobertura correspondente à região de interesse

d_{Ch} e d_R são os comprimentos máximos de percurso de enlaces ponto-a-ponto na cidade de Chilbolton e na região de interesse, respectivamente, para uma disponibilidade específica e uma dada margem que considera um valor de atenuação que será excedido por um percentual de tempo p

Os valores de d_{Ch} e d_R podem ser obtidos usando o método ITU proposto na recomendação ITU-R P.530 [23] ou o método Pérez-Mello [30].

2 – Resolver numericamente para d_0 (km) a Equação 4.13.

$$a \cdot R_{\text{area}}^b \cdot d_0 \cdot \left(1,5 + 1,1 \cdot \left(2 \cdot d_0^{-0,04} - 2,25\right)\right) \cdot \log(R_{\text{area}}) + A_{\text{gv}} + A_{\text{espaçolivre}} = A_{\text{max}} \quad (4.13)$$

Onde a e b são parâmetros relacionados com a frequência de operação e o tipo de polarização utilizado e são obtidos através da recomendação ITU-R 838 [34]

A_{gv} é a atenuação por gases atmosféricos e vapor d'água e pode ser calculada pela expressão da Equação 3.1

$A_{\text{espaço livre}}$ é a atenuação em espaço livre em dB e pode ser calculada pela expressão da Equação 4.14 onde f é a frequência em GHz

$$A_{\text{espaçolivre}} = 92,44 + 20 \log d_0 + 20 \log f \quad (4.14)$$

A_{max} é a atenuação máxima em dB a que o sistema poderá estar sujeito e pode ser obtida pela expressão da Equação 4.15

$$A_{\text{max}} = P_t + G_t + G_r - P_{r \text{ limiar}} \quad (4.15)$$

Onde P_t (dBm) é a potência transmitida

G_t (dB) é o ganho da antena de transmissão

$P_{r \text{ limiar}}$ (dBm) é a potência limiar de recepção

G_r (dB) é o ganho da antena de recepção

3 – Para o raio d_0 , calculado na etapa anterior, o percentual da área da célula com cobertura é obtida pela expressão da Equação 4.16.

$$C = 100 \cdot \left(d_0 / L\right)^2 \% \quad (4.16)$$

4.1.3.

Efeitos de outros fatores na cobertura

O tipo de modulação utilizado tem influência na área de cobertura de um sistema. Cada tipo de modulação tem um requisito mínimo de relação entre os níveis de sinal e da soma de ruído e interferência (S/(N+I)) e, conforme será estudado na seção 4.3, os valores da relação S/(N+I) variam dentro de um setor de uma célula o que pode fazer com que em algumas áreas o requisito mínimo não

seja atendido para os tipos de modulação disponíveis. Se isto ocorrer, não haverá cobertura nestas áreas.

A quantidade de canais de frequências em que o espectro disponível é dividido e o modo como estes canais de frequências são distribuídos pelas células também têm influência na área de cobertura pois pode possibilitar uma diminuição dos níveis de interferência melhorando a cobertura [46]. A seção 4.3.1 abordará novamente esta questão.

4.1.4. Melhoria da cobertura

Além do planejamento das frequências, algumas ações possibilitam uma melhoria na cobertura. Algumas ações estão relacionadas com alterações nos transmissores e nos receptores que podem melhorar a cobertura através de aumento da potência transmitida, aumento no ganho e na diretividade das antenas, redução das perdas e do ruído no receptor e uso de códigos corretores de erros mais robustos e estratégias melhores de codificação. Estas ações entretanto, nem sempre são possíveis de serem implementadas. Outras ações estão relacionadas com o planejamento do sistema. São elas: elevação das antenas da estação base e da estação assinante, redução da distância entre estações base (o que significa redução no tamanho das células), uso de macro-diversidade onde as estações assinantes apontam antenas para as estações base com sinais mais fortes, uso de repetidores que amplificam os sinais dos enlaces de subida e descida [47].

A recomendação ITU-R P.1410 [43] apresenta uma simulação realizada para uma região específica com o objetivo de verificar a influência da altura da antena da estação base na cobertura. O gráfico resultante está apresentado na Figura 4.4. Simulação análoga foi realizada para verificar a influência da altura das antenas das estações assinantes e o resultado está apresentado na Figura 4.5.

4.2. Interferências

Interferências podem ser classificadas em duas categorias : interferência co-canal e interferência de canal adjacente.

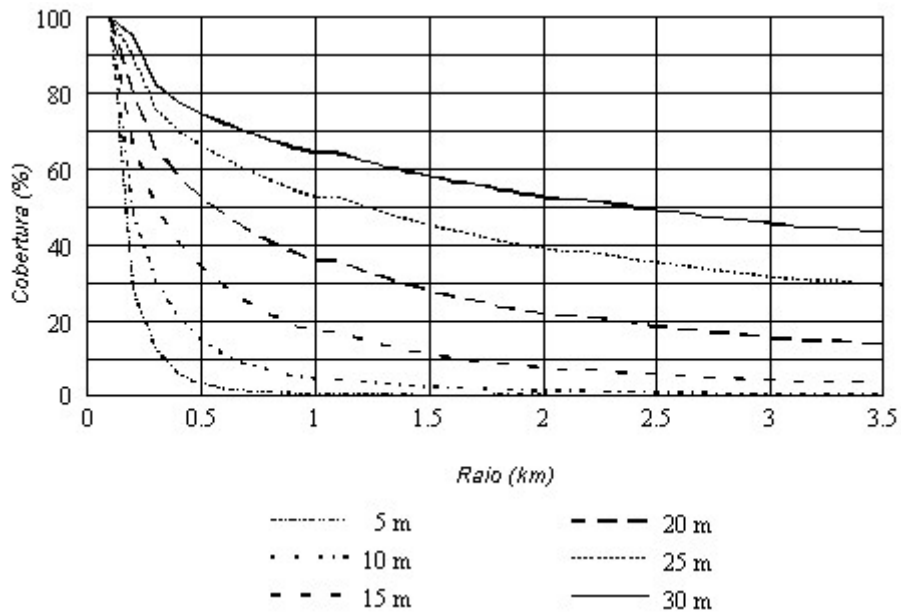


Figura 4.4 – Variação da cobertura em função do raio da célula para diferentes alturas da antena da estação base [43].

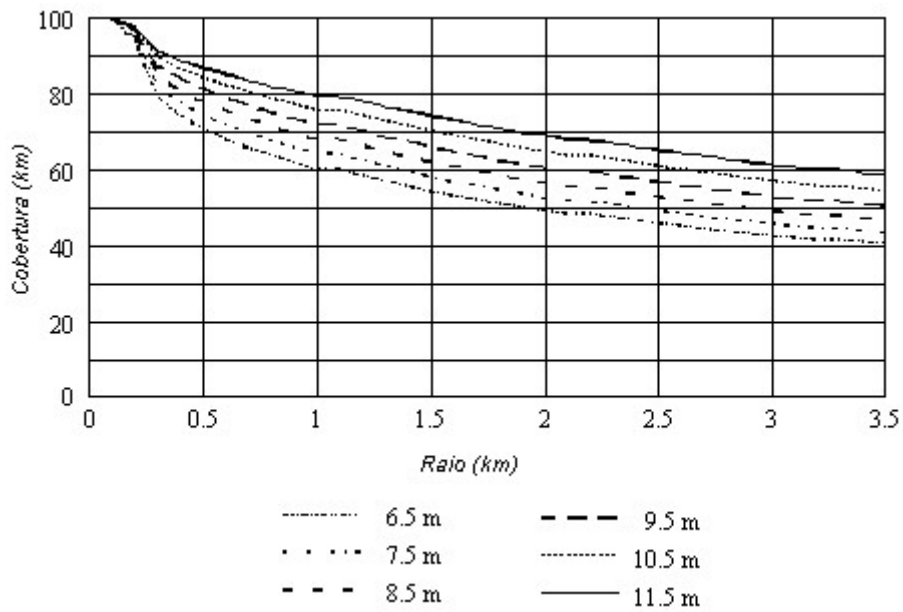


Figura 4.5 – Variação da cobertura em função do raio da célula para diferentes alturas das antenas das estações assinantes [43]

A Figura 4.6 ilustra o espectro de potência do sinal desejado e os tipos de interferência num exemplo simplificado.

A largura de faixa do canal que interfere pode ser mais larga ou mais estreita que o sinal desejado. No caso de ser mais larga, conforme ilustrado na Figura 4.6, somente uma parte da sua potência vai ficar dentro da largura de faixa do filtro do receptor. Neste caso, a interferência pode ser estimada através do cálculo da potência que chega à antena receptora multiplicada por um fator igual à razão entre a largura de faixa do filtro e a largura de faixa da interferência [11].

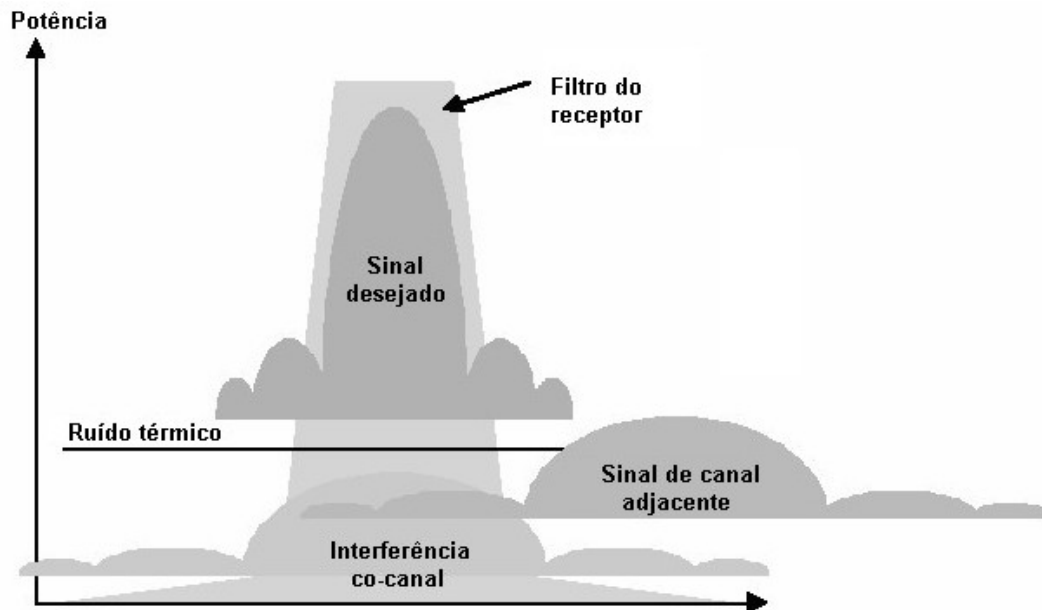


Figura 4.6 – Formas de interferência [11].

Uma interferência de canal adjacente também é mostrada na Figura 4.6. Neste caso, a interferência se deve à parte do sinal do canal adjacente que cai no canal usado e que pode ser tratada como interferência co-canal.

Um modo de avaliar a interferência é determinar a relação $S/(N+I)$ que é a razão entre o nível do sinal desejado e a soma de ruído e interferência.

4.2.1. Coexistência entre sistemas

As interferências têm importância significativa no planejamento de sistemas baseados no padrão IEEE 802.16 porque funcionam como um fator limitante. Referente a este aspecto o IEEE apresenta o documento “*Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems*” [11] que consiste em um conjunto de recomendações práticas para uso associado ao padrão IEEE 802.16 e tem como

objetivo controlar a interferência e viabilizar a coexistência entre sistemas fixos de acesso sem fio em banda larga e outros sistemas do mesmo tipo ou enlaces ponto-a-ponto que dividem as mesmas bandas de frequência.

A recomendação do IEEE apresenta um roteiro para minimizar a interferência em sistemas operando na faixa de frequências entre 10 e 66 GHz (com foco particular na faixa entre 23,5 e 43,5 GHz), analisa cenários com sistemas diferentes operando ao mesmo tempo e proporciona uma referência para o projeto, desenvolvimento, coordenação e uso da frequência nos sistemas.

As recomendações foram desenvolvidas e confirmadas através de análises e simulações específicas considerando o ambiente de propagação apropriado para experiências de interferência entre os tipos de sistemas mencionados.

4.2.1.1. As recomendações

No caso de coexistência entre sistemas fixos de acesso sem fio em banda larga e outros sistemas deste mesmo tipo operando na faixa de frequência entre 10 e 66 GHz o documento do IEEE analisa a coexistência através de dois cenários: um cenário co-canal no qual dois operadores estão em territórios adjacentes ou dentro da linha de visada de cada um e têm a mesma alocação de espectro e um cenário de canal adjacente no qual os territórios licenciados dos dois operadores têm sobreposição e, a estes operadores, são alocadas faixas adjacentes do espectro. As estações que recebem a interferência são designadas como estações (ou receptores) “vítimas”.

Uma das recomendações consiste em adotar um critério de potência máxima de interferência no receptor “vítima” em 6 dB abaixo do ruído térmico (isto é, $I/N \leq -6$ dB) como um nível aceitável de interferência causada pela transmissão de um operador em área vizinha o que causa uma degradação de 1 dB no sinal desejado recebido. Este valor deve ser considerado na especificação da margem durante o cálculo dos enlaces. Se interferências provenientes de transmissores de mais de um operador estiverem presentes, margens adicionais devem ser consideradas no cálculo dos enlaces.

Nas recomendações é enfatizada a necessidade de colaboração entre os operadores antes de se iniciar o desenvolvimento ou alguma modificação relevante no sistema. Para incitar este comportamento nos cenários de

interferência co-canal é introduzido o conceito de determinar valores de densidade de fluxo espectral de potência (*power spectrum flux density - psfd*) como limites para a execução de diferentes ações a serem realizadas por um operador para notificar outros operadores. É recomendado que órgãos reguladores especifiquem os valores limites aplicáveis para cada banda de frequência.

As seguintes questões devem ser consideradas na previsão da densidade espectral de potência com propósitos de acordo entre operadoras :

- a) os cálculos de perda no percurso para um ponto na fronteira devem considerar céu claro, absorções atmosféricas e obstrução por irregularidades do terreno.
- b) com o propósito de cálculo do nível de conformidade dos limites para valor da *psfd*, o nível da *psfd* na fronteira da célula deve ser o valor máximo que ocorre em um ponto até 500 m acima do terreno;
- c) parâmetros elétricos reais devem ser utilizados (por exemplo, potência equivalente irradiada isotropicamente (EIRP), modelos de antenas, etc.);
- d) assumir condições de propagação em céu claro utilizando, se possível, recomendações do ITU relacionadas com propagação.

Nenhum acordo de colaboração, entretanto, é necessário se o transmissor de um operador estiver a mais de 60 km da fronteira da área de serviço ou da fronteira do vizinho. Para distâncias inferiores, acordos podem ser necessários mas isto está sujeito a um exame minucioso dos detalhes do caminho de propagação na transmissão que pode apresentar pontos que causem obstrução ou perda na intensidade da interferência

Para casos de interferência de canais adjacentes quando os operadores atuam na mesma área é recomendado que exista uma faixa de frequência de guarda entre os sistemas.

É recomendado também o uso de antenas nas estações base (BS) e assinante (SS) apropriadas para o grau de coexistência necessária pois a maioria dos problemas de coexistência, segundo as simulações realizadas pelo IEEE, está relacionada com interferência entre feixes principais das antenas. Os feixes laterais são importantes, mas têm influência secundária.

Outra recomendação é limitar a EIRP máxima das estações a valores específicos e usar controle de potência nas estações assinantes.

4.2.1.2. Espaçamento geográfico e de frequência

Os mecanismos mais severos que se aplicam a cada tipo de cenário determinam a norma de espaçamento para os casos de interferência entre estações base na topologia ponto-multiponto como mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Espaçamento necessário conforme o tipo de cenário [11]

| Cenário | Espaçamento em que a interferência é abaixo do nível alvo (*) |
|-----------------------------|--|
| Área adjacente, mesmo canal | 60 km |
| Mesma área, canal adjacente | 1 canal de guarda (**) |

(*) normalmente 6 dB abaixo do chão de ruído do receptor

(**) considera que sinal interferente e sinal vítima têm a mesma largura de canal. Caso tenham larguras diferentes de canal, o canal de guarda terá a largura do canal mais largo.

4.2.1.3. Especificações técnicas para projetos

O documento do IEEE [11] apresenta alguns parâmetros recomendáveis para os projetos de sistemas.

Entre estes parâmetros recomendados podemos citar o limite de potência equivalente irradiada isotropicamente (EIRP) das estações. Os limites de EIRP são medidos como densidade espectral de potência e expressos em dBW/MHz para possibilitar aplicação para várias larguras de canais. Para a estação base é recomendado que o valor máximo seja 0 dBW em 1 MHz. Para as estações assinantes o valor máximo recomendado é 15 dBW em 1 MHz. Neste caso o valor limite considera a existência de atenuação por chuvas. Em situações de céu claro a estação deve utilizar mecanismo de controle de potência.

4.2.2. Interferências intra-sistema

4.2.2.1. Interferências co-canal

Conforme apresentado no início deste Capítulo, a utilização de uma configuração celular em sistemas fixos de acesso sem fio permite ampliar a área de abrangência dos sistemas e é viabilizada pelo reuso de frequências que consiste na utilização de todo o espectro disponível de frequências uma ou mais vezes dentro de cada célula. O reuso de frequências, entretanto, possibilita a existência de interferência co-canal.

A Figura 4.7 ilustra situações de interferência co-canal através de um exemplo de sistema que utiliza uma configuração celular em que as células têm formato quadrado, o espectro de frequências é dividido em dois canais de frequências (F1 e F2) que são repetidos duas vezes dentro de cada célula e cada estação base é representada por um ponto preto e identificada por uma letra entre A e I.

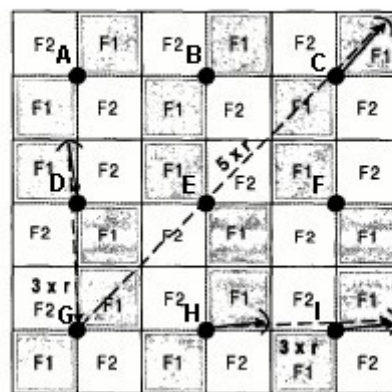


Figura 4.7 – Interferências intra-sistema [46].

Podem ocorrer interferências co-canal em situações que estão ilustradas pelas setas na Figura 4.7. Por exemplo, uma estação assinante dentro da área de cobertura da estação base D se comunica com esta estação base através do canal de frequência F1. Entretanto, devido à localização da estação assinante dentro do setor, o sinal transmitido por ela pode interferir na estação base G dependendo das características da antena que cobre o setor desta estação que também utiliza o

canal F1 e está a uma distância aproximadamente igual a 3 vezes o raio das células. O sinal transmitido na frequência F1 pela estação base G também poderia interferir na estação assinante da célula da estação base D. A Figura 4.8 ilustra um exemplo de diagrama de irradiação de uma antena da estação base G que possibilitaria este tipo de interferência.

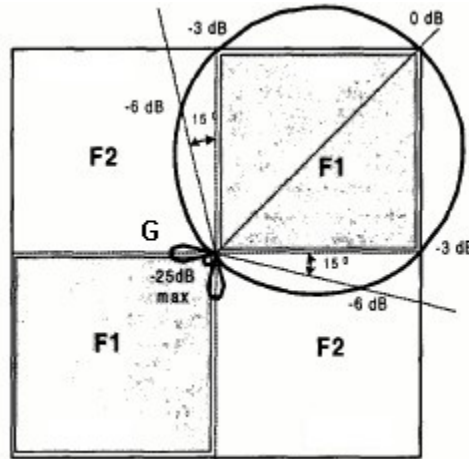


Figura 4.8 – Diagrama de irradiação de uma das antenas da estação base G [46]

Outras situações de interferência co-canal no exemplo de configuração ilustrado na Figura 4.6 podem ocorrer entre :

- a estação base G e um assinante que está na área de cobertura da estação base C a uma distância aproximadamente igual a 5 vezes o raio das células;
- a estação base H e um assinante que está na área de cobertura da estação base I a uma distância aproximadamente igual a 3 vezes o raio das células.

As interferências mais significativas, entretanto, são as interferências causadas por fontes de interferências próximas e por fontes distantes cujos lóbulos principais do diagrama de irradiação das antenas estejam apontados na direção do lóbulo principal da antena da estação “vítima” da interferência [48].

Diferentes configurações de células possibilitam diferentes níveis de interferências intra-sistemas. Estas configurações serão analisadas na seção 4.3 em que o planejamento de frequências será estudado.

A interferência co-canal não pode ser filtrada. Sendo assim, ela é levada em consideração somada ao sinal como ruído e a relação sinal/interferência (S/I) mínima para alcançar uma determinada taxa de erro de bits (BER) é diretamente relacionada com a relação sinal/ruído (S/N) que o modem do receptor necessita

para atingir o desempenho requerido para a BER desejada. Além disto, a relação S/I é fortemente dependente da densidade da constelação da modulação utilizada e seu requisito mínimo pode ser melhorado em até 6 dB através do uso de um código corretor de erros [46].

Para sistemas baseados na tecnologia IEEE 802.16 os seguintes requisitos mínimos de relação S/N podem ser considerados: 9 dB para modulação QPSK, 16 dB para 16-QAM e 22 dB para 64-QAM [49].

Para considerar o efeito conjunto de ruído e interferência outro tipo de requisito pode ser especificado : um valor mínimo de relação entre sinal e a soma de interferência e ruído ($S/(N+I)$). Se a potência da interferência recebida for igual à potência do ruído, por exemplo, a relação $S/(N+I)$ mínima será : 12 dB para modulação QPSK, 19 dB para 16-QAM e 25 dB para 64-QAM. Em [50] são apresentados os requisitos de relação $S/(N+I)$ para taxa de erro de bits (BER) igual a 10^{-6} : 13,3 dB para modulação QPSK, 20,3 dB para 16-QAM e 26,4 dB para 64-QAM.

4.2.2.2. Interferências de canal adjacente

Interferências de canais adjacentes também podem ocorrer dependendo do da distribuição dos canais de frequências pelos setores das células. Neste caso o padrão IEEE 802.16 [12] especifica os valores mínimos da relação entre o nível do sinal no canal utilizado e o nível do sinal nos canais adjacentes conforme ilustrado na Figura 4.9. Os valores são especificados conforme a degradação que será causada na relação S/I total (que inclui as interferências co-canal) para os 3 tipos de modulação e diferentes requisitos de taxa de erro de bits – BER (10^{-3} ou 10^{-6}).

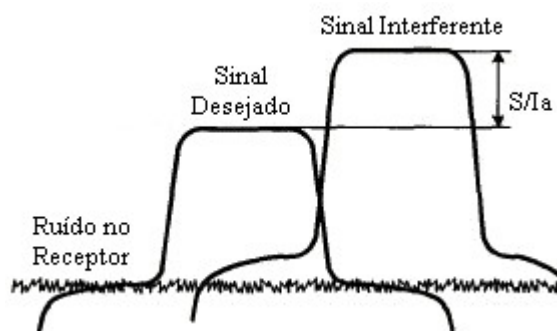


Figura 4.9 – Ilustração de relação sinal/interferência de canal adjacente [46]

A Tabela 4.2 apresenta os valores mínimos de S/I_a especificados pelo IEEE.

Tabela 4.2 – Valores mínimos de S/I_a [12]

| Canal Adjacente Interferente | Taxa de Erro de Bits (BER) | Degradação Causada na S/I | Tipo de Modulação | S/I_a |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---|--------------------------|---------------------------|
| 1° | 10^{-3} | 3 dB | QPSK | -9 dB |
| 1° | 10^{-3} | 3 dB | 16-QAM | -2 dB |
| 1° | 10^{-3} | 3 dB | 64-QAM | +5 dB |
| 1° | 10^{-3} | 1 dB | QPSK | -5 dB |
| 1° | 10^{-3} | 1 dB | 16-QAM | +2 dB |
| 1° | 10^{-3} | 1 dB | 64-QAM | +9 dB |
| 1° | 10^{-6} | 3 dB | QPSK | -5 dB |
| 1° | 10^{-6} | 3 dB | 16-QAM | +2 dB |
| 1° | 10^{-6} | 3 dB | 64-QAM | +9 dB |
| 1° | 10^{-6} | 1 dB | QPSK | -1 dB |
| 1° | 10^{-6} | 1 dB | 16-QAM | +6 dB |
| 1° | 10^{-6} | 1 dB | 64-QAM | +13 dB |
| 2° | 10^{-3} | 3 dB | QPSK | -34 dB |
| 2° | 10^{-3} | 3 dB | 16-QAM | -27 dB |
| 2° | 10^{-3} | 3 dB | 64-QAM | -20 dB |
| 2° | 10^{-3} | 1 dB | QPSK | -30 dB |
| 2° | 10^{-3} | 1 dB | 16-QAM | -22 dB |
| 2° | 10^{-3} | 1 dB | 64-QAM | -16 dB |
| 2° | 10^{-6} | 3 dB | QPSK | -30 dB |
| 2° | 10^{-6} | 3 dB | 16-QAM | -23 dB |
| 2° | 10^{-6} | 3 dB | 64-QAM | -16 dB |
| 2° | 10^{-6} | 1 dB | QPSK | -26 dB |
| 2° | 10^{-6} | 1 dB | 16-QAM | -20 dB |
| 2° | 10^{-6} | 1 dB | 64-QAM | -12 dB |

4.2.2.3. Efeitos das chuvas na relação S/I

A análise das interferências no planejamento de sistemas fixos de acesso sem fio em banda larga também deve considerar a influência das chuvas conforme foi apresentado no Capítulo 3. As chuvas, além de afetarem diretamente a disponibilidade dos sistemas devido à atenuação que causa nos sinais, também têm uma influência indireta. A não-uniformidade espacial da chuva pode fazer com que exista uma atenuação diferencial entre sinais de enlaces convergentes. Em sistemas ponto-multiponto um sinal desejado e um sinal interferente formam enlaces convergentes. Quanto maior a frequência de operação ou quanto maior a intensidade da chuva, maior é a atenuação dos sinais propagados mas dependendo de onde estiver localizada a chuva, pode ocorrer uma alteração no nível da relação S/I.

As chuvas podem causar degradação da relação sinal-interferência quando o sinal desejado é sujeito a mais atenuação que o sinal interferente. Por outro lado, se o sinal interferente for mais atenuado que o sinal desejado durante a ocorrência de chuvas, ocorrerá a melhora na relação. O melhor caso ocorre quando uma chuva forte está localizada na região onde está a estação base da célula sob análise pois os sinais interferentes percorrem distâncias maiores dentro da região com chuva que os sinais desejados das estações assinantes daquela célula e são, portanto, sujeitos a níveis maiores de atenuação, o que pode melhorar a relação S/I. Se a chuva estiver localizada, entretanto, na região do sinal interferente de menor intensidade, pouca influência terá na relação assim como pouca influência existirá nos casos de chuvas de intensidades fracas pois estas são mais homogêneas [51].

O efeito das chuvas na relação S/I de cada enlace pode ser estimado através da expressão apresentada na Equação 4.17 [52].

$$\frac{S}{I}(dB)_{chuva} = \frac{S}{I}(dB) - A_{AB} \quad (4.17)$$

Onde S/I (dB) é a relação sinal/interferência do enlace desejado em condições de céu claro

A_{AB} é a atenuação diferencial entre o enlace desejado e o enlace interferente e pode ser calculado pela expressão da Equação 3.17

Substituindo a Equação 3.17 na Equação 4.17, temos :

$$\frac{S}{I} (dB)_{chuva} = \frac{S}{I} (dB) - [A_A(p) - 0,34 A_B(p)] \cdot (2,65 \cdot |\theta|^{0,23} + 0,004 \cdot |\Delta d|^{2,25}) \cdot f^{-0,4} \quad (4.18)$$

Onde θ (rad) é o ângulo entre os enlaces

Δd (km) é a diferença entre as distâncias dos enlaces

f (GHz) é a frequência de operação

A_A e A_B as são atenuações dos enlaces que podem ser excedidas durante o percentual de tempo p .

O nível da relação S/I durante a ocorrência de chuvas, portanto, depende das atenuações a que o enlace desejado e o enlace interferente estão sujeitos, da frequência de operação, do comprimento dos enlaces e do ângulo entre eles.

4.2.3. Minimização de interferência

Algumas técnicas podem ser usadas para minimizar as interferências intersistemas e intra-sistemas. O IEEE apresenta um grupo destas técnicas para minimização de interferências intersistemas [11] mas algumas delas podem ser aplicadas a interferências intra-sistemas. Parte destas técnicas foi descrita a seguir.

- Ações durante o planejamento da faixa de frequências

A manutenção de alguns canais reservas de frequências para serem usados quando se detectar interferência pode ajudar a eliminar problemas de interferência co-canal e de canal adjacente. A exclusão de determinadas frequências também ajuda a reduzir interferências. Estas ações, entretanto, significam um desperdício de faixa de espectro e nem sempre podem ser utilizadas.

- Limites geográficos da área de serviço

Se os órgãos reguladores definirem uma fronteira de demarcação da área de serviço em uma área de baixa demanda por serviço ou em áreas cujos terrenos oferecem obstrução natural, o nível de interferência intersistemas que cruza as fronteiras tende a ser reduzido.

- Controle da potência e da distância de separação

Uma das técnicas mais efetivas que podem ser empregadas é aumentar a distância entre o transmissor interferente e o receptor vítima. Se a distância não pode ser aumentada, então a potência do transmissor pode ser diminuída. Estas técnicas, entretanto, nem sempre são viáveis de serem executadas porque têm impacto na cobertura necessária e outros fatores.

Se o receptor que sofre a interferência for em uma estação base, uma alternativa seria aumentar a potência de transmissão das estações assinantes dentro da área de cobertura da estação base de modo a melhorar a relação sinal/interferência. Esta alternativa, entretanto, deve ser adotada de forma criteriosa pois pode causar novas interferências em outras estações base.

- Precauções relacionadas com as antenas

O posicionamento das antenas de uma mesma estação deve ser planejado com cuidado. A isolação de antena para antena depende de fatores como localização, configuração de montagem e outras questões. Uma referência de isolação entre antenas apontadas para um mesmo setor de largura igual ou menor que 90° deve ser de 60 a 100 dB.

Uma leve mudança na orientação de uma antena setorizada pode ajudar a minimizar a interferência. Esta ação é particularmente eficaz quando a interferência se origina na direção do lóbulo principal da antena mas pode influir na área de cobertura. Da mesma que forma que alterar levemente a orientação da antena, um *downtilt* de uma das antenas (transmissora ou receptora) também pode ajudar a minimizar a interferência.

Nas regiões próximas às fronteiras das células podem ser usadas antenas de alta diretividade. Outra possibilidade é posicionar a estação base em local próximo à fronteira ao invés de ser localizada próxima ao centro da célula.

Outra técnica possível é instalar a antena da estação base em alturas menores de modo a criar obstruções na linha de visada com possíveis fontes de interferência.

A polarização cruzada também pode ajudar a amenizar as interferências entre sistemas adjacentes. Um valor típico de isolamento entre polarizações é entre 25 e 30 dB [11].

- Uso de obstruções

Obstruções naturais dos terrenos também podem ser usadas. Se não for possível, pode se criar uma obstrução artificial.

- Processamento adequado do sinal

O uso de modulações mais robustas e técnicas de processamento de sinal aperfeiçoadas também ajudam nos cenários onde o potencial para interferência é alto.

- Interrupção de transmissão do assinante quando não há presença de sinal recebido

Na ausência de sinal corretamente recebido no enlace de descida o transmissor da estação assinante deve ser desabilitado prevenindo transmissão indesejada.

- Previsão de segurança contra falhas

É recomendado que os equipamentos da estação do assinante e da estação base tenham a habilidade para detectar e reagir a falhas prevenindo irradiações e interferências indesejadas.

4.3. Planejamento de frequências e setorização

As licenças para utilização de faixas de frequências para serviços ponto-multiponto têm um alto custo para as empresas operadoras. É necessária, portanto, a otimização do uso da faixa de frequência disponível de modo a obter a máxima utilização da mesma [46].

A utilização de uma configuração celular permite ampliar a área de serviços de um sistema fixo de acesso sem fio em banda larga usando uma faixa disponível de frequências limitada e é viabilizada pelo reuso dos canais de frequências uma ou mais vezes dentro de cada célula. A quantidade de vezes em que todo o espectro disponível é usado dentro de uma célula é definida como fator de reuso [53].

O reuso de frequências, entretanto, possibilita a existência de interferência co-canal conforme já foi apresentado neste estudo e sua implementação é limitada pela capacidade que os receptores das estações (base ou assinante) têm de operar na presença de interferências co-canal, ou seja, depende dos requisitos de relação sinal/interferência dos equipamentos que estão diretamente relacionados com as especificações do sistema. Outra limitação para a implementação do reuso de frequências é a tolerância dos receptores a interferências de canais adjacentes [46].

O reuso de frequências, portanto, requer um planejamento criterioso para evitar que os níveis de interferência a que as estações estarão submetidas causem a indisponibilidade do sistema ou reduza a capacidade do mesmo pois quando o nível de interferência é alto, uma modulação mais robusta é necessária o que faz com que a capacidade do sistema se reduza.

O planejamento das frequências consiste na divisão do espectro disponível em canais e no estudo das configurações de distribuição dos canais de frequências nas células. A quantidade de setores nas células é planejada de maneira que a capacidade requerida seja obtida e os requisitos mínimos de relação sinal/interferência dos modems dos equipamentos sejam atendidos [53] mas é preciso considerar que quanto maior o número de setores, maior o custo de uma estação base.

Para minimizar as interferências, a distribuição dos canais pelos setores deve ser feita de modo que setores adjacentes utilizem canais diferentes e pode considerar a utilização de polarizações diferentes para proporcionar uma isolamento espacial que permita atender aos requisitos do sistema.

Uma característica a ser considerada no estudo das configurações de canais de frequências nas células é o formato da célula. Ainda que na prática o formato de uma célula real não seja regular e esteja relacionado com a área de cobertura de uma estação base (que depende das características do terreno e das edificações,

conforme apresentado na seção 4.1) para fins de planejamento utiliza-se uma configuração de células com um formato específico. Células de formato hexagonal são usadas em sistemas rádio-móveis e também podem ser utilizadas em sistemas de acesso fixo sem fio mas o modelo que se tornou mais popular de ser utilizado é de células retangulares com setorização de 90° [53, 54] conforme ilustrado na Figura 4.10.

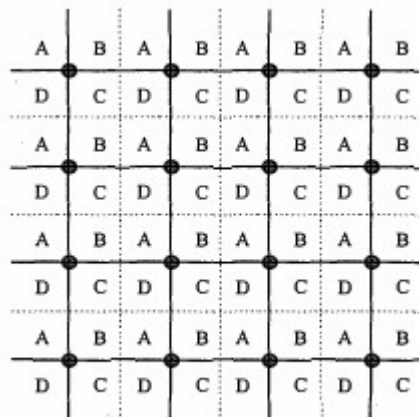


Figura 4.10 – Ilustração de configuração com células retangulares e setores de 90° .

Os pontos pretos na Figura 4.10 indicam as estações base, as linhas pontilhadas indicam as fronteiras entre células, as linhas sólidas indicam as fronteiras entre setores e as letras representam os canais de frequências. Nesta configuração, o espectro disponível de frequências foi dividido em 4 canais e cada canal é utilizado em um setor de cada célula. O fator de reuso é igual a 1.

Outras configurações também são utilizadas com setorização de 30° e 60° que possibilitam uma robustez maior para coexistência de sistemas mas nestes casos os custos serão maiores pois existirão mais setores e serão necessários mais equipamentos na estação base. Setores mais largos, além de possibilitarem uma redução nos custos, proporcionam maiores áreas de cobertura embora seja maior a probabilidade de interferências co-canal e de canal adjacente [55].

Na configuração ilustrada na Figura 4.10, em cada célula existe potencial para ocorrência de interferência co-canal causada por células vizinhas, células vizinhas das vizinhas e assim por diante.

Consideremos uma estação assinante localizada a uma distância igual a d de sua estação base na fronteira entre dois setores. Nesta localização sua antena estará apontada na direção da sua estação base mas também estará apontada para a estação base da célula vizinha.

Admitindo que as estações base transmitam utilizando a mesma potência, não exista obstrução no percurso através das duas células adjacentes, as condições climatológicas sejam homogêneas nas células e as células tenham raio igual a R , as estações base adjacentes estarão localizadas a uma distância igual a $2R$ e a relação S/I para a estação assinante considerada pode ser calculada por [54] :

$$\frac{S}{I} (dB) = 20 \log \frac{D}{d} \quad (4.19)$$

Onde d é a distância entre a estação assinante e sua estação base

D é a distância entre a estação assinante e a estação base interferente

Se considerarmos que não existe visada direta entre a estação assinante analisada e outras estações base mais distantes que a estação base da célula adjacente, o pior caso de S/I ocorre se a estação assinante estiver localizada no limite de sua célula, ou seja, a uma distância R de sua estação base. Neste caso, ela estará a uma distância igual a $3R$ da estação base vizinha e a relação S/I (dB) será igual a 9,5 dB [46]. Este valor inviabiliza a utilização de uma configuração como esta em sistemas baseados na tecnologia IEEE 802.16 pois a relação S/I não atinge o requisito mínimo para nenhum dos tipos de modulação utilizados por esta tecnologia. A existência de obstruções no percurso entre a estação assinante e a estação base interferente melhoraria esta relação e poderia viabilizar seu uso.

A expressão apresentada na Equação 4.19 é mais apropriada para o cálculo da relação S/I nos enlaces de descida. Nos enlaces de subida os valores calculados são válidos somente como estimativa do pior caso da relação S/I [54] pois nestes enlaces os sistemas baseados na tecnologia IEEE 802.16 utilizam o controle da potência transmitida pelas estações assinantes.

A repetição “espelhada” dos canais nos setores das células vizinhas, conforme ilustrado na Figura 4.11 possibilita eliminar a interferência entre células vizinhas (ou adjacentes) embora haja potencial para interferência entre uma

determinada célula e a segunda célula em qualquer direção uma vez que esta terá a mesma distribuição de canais em seus setores [46]. Fazendo uma análise similar à que foi feita na configuração anterior, obtemos uma relação S/I de 14 dB. Neste caso, a configuração poderia ser utilizada na tecnologia IEEE 802.16 apenas com modulação QPSK.

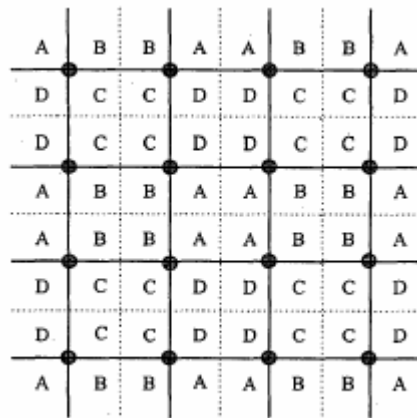


Figura 4.11 – Ilustração de configuração de células com repetição “espelhada” dos canais [54].

Se for possível dividir o espectro disponível somente em dois canais, uma implementação com fator de reuso igual a 2 numa configuração “espelhada” levaria a uma relação S/I de 9,5 dB, como na primeira configuração analisada [46].

Uma alternativa para melhorar a relação S/I é o uso de diferentes polarizações nos setores. A melhora ocorre porque diferentes polarizações possibilitam uma isolação mínima de 15 dB em situações de chuva [46].

A isolação obtida entre uma transmissão polarizada horizontalmente e outra polarizada verticalmente inclui mais um grau de liberdade no planejamento das células e proporciona o aumento da isolação entre setores no caso de células muito setorizadas e a criação efetiva de um segundo conjunto de canais de frequências para o planejamento. A isolação adiciona ainda capacidade seletivamente em uma configuração já existente [46].

A Figura 4.12 ilustra o uso de diferentes polarizações numa configuração onde apenas dois canais de frequências são utilizados e as células têm fator de reuso igual a 2.

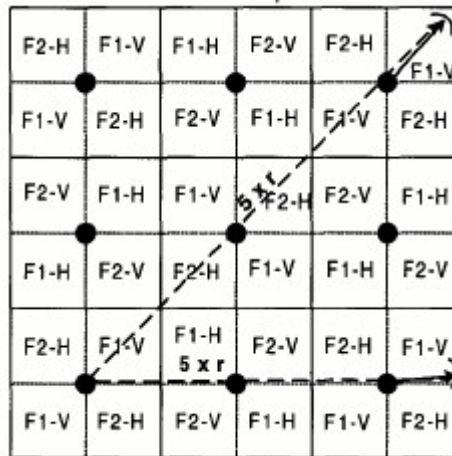


Figura 4.12 – Configuração de células com o uso de polarizações diferentes [46].

O uso de polarizações diferentes em setores adjacentes elimina qualquer exposição das regiões ao longo das fronteiras a interferências de canal adjacente mas, como ondas eletromagnéticas polarizadas horizontalmente estão mais sujeitas a atenuação por chuvas que ondas polarizadas verticalmente, como foi apresentado no Capítulo 3, os enlaces devem ser calculados com margens diferentes para compensar esta diferença [46].

A utilização de diferentes tipos de polarização dentro de uma mesma célula, entretanto, faz com que deva ser analisado outro aspecto. Conforme mencionado no início deste capítulo, o planejamento de sistemas novos de acesso sem fio em banda larga deve ser feito para atender a uma demanda inicial de serviços com uma quantidade mínima de equipamentos e deve incluir a previsão de alterações que permitam o incremento da capacidade à medida que a demanda aumentar. Dependendo da configuração de polarizações utilizada inicialmente dentro de uma célula pode ser necessário que o operador tenha que visitar todas as estações assinantes para refazer os apontamentos das antenas caso as alterações necessárias no sistema requeiram a alteração na configuração de polarizações utilizada inicialmente.

As estimativas de cálculo de relação S/I que foram apresentadas para as configurações mostradas consideraram uma estação assinante vítima de interferência localizada na fronteira entre setores em condições de céu claro. Se a localização fosse outra, valores diferentes seriam obtidos pois a relação S/I nos

enlaces de descida é dependente da localização da estação assinante e os níveis de interferências são intensos apenas em algumas regiões das células [54].

Se for considerado o uso de antenas nas estações assinantes com diagramas de irradiação que tenham largura do lóbulo principal igual a 5° (típico para o tipo de aplicação em estudo [54]) a distribuição dos valores de S/I em condições de céu claro dentro de um setor com largura de 90° em que a estação base está localizada na parte superior esquerda está ilustrada na Figura 4.13.

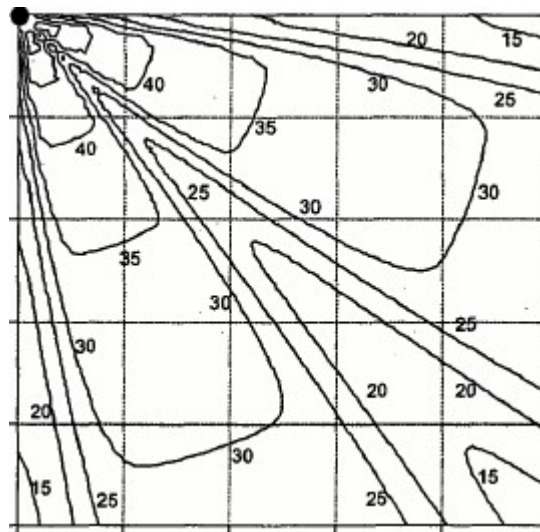


Figura 4.13 – Distribuição de valores de S/I dentro de um setor [54].

Durante a ocorrência de chuvas, os níveis de S/I irão variar de acordo com a localização da chuva, conforme apresentado na seção 4.2. Nas situações em que ocorrer uma degradação da relação as configurações apresentadas poderão apresentar problemas de disponibilidade em determinadas regiões independente do tipo de modulação utilizado.

4.3.1. Influência da setorização e do tipo de modulação na cobertura

A distribuição de valores apresentada na Figura 4.13 mostra que algumas regiões do setor podem ter limitação quanto ao tipo de modulação que pode ser utilizado e, conseqüentemente, a capacidade máxima que pode ser alcançada pelas estações localizadas em tais regiões será restringida, conforme será estudado na seção 4.4. Em algumas áreas pode não ser atendido até mesmo o requisito mínimo

para os tipos de modulação disponíveis fazendo com que nestas áreas não haja cobertura do sistema. Durante a ocorrência de chuvas, a cobertura pode piorar ainda mais se houver a degradação da relação S/I. Em [50] é apresentado um estudo que mostra que o uso de diversidade de estações base pode mitigar estes efeitos mas o padrão IEEE 802.16 [12] não considera o seu uso.

Uma comparação feita em [40] com os três tipos de modulação possíveis no padrão IEEE 802.16 e diferentes números de setores por célula mostra que o percentual da área coberta diminui à medida que se usa um tipo de modulação menos robusta e que tem melhor eficiência espectral. Também foi mostrado que o número de setores por estação base também tem impacto no percentual de área coberta. A comparação foi feita em relação ao uso de modulação QPSK e 16 setores por célula. Os resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Influência do tipo de modulação e da quantidade de setores na área de cobertura [40]

| Modulação | Número de setores por célula | Cobertura relativa (%) |
|-----------|------------------------------|------------------------|
| QPSK | 16 | 100 |
| | 8 | 79 |
| | 4 | 62 |
| 16-QAM | 16 | 49 |
| | 8 | 37 |
| | 4 | 28 |
| 64-QAM | 16 | 23 |
| | 8 | 16 |
| | 4 | 12 |

4.3.2.

Exemplo de configuração para um conjunto de células

Para sistemas de acesso sem fio em banda larga foi determinado empiricamente que o número mínimo canais de frequências requerido para um

reuso de frequências eficiente é 8 [55]. Com o uso de 8 canais e 2 polarizações temos 16 graus de liberdade no planejamento

A Figura 4.14 apresenta uma ilustração deste tipo de configuração que é muito comum [55] e é mais robusta que as configurações que foram apresentadas.

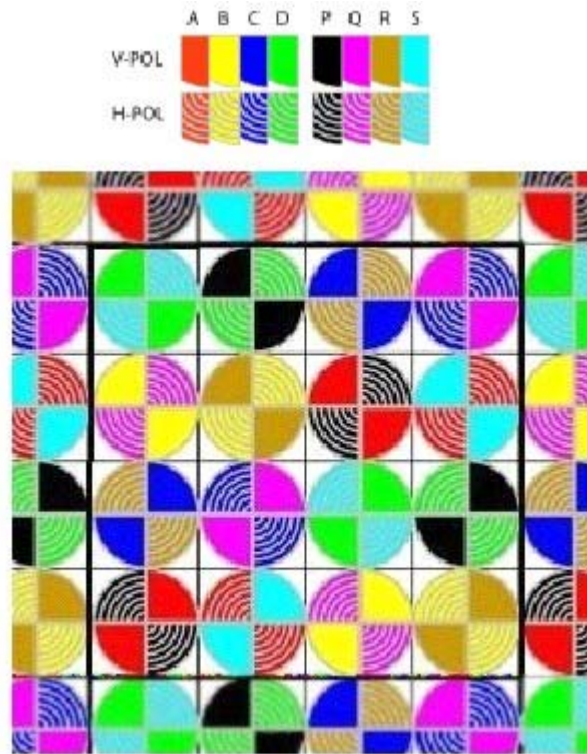


Figura 4.14 – Exemplo de configuração comum [55].

Neste exemplo o planejamento é feito para um conjunto formado por 16 células nas quais são usados 8 canais diferentes (representados por 8 cores diferentes) com polarização horizontal e vertical (cor em relevo e cor lisa, respectivamente). O início da repetição do padrão na vizinhança do conjunto de 16 células também é ilustrado na Figura 4.14.

É possível observar que foram atribuídos canais de frequências a setores adjacentes de maneira a maximizar a separação entre eles o que minimiza o potencial para interferência de canal adjacente. Além disto, outra célula com a mesma configuração ocorre somente no próximo grupo o que significa que a menor distância para interferência em uma estação base por uma estação assinante de outro grupo é de 9 vezes o raio das células, o que representa uma isolamento de

19 dB [55]. Se as células tiverem raio de 3 km, por exemplo, a distância será de 27 km o que minimiza bastante o potencial de interferência co-canal.

Entretanto, também é possível observar na Figura 4.14, que existe uma quantidade de áreas entre as células (representadas pela cor branca) cujas distâncias até as respectivas estações base são maiores que o raio máximo das células que está representado de forma colorida. Estas áreas podem ter problemas de cobertura. Uma técnica que pode minimizar o tamanho destas áreas é através do deslocamento das linhas ou colunas de células alternadas de uma distância equivalente a um raio de célula conforme está ilustrado na Figura 4.15 [55]

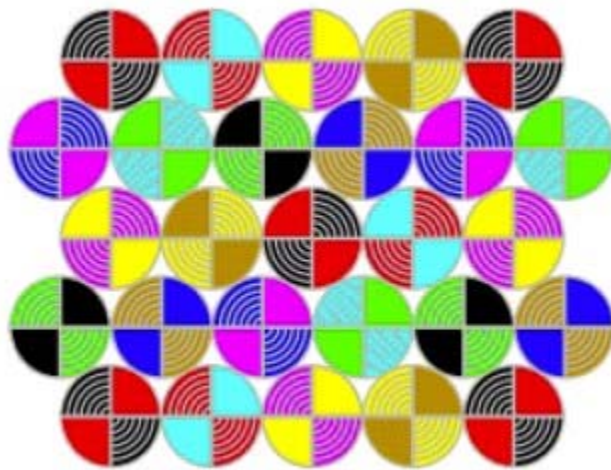


Figura 4.15 – Minimização das áreas sujeitas a problemas de cobertura [55].

Esta alteração não traz vantagens significativas para a minimização das interferências mas reduz de maneira clara as áreas sujeitas a problemas de cobertura.

Uma técnica para melhorar o desempenho de sistemas com setorização de 90° é a utilização de um esquema de designação automática de frequências (Automatic Frequency Assignment – AFA). Nesta técnica a estação base monitora permanentemente o espectro e cria um mapa das frequências em operação. Cada vez que uma estação assinante quer se comunicar ela recebe a designação de uma frequência que minimize as interferências [55]. Uma vantagem desta técnica é que algumas frequências que não seriam utilizadas para determinadas estações num planejamento fixo poderiam ser utilizadas num ambiente real graças a possíveis obstruções existentes no ambiente o que possibilita um melhor aproveitamento do

espectro de frequências. O padrão IEEE 802.16, entretanto, não utiliza esta técnica, apenas apresenta algumas restrições de utilização de frequências na mesma área conforme foi apresentado na Tabela 4.1.

4.4. Capacidade

4.4.1. Aspectos que influem na capacidade de um sistema

A capacidade de um sistema fixo de acesso sem fio em banda larga depende de fatores como largura de banda alocada, condições de propagação do canal de RF, simetria dos fluxos de comunicação entre estação base e estações assinantes, largura dos canais utilizados, fator de reuso de frequências, número de setores por células e características dos equipamentos utilizados mas é proveniente principalmente da largura de banda disponível [53].

A largura de banda alocada para este tipo de sistema depende de regulamentações específicas que variam conforme o país onde o sistema irá operar.

Os aspectos relacionados com as condições de propagação do canal de RF foram descritos no Capítulo 3. Entre os aspectos estudados, as chuvas são o fator de maior impacto na capacidade do sistema pois causam atenuações intensas na faixa de frequência entre 10 e 66 GHz podendo causar uma degradação da capacidade do sistema. A influência na capacidade do sistema ocorre devido aos efeitos das chuvas na relação S/I cujo nível determina o tipo de modulação utilizado.

A simetria dos fluxos de comunicação entre a estação base e as estações assinantes varia conforme os tipos de aplicações utilizados na rede. Diferentes dos sistemas celulares móveis que foram originalmente planejados para tráfego de voz que tem um perfil simétrico nos enlaces de subida e descida, os sistemas fixos de acesso sem fio em banda larga geralmente tem um tráfego maior no enlace de descida que no enlace de subida. [53].

As larguras de canais utilizadas influem diretamente na capacidade de um sistema. A capacidade máxima em bits por segundo pode ser calculada por [56]:

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (4.20)$$

Onde S/N é relação sinal/ruído

W (Hz) é a largura de faixa do canal utilizado

Teoricamente a taxa máxima de comunicação R que pode ser usada neste tipo de canal é menor ou igual à capacidade C do canal dependendo do esquema de modulação/codificação utilizado [56].

A taxa máxima de comunicação dependerá, portanto, da largura de faixa do canal alocado e das condições de propagação do canal de RF (relação $S/(N+I)$). Estas condições de propagação irão influir no tipo de modulação que pode ser utilizado causando efeito diretamente na capacidade.

As larguras de canais utilizadas dependem dos equipamentos. Alguns equipamentos utilizam canais com larguras máximas de 25 ou 20 MHz que são usadas nos Estados Unidos [40] e podem ser divididas em sub-canais de larguras iguais a 10, 5, 2,5 e 1,25 MHz permitindo ao operador do sistema adequar o serviço oferecido ao perfil de serviço e de preço desejado pelo cliente. Outros equipamentos utilizam canais de larguras máximas de 28 MHz que são mais comuns na Europa [40] e podem ser divididos em sub-canais de 14, 7, 3,5 e 1,75 MHz [49].

A Tabela 2.1 apresentou a relação entre as larguras de canal e as taxas máximas de comunicação possíveis conforme o tipo de modulação utilizado [12] para sistemas baseados na tecnologia IEEE 802.16.

O fator de reuso de frequências tem forte influência na capacidade do sistema. Quanto maior o número de vezes que a largura de banda alocada for usada dentro de uma célula, ou seja, quanto maior o fator de reuso de frequências, maior será a capacidade obtida. Entretanto, conforme foi estudado no planejamento de frequências, à medida que aumentamos o fator de reuso, aumentamos o nível de interferências dentro da célula. Outro efeito do aumento do fator de reuso é no custo da estação base pois quanto maior o fator de reuso, maior é o número de setores e maior é o número de equipamentos.

Uma solução que permite maximizar a capacidade por banda alocada e minimizar o número de setores e o custo associado aos transceptores é dividir a banda disponível em apenas 2 ou 3 sub-bandas, cada uma designada para uso em um setor diferente e usar um baixo fator de reuso [53].

As características dos equipamentos a serem utilizados também têm grande influência na capacidade. No enlace de descida de um sistema baseado no padrão IEEE 802.16 as modulações QPSK e 16-QAM são obrigatórias nos equipamentos mas a modulação 64-QAM que possibilita a maior taxa de comunicação dentre estes tipos de modulação é opcional. De maneira análoga, no enlace de subida somente é obrigatória a modulação QPSK que, embora seja mais robusta, é a que proporciona a menor taxa de comunicação dentre os 3 tipos de modulação.

4.4.2. Técnicas para aumento da capacidade

O planejamento de sistemas novos de acesso sem fio em banda larga deve ser feito de maneira que o sistema seja escalável incluindo uma previsão de alterações que permitam o incremento da capacidade do sistema à medida que a demanda aumentar. Este aumento de capacidade pode ser em termos de número de usuários, taxas de comunicação e cobertura geográfica [40].

A partir dos aspectos apresentados na seção anterior, diversas técnicas podem ser utilizadas com o objetivo de aumentar a capacidade de um sistema em termos de número de usuários e de taxas de comunicação.

A divisão dos setores possibilita o aumento da capacidade [40] e requer apenas modificações físicas na estação base [53]. Neste caso, se o planejamento inicial previa setores de 90°, a divisão dos setores significará a existência de novos setores com 45°, 30° ou 15°, por exemplo. Quanto menor o ângulo, maior o número de setores e maior o ganho em capacidade [46] desde que o aumento do número de setores seja acompanhado pelo aumento do fator de reuso, caso contrário nenhum ganho em capacidade ocorrerá. O cálculo da capacidade será abordado de maneira detalhada no Capítulo 5. O aumento do número de setores, entretanto, conforme já foi analisado, eleva o nível de interferência na célula podendo não ser aplicável dependendo das especificações do sistema.

O uso de polarizações diferentes dentro de uma célula também permite o aumento da capacidade pois diminui os níveis de interferência, conforme analisado na seção 4.3, e pode dobrar o número de canais disponíveis no sistema se considerarmos como canais distintos os canais de uma mesma frequência que utilizam polarizações diferentes [46]. O uso de polarizações diferentes, entretanto, pode causar problemas na expansão da rede pelas razões apresentadas na seção 4.3.

Uma estratégia de uso de polarizações diferentes para aumentar a capacidade é apresentada em [46] e consiste em implementar o uso de 2 polarizações em todos os setores em conjunto com a escolha de polarizações opostas para setores adjacentes reduzindo os níveis de interferência de canal adjacente nas fronteiras dos setores. Esta configuração está ilustrada na Figura 4.16. A melhora na relação S/I nestas regiões pode viabilizar o uso de tipos de modulação que possibilitam taxas mais altas de comunicação.

| | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| F3-V F4-H | F1-V F2-H | F2-V F1-H | F4-V F3-H | F3-V F4-H | F1-V F2-H |
| ● | F1-V F2-H | F4-V F3-H | F2-V F1-H | F1-V F2-H | F3-V F4-H |
| F4-V F3-H | F2-V | F1-V F2-H | F3-V F4-H | F4-V F3-H | F2-V |
| ● | F4-V F3-H | F3-V F4-H | F1-V F2-H | F2-V | F4-V |
| F3-V F4-H | F1-V | F2-V F1-H | F4-V F3-H | F3-V F4-H | F1-V |
| ● | F1-V | F4-V | F2-V | F1-V | F3-V |

Figura 4.16 – Configuração com uso de polarizações diferentes na fronteiras entre setores [46].

Nesta configuração, uma estratégia adicional que pode ser usada para melhorar ainda mais a capacidade é planejar de modo que os assinantes ao longo das fronteiras usem polarização vertical que é sujeita a menos atenuação por chuva que a polarização horizontal [46].

O uso de modulação adaptativa é outra técnica que permite o aumento da capacidade e faz parte da especificação do padrão IEEE 802.16. Esta técnica permite que o sistema se adapte às variações que ocorrem no canal (relação

$S/(N+I)$) variando o tipo de modulação utilizada. Esta variação do tipo de modulação irá se refletir na taxa de comunicação máxima. Quando a qualidade do canal é alta, um esquema de modulação menos robusto pode ser usado possibilitando uma capacidade maior. Se ocorrer um desvanecimento momentâneo no sinal, o sistema se adaptará escolhendo um tipo de modulação mais robusta que seja mais adequada às novas condições do canal de modo a manter a qualidade da conexão e a estabilidade do enlace [18]. No momento do desvanecimento, portanto, a capacidade irá diminuir mas se fosse usado um esquema de modulação fixa, o tipo de modulação dos enlaces teria que ser planejado considerando as condições do canal no pior caso e não aproveitaria os momentos em que o canal tivesse qualidade melhor.

Em situação de céu claro, de modo geral, as estações assinantes mais próximas da estação base têm melhores condições de propagação e podem utilizar uma modulação menos robusta que possibilita uma taxa de comunicação maior [18].

O aumento de capacidade proporcionado pela modulação adaptativa foi avaliado em [54]. Se os níveis mínimos requeridos de relação S/I forem 12 dB para modulação QPSK, 19 dB para 16-QAM e 25 dB para 64-QAM e as antenas das estações assinantes tiverem largura de feixe igual a 6° , o uso de modulação adaptativa possibilita que a capacidade aumente no enlace de descida por um fator de 2,7 e no enlace de subida por um fator de 1,4.

4.4.3. Escalabilidade no planejamento da capacidade

A Figura 4.17 apresenta um exemplo de um planejamento proposto em [53] que dá escalabilidade ao sistema. A sequência apresentada de configurações de células permite um aumento gradual da capacidade do sistema caso todos os requisitos especificados para o sistema sejam atendidos.

O operador iniciaria a operação com o espectro disponível dividido em 2 canais, células com 2 setores, cada setor utilizando um canal diferente com polarização diferente (fator de reuso igual a 1), como apresentado na Figura 4.17a. Posteriormente a capacidade pode ser aumentada através do aumento gradual do fator de reuso para 2, 4 e 8 mantendo as mesmas polarizações originais em cada

metade de cada célula conforme ilustrado nas Figuras 4.17b, 4.17c e 4.17d, respectivamente. Neste exemplo somente seriam necessárias alterações na estação base.

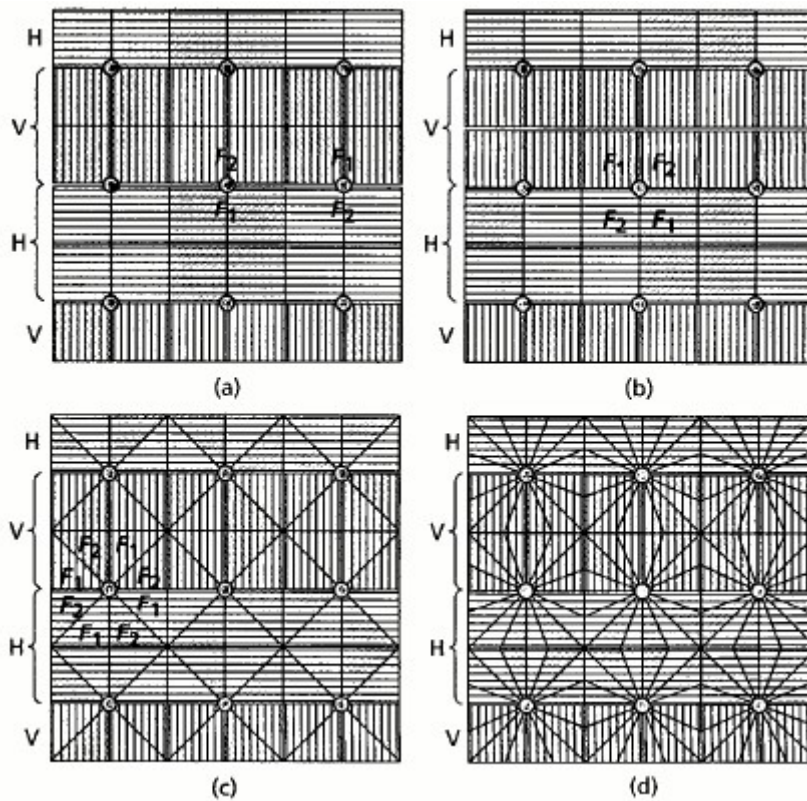


Figura 4.17 – Aumento gradual da capacidade [53]

Em situações reais o aumento de capacidade pode ser necessário em apenas algumas regiões de modo que a implementação do aumento do fator de reuso somente ocorreria nestas regiões e a estrutura não seria tão homogênea como mostrado na Figura 4.17. As células teriam quantidades diferentes de setores.

5 Metodologia de Planejamento

O planejamento de redes fixas de acesso sem fio em banda larga apresenta alguns desafios no caso de redes que irão operar em um mercado novo pois a empresa operadora se depara com algumas incertezas que têm impacto nas especificações para o planejamento. Entre tais incertezas é possível citar: os tipos de serviços para os quais existe demanda, a largura de banda requerida considerando os horários de maior utilização dos serviços pelos clientes e a localização geográfica específica dos clientes que podem requerer os serviços [57].

Algumas decisões devem ser tomadas pela operadora da rede antes de disponibilizar os serviços ao primeiro cliente [57] :

- determinar as regiões em que a operadora vai oferecer os serviços;
- quantificar os equipamentos e custos associados para o perfil determinado da rede;
- encontrar locais disponíveis em quantidade suficiente para instalação das estações base;
- determinar a quantidade de espectro requerida para a qual pode ser feita uma proposta de utilização junto aos órgãos regulatórios.

O processo de planejamento é mais interativo que hierárquico. Revisões do planejamento são frequentes para conciliar os aspectos técnicos com os aspectos mercadológicos, comerciais e financeiros. Isto leva a uma variedade grande de opções de configuração e requer uma grande flexibilidade no planejamento [57]. Cada configuração obtida para a rede deverá ser submetida a um processo de otimização que muitas vezes resultará em nova configuração reiniciando o processo.

O critério mais simples de otimização é a maximização do número de usuários cobertos pela rede mas, em uma rede com uma variedade de tipos de usuários e de tráfego, a cobertura não é necessariamente o melhor critério de

otimização [58]. A otimização pode ter como critério, por exemplo, a maximização das receitas ou a minimização dos custos da rede [58].

Não existe uma formulação analítica com uma sequência de equações [57] nem uma sequência única de ações. Além disto, existem algumas ações que interagem com outras ações. Por exemplo, a seleção dos locais para instalação das estações base será influenciada pelo custo e pelas necessidades de cobertura e de capacidade do sistema [59].

Os métodos e procedimentos usados no planejamento de grandes sistemas são algoritmos implementados através de *software*, principalmente quando é necessário o acesso eficiente a bancos de dados de topografia e edificações em alta resolução para a análise de visada direta, interferências e outros fatores [60].

5.1. Proposta de metodologia de planejamento

Considerando os aspectos técnicos, financeiros e comerciais, uma metodologia para planejamento de redes de acesso fixo sem fio em faixa larga operando em ambientes abertos é apresentada a seguir.

A lista de atividades está ilustrada no diagrama de blocos apresentado na Figura 5.1.

- Análise de mercado

O planejamento é iniciado por uma análise detalhada de mercado para que possam ser avaliados os benefícios da implantação e operação da rede em função dos custos da infra-estrutura necessária para implementá-la [57]. A realização desta análise, entretanto, requer a realização de atividades que estão descritas a seguir.

- Segmentação do mercado

A definição dos perfis de clientes desejados faz parte da análise de mercado. Perfis diferentes de clientes tais como usuários residenciais, pequenos negócios e escritórios, indústrias, médias e grandes empresas têm diferentes necessidades de recursos de telecomunicações. Para cada perfil de cliente é necessária uma

configuração mínima de infra-estrutura, cada qual com impacto diferente na configuração e nos custos da rede.

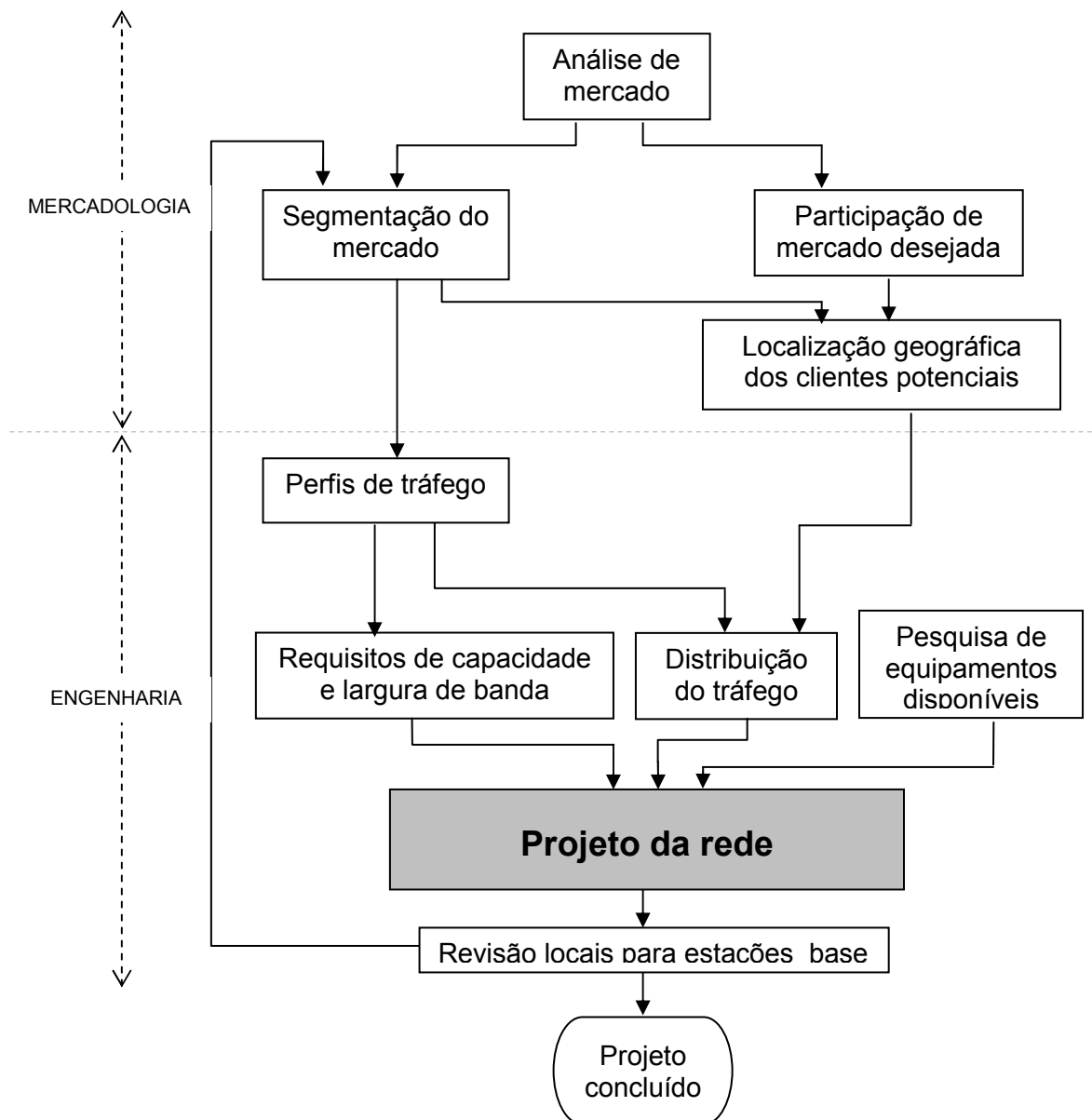


Figura 5.1 – Etapas principais do planejamento

As necessidades de recursos de telecomunicações devem ser estimadas da maneira mais precisa possível para se determinar os requisitos de largura de banda da rede [57]. A definição dos perfis de clientes desejados influi na capacidade a ser disponibilizada pela rede que é diretamente proporcional à largura de banda necessária para o sistema. Esta é diretamente proporcional ao custo para sua alocação. Estes fatores são diretamente relacionados e, dependendo de qual deles

for priorizado inicialmente no processo, os demais terão características que serão consequência da escolha feita.

- Localização e distribuição geográfica dos clientes potenciais

Definido o mercado-alvo, é necessário obter a localização geográfica dos clientes potenciais dentro da região de interesse. Isto requer análise de bancos de dados com informações sobre densidades populacionais e distribuição geográfica de negócios. Um edifício com escritórios de advocacia e contabilidade, por exemplo, pode ser de grande interesse para disponibilizar cobertura enquanto uma região com muitos depósitos e armazéns pode ter menor importância.

- Perfis de tráfego

Os sistemas baseados no padrão IEEE 802.16 suportam vários tipos de aplicações e se apresentam como uma alternativa de conexão aos sistemas cabeados baseados nas tecnologias CATV (TV a cabo) e DSL e às conexões para tráfego T1/E1 [3, 4]. Entre os clientes potenciais estarão residências, negócios de pequeno e médio porte tais como escritórios e lojas e pequenas e médias empresas [12]. Conexões que irão requerer larguras mínimas de faixa que possibilitem taxas de comunicação que podem superar 2 Mbps serão comuns [61, 62].

As aplicações podem ser ou não em tempo real e apresentam diferentes requisitos de largura de faixa. Uma classificação das aplicações e os valores de largura de faixa considerados como referência para tais aplicações são apresentados em [62] e estão descritos a seguir :

- Jogos interativos (50 a 85 kbps);
- Video-conferência e telefonia IP : VoIP (8 a 64 kbps) e videofone (32 a 384 kbps);
- Fluxo de mídia (*Streaming Media*) : inclui transferência de música (5 a 128 kbps), *videoclips* (20 a 394 kbps) e filmes (> 2 Mbps);
- Tecnologia da informação : mensagens instantâneas, navegação na WEB e correio eletrônico (nestes casos não há um requisito específico de largura de faixa uma vez que o tráfego de tais aplicações é de baixa prioridade, não necessita ser transmitido em tempo real e é transmitido em taxas de comunicação que variam de acordo com a disponibilidade da rede no momento da transmissão o que é denominado “*best effort*”);

- “*Download*” de conteúdo de mídia : filmes (> 1 Mbps) e P2P (não são em tempo real e são transmitidos com perfil “*best effort*”).

Alguns cenários de tráfego são apresentados em [61] que classifica os tipos de tráfego conforme a prioridade na rede, a garantia de não haver perdas de dados e a garantia de um valor de pico para a taxa de comunicação de bits durante a conexão.

Ainda em [61] são descritos modelos típicos de uso das aplicações por diferentes tipos de usuários em diferentes dias e horários da semana. Estes modelos permitem estimar o tráfego de cada tipo de usuário no horário de maior utilização da rede e possibilitam estimar a capacidade requerida por cada um nos enlaces de subida e descida.

A demanda estimada de tráfego para cada um dos diferentes tipos de clientes pode ser a base para a definição de perfis de serviços a serem ofertados com diferentes especificações de capacidade. Podem, por exemplo, ser definidas categorias de serviços com as seguintes taxas máximas de comunicação para cada assinante: 256 kbps, 640 kbps, 1 Mbps e 2 Mbps.

- Distribuição do tráfego no território a ser coberto

A informação que pode ser a principal referência para esta etapa do planejamento é a participação de mercado desejada pela empresa que irá oferecer os serviços. A partir do percentual de mercado almejado, da distribuição geográfica dos clientes potenciais e dos seus perfis de tráfego será possível estimar a distribuição de tráfego por toda a região a ser coberta e a capacidade requerida da rede.

É importante, entretanto que o planejamento seja executado de maneira que a capacidade disponível seja escalável, permitindo expansão do sistema com o mínimo de custo quando for necessário, conforme foi analisado na seção 4.4.

- Pesquisa dos equipamentos disponíveis de serem utilizados

É necessária uma pesquisa dos equipamentos (rádios e antenas) que estão disponíveis para serem utilizados no sistema com tecnologia IEEE 802.16 a ser implantado pois suas características são necessárias para o projeto da rede.

Nas especificações dos equipamentos de rádio disponíveis deverão ser analisadas características tais como: faixa de frequência de operação, potência

máxima de transmissão, potência mínima de recepção, figura de ruído, tipos de modulação disponíveis e larguras de canais utilizados. Nas especificações das antenas deverão ser analisados principalmente o ganho, o diagrama de irradiação e a isolação de polarização cruzada tanto para as antenas das estações base quanto para as antenas das estações assinantes.

Os custos também deverão ser considerados nesta etapa.

- Projeto da rede

O projeto da rede inclui diversas ações, parte das quais envolvem aspectos comuns ou que são inter-relacionados.

Fazem parte desta etapa, entre outras atividades, a análise de visibilidade, a priorização dos locais pré-selecionados para instalação das estações base, o cálculo do raio máximo das células para os locais escolhidos, a previsão de cobertura, o planejamento de frequências e de setorização, o planejamento de capacidade e a especificação dos equipamentos a serem utilizados.

A seção 5.2 analisa em detalhes o projeto de rede e a seção 5.2.4 apresenta uma metodologia para o projeto de rede analisando todas estas etapas do processo.

- Revisão dos locais candidatos a estações base

Durante o projeto da rede pode ser necessária uma revisão dos locais pré-selecionados incluindo novos locais se os requisitos do sistema não puderem ser atingidos com os locais pré-selecionados ou excluindo alguns locais se os requisitos puderem ser atingidos com uma infra-estrutura menor.

Aspectos comerciais e financeiros também podem alterar a lista de locais devido à inclusão ou exclusão de clientes potenciais [57].

O processo de revisão deverá ocorrer até que se tenha a configuração que atende a todos os requisitos técnicos e mercadológicos especificados, minimize os custos e maximize as receitas previstas.

5.2. Projeto de rede

5.2.1. Raio das células em sistemas baseados no padrão IEEE 802.16

O raio máximo das células pode ser estimado a partir das características dos equipamentos a serem utilizados, das características climatológicas da região onde o sistema irá operar, do nível de interferência a que a célula estará sujeita e das especificações do sistema (requisitos de relação sinal/ruído, tipo de modulação, frequência a ser utilizada, largura dos canais, disponibilidade e taxa máxima de erro de bits (BER)).

Alguns destes parâmetros são especificados para o sistema, outros, entretanto, são calculados a partir destas especificações.

A perda máxima de propagação é um dos parâmetros necessários para a determinação do raio máximo das células e pode ser calculada pela expressão na Equação 5.1.

$$L_{max\ prop} = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - P_r\ limiar \quad (5.1)$$

Onde P_t (dBm) é a potência transmitida

G_t (dB) é o ganho da antena de transmissão

G_r (dB) é o ganho da antena de recepção

L_t (dB) é a perda de alimentação no transmissor

L_r (dB) é a perda de alimentação no receptor

$P_r\ limiar$ (dBm) é o nível limiar de potência do receptor

O nível limiar de potência de recepção leva em consideração a sensibilidade do receptor e os níveis de ruído e de interferência a que o receptor está sujeito.

Se não existisse interferência, o nível limiar de potência de recepção poderia ser calculado conforme descrito a seguir.

Para viabilizar a operação de um sistema de comunicação sem fio é necessário que seja atendido um requisito mínimo de relação sinal/ruído. Este requisito é definido como :

$$\Delta = \left(\frac{S}{N}\right)_{req} = \frac{P_{r\ min}}{N} \quad (5.2)$$

Onde $P_{r\ min}$ é a potência mínima de sinal no receptor que atende ao requisito especificado

N é o ruído total a que o sinal recebido está sujeito

O requisito de relação sinal/ruído Δ pode ser definido ainda de outra maneira [56].

$$\Delta = \left(\frac{S}{N}\right)_{req} = \left(\frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{R}{W}\right)_{req} \quad (5.3)$$

Onde E_b é a energia por bit

N_0 é a densidade espectral de potência de ruído

R é a taxa de comunicação

W é largura de faixa ocupada pelo sinal

A razão R/W representa a eficiência de uso da largura de faixa e depende do tipo de modulação utilizada e do requisito de taxa de erro de bits (BER) desejado. Sendo assim, o requisito mínimo de relação sinal/ruído depende também destas características do sistema.

O ruído total a que o sinal recebido está sujeito é composto por um ruído térmico que se origina nas perdas de acoplamento entre antena e receptor e nos primeiros estágios do receptor tendo sua potência calculada pela expressão da Equação 5.4 [56] e por um ruído gerado no receptor que é descrito pelo parâmetro denominado figura de ruído do receptor (F) que é calculado pela razão entre a relação sinal/ruído na entrada do receptor e a relação sinal/ruído na saída do receptor. Este parâmetro mostra o quanto a relação sinal/ruído é degradada no receptor [56].

$$N_{termico} = k T W \quad (5.4)$$

Onde k é constante de Boltzmann : $1,38 \times 10^{-23}$ W/K-Hz

T (K) é a temperatura

W (Hz) é a largura de faixa do canal utilizado

O ruído total N em dB a que o sinal recebido está sujeito é calculado por :

$$N(\text{dBm}) = -114 + 10 \log W(\text{MHz}) + F(\text{dB}) \quad (5.5)$$

Onde F (dB) é a figura de ruído do receptor

A Equação 5.2 pode ser expressa em dB da seguinte forma :

$$\Delta(\text{dB}) = \left(\frac{S}{N}\right)_{req} (\text{dB}) = P_{r\ min}(\text{dBm}) - N(\text{dBm}) \quad (5.6)$$

A partir da Equações 5.5 e 5.6 a potência mínima no receptor para atender ao requisito especificado Δ de relação sinal/ruído sem considerar os efeitos das interferências pode ser calculada como :

$$P_{r\ min}(\text{dBm}) = \Delta(\text{dB}) - 114 + 10 \log W(\text{MHz}) + F(\text{dB}) \quad (5.7)$$

O padrão IEEE 802.16 [12] especifica os valores de $P_{r\ min}$ para as estações assinantes para cada tipo de modulação conforme a especificação de taxa de erro de bits (BER). Os valores especificados estão apresentados na Tabela 5.1. Para as estações base o padrão recomenda que sejam usados os mesmos requisitos de desempenho apresentados.

Tabela 5.1 – Valores mínimos de potência no receptor em dBm para cada tipo de modulação conforme especificação de taxa de erro de bits (BER) [12]

| Tipo de modulação | $P_{r\ min}$ para BER = 1×10^{-3} | $P_{r\ min}$ para BER = 1×10^{-6} |
|-------------------|---|---|
| QPSK | $-94 + 10 \log R_S$ | $-90 + 10 \log R_S$ |
| 16-QAM | $-87 + 10 \log R_S$ | $-83 + 10 \log R_S$ |
| 64-QAM | $-79 + 10 \log R_S$ | $-74 + 10 \log R_S$ |

Obs.: R_S é a taxa de símbolos e seu valor depende da largura de canal utilizada conforme foi apresentado na seção 4.4.

As interferências, entretanto, são inevitáveis neste tipo de sistema conforme já foi estudado em seções anteriores. Sendo assim, na determinação do raio das células é necessário levar em consideração o nível máximo de interferência que

uma estação receptora pode suportar no pior caso (quando está no limite da área de cobertura de uma célula e existe chuva no percurso do enlace) sem que a comunicação seja inviabilizada. O nível da relação entre a potência do sinal e a potência do ruído mais as interferências ($S/(N+I)$) tem efeito na determinação do raio máximo de uma célula.

A potência mínima no receptor $P_r \text{ limiar}$ considerando a existência de interferências deve atender ao mesmo requisito Δ especificado para que a comunicação possa ser estabelecida para a taxa de erro de bits (BER) especificada.

$$\Delta = \left(\frac{S}{N+I} \right)_{req} = \frac{P_r \text{ limiar}}{N+I} \quad (5.8)$$

$$P_r \text{ limiar} (dBm) = \Delta (dB) + 10 \log \left(10^{\frac{N(dBm)}{10}} + 10^{\frac{I(dBm)}{10}} \right) \quad (5.9)$$

Utilizando a Equação 5.6, temos :

$$P_r \text{ limiar} (dBm) = P_r \text{ min} (dBm) + 10 \log \left(10^{\frac{N(dBm)}{10}} + 10^{\frac{I(dBm)}{10}} \right) - N(dBm) \quad (5.10)$$

Onde $N(dBm)$ é calculado pela expressão da Equação 5.5

Como a perda máxima de propagação calculada através da Equação 5.1 ocorre devido às causas estudadas no Capítulo 3, podemos escrever :

$$L_{max \text{ prop}} = A_{total} \quad (5.11)$$

A atenuação total é calculada através da Equação 3.18 que está apresentada novamente a seguir.

$$A_{total} (dB) = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d + A_{gv} + A_{ch} \quad (5.12)$$

Onde d (km) é a distância do enlace

f (GHz) é frequência de operação

A_{gv} (dB) é a atenuação causada por gases atmosféricos e vapor de água

A_{ch} (dB) é a atenuação causada por chuvas

Substituindo as Equações 5.1 e 5.12 na Equação 5.11, temos :

$$\begin{aligned} P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - P_{r \text{ limiar}} &= \\ &= 92,44 + 20 \log f + 20 \log d + A_{gv} + A_{ch} \end{aligned} \quad (5.13)$$

A atenuação por gases atmosféricos e vapor d'água é estimada através da Equação 3.1. A atenuação por chuvas pode ser estimada pelo método Pérez-Mello através da Equação 3.16.

Substituindo as Equações 3.1, 3.16 e 5.10 na Equação 5.13, temos :

$$\begin{aligned} P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - P_{r \text{ min}} - 10 \log(10^{\frac{N}{10}} + 10^{\frac{I}{10}}) + \\ + N &= 92,44 + 20 \log f + 20 \log d + \gamma_{gv} \cdot d + \\ + 3,445 \cdot k \cdot R_p^{(\alpha - 0,369 + \frac{0,115}{d})} \cdot d^{0,836} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Onde P_t (dBm) é a potência transmitida

G_t (dB) é o ganho da antena de transmissão

G_r (dB) é o ganho da antena de recepção

L_t (dB) é a perda de alimentação no transmissor

L_r (dB) é a perda de alimentação no receptor

$P_{r \text{ min}}$ (dBm) é o nível mínimo de potência de sinal no receptor para uma dada especificação de taxa de erro de bits (BER) e para um dado tipo de modulação

N (dBm) é calculado pela expressão da Equação 5.5

I (dBm) é a potência total dos sinais interferentes

f (GHz) é frequência de operação

d (km) é a distância máxima de um enlace ou seja, o raio máximo da célula

γ_{gv} (dB/km) é a atenuação específica por quilômetro obtida a partir da recomendação ITU-R P.676 [25]

R_p (mm/h) é a taxa de chuvas na região do enlace para um determinado percentual de tempo p

k e α são parâmetros relacionados com a frequência de operação e com o tipo de polarização utilizado. Estes parâmetros são obtidos através da recomendação ITU-R 838 [34].

Resolvendo a Equação 5.14 numericamente para d , teremos o valor do raio máximo da célula em quilômetros.

Se o método do ITU for utilizado para estimativa da atenuação por chuvas a Equação 3.10 se aplica para regiões localizadas em latitudes inferiores a 30° (norte ou sul) enquanto a Equação 3.9 se aplica para latitudes superiores a 30° (norte ou sul). Nestes casos, a distância d é calculada resolvendo numericamente a Equações 5.15 e 5.16, respectivamente.

$$\begin{aligned} P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - P_{r\min} - 10 \log \left(10^{\frac{N}{10}} + 10^{\frac{I}{10}} \right) + \\ + N = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d + \gamma_{gv} \cdot d + \\ + 0,07 \cdot k \cdot R_p^\alpha \cdot d \cdot r \cdot p^{-(0,855 + 0,139 \log p)} \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - P_{r\min} - 10 \log \left(10^{\frac{N}{10}} + 10^{\frac{I}{10}} \right) + \\ + N = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d + \gamma_{gv} \cdot d + \\ + 0,12 \cdot k \cdot R_p^\alpha \cdot d \cdot r \cdot p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Onde r (km) é o fator de encurtamento da distância e é calculado pela expressão da Equação 3.6.

As demais variáveis são as mesmas utilizadas na Equação 5.14

Em condições de céu claro o raio máximo das células pode ser calculado resolvendo numericamente para d a Equação 5.17.

$$\begin{aligned} P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - P_{r\min} - 10 \log \left(10^{\frac{N}{10}} + 10^{\frac{I}{10}} \right) + \\ + N = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d + \gamma_{gv} \cdot d \end{aligned} \quad (5.17)$$

Como o raio máximo da célula depende do valor mínimo de potência recebida especificado para os equipamentos e este valor depende do tipo de modulação utilizada, o raio máximo da célula varia conforme o tipo de modulação. A partir dos valores apresentados na Tabela 5.1 é possível concluir que o raio máximo da célula será maior para modulação QPSK e menor para modulação 64-QAM o que será demonstrado a seguir através de algumas simulações.

É possível calcular o raio máximo das células em condições de céu claro e de chuvas para cada um dos 3 tipos de modulação utilizadas pela tecnologia IEEE 802.16 considerando valores típicos de especificações de equipamentos apresentados pelo IEEE em [11].

A Tabela 5.2 apresenta os valores dos parâmetros utilizados para os cálculos.

Tabela 5.2 – Parâmetros de um sistema IEEE 802.16 no enlace de descida

| Parâmetro do sistema | | Valor |
|----------------------|----------------------------------|------------|
| P_T | Potência transmitida na BS [11] | +24 dBm |
| G_T | Ganho da antena da BS [11] | 19 dBi |
| G_R | Ganho da antena da SS [11] | 34 dBi |
| L_T | Perdas na BS [60] | 3 dB |
| L_R | Perdas na SS [60] | 3 dB |
| W | Largura de faixa do canal [12] | 28 MHz |
| R_s | Taxa de símbolos [12] | 22,4 Mbaud |
| N | Potência do ruído | -93,5 dBm |
| F | Figura de ruído do receptor [11] | 6 dB |
| f | Frequência de operação [12] | 10-66 GHz |

A partir destes parâmetros e dos requisitos mínimos de potência de recepção especificados pelo IEEE em [12] e apresentados na Tabela 5.1, teremos os níveis mínimos de potência recebida pelas estações assinantes apresentados na Tabela 5.3 conforme os requisitos de taxa de erro de bits e tipo de modulação utilizada.

Tabela 5.3 – Potência mínima de no receptor da estação assinante de um sistema IEEE 802.16.

| Taxa de erro de bits (BER) | $P_{r \min}$ (dBm) | | |
|----------------------------|--------------------|--------|--------|
| | QPSK | 16-QAM | 64-QAM |
| 10^{-6} | -76,5 | -69,5 | -60,5 |
| 10^{-3} | -80,5 | -73,5 | -65,5 |

O nível máximo de interferência a que o receptor pode estar submetido depende dos requisitos mínimos de relação $S/(N+I)$ que cada tipo de modulação necessita. Para uma taxa de erro de bits de 10^{-6} estes requisitos foram apresentados em [50]. Para uma taxa de erro de bits de 10^{-3} foi considerado, a partir de análise de gráficos apresentados em [56], um requisito mínimo 3 dB menor que o requisito necessário para uma taxa de erro de bits igual a 10^{-6} . Os valores dos requisitos mínimos estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Requisitos mínimos de relação $S/(N+I)$.

| Taxa de erro de bits (BER) | $S/(N+I)_{req}$ (dB) | | |
|----------------------------|----------------------|--------|--------|
| | QPSK | 16-QAM | 64-QAM |
| 10^{-6} | 13,3 | 20,3 | 26,4 |
| 10^{-3} | 10,3 | 17,3 | 23,4 |

Considerando os requisitos mínimos de relação $S/(N+I)$ apresentados, os valores máximos da potência de interferência a que o receptor de uma estação assinante localizada no limite de uma célula pode estar sujeito estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Níveis máximos de interferência em dBm no limiar do receptor de uma estação assinante.

| Taxa de erro de bits (BER) | I (dBm) | | |
|----------------------------|---------|--------|--------|
| | QPSK | 16-QAM | 64-QAM |
| 10^{-6} | -92,2 | -92,2 | -88,8 |
| 10^{-3} | -94,1 | -94,1 | -90,7 |

5.2.1.1.Cálculo do raio máximo das células (céu claro)

Resolvendo numericamente a Equação 5.17 para valores de frequências entre 10 e 66 GHz, teremos os raios máximos de célula apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7 dependendo do requisito especificado para a taxa de erro de bits e do tipo de modulação utilizado. Além dos valores máximos do raio, estas tabelas mostram os valores de atenuação específica causada por gases atmosféricos e vapor d'água A_{gv} [25] cuja influência é mais intensa nas frequências próximas de 60 GHz o que pode ser observado nos gráficos apresentados na Figura 5.2.

Tabela 5.6 – Raio máximo das células em condições de céu claro para BER = 10^{-6} .

| Frequência (GHz) | A_{gv} (dB/km) | Raio da célula (km) | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|--------|--------|
| | | QPSK | 16-QAM | 64-QAM |
| 10 | 0,013 | 35,0 | 16,1 | 4,2 |
| 15 | 0,035 | 22,5 | 10,5 | 2,8 |
| 20 | 0,1 | 15,4 | 7,5 | 2,0 |
| 25 | 0,12 | 12,4 | 6,1 | 1,6 |
| 30 | 0,09 | 11,0 | 5,2 | 1,4 |
| 35 | 0,12 | 9,3 | 4,4 | 1,2 |
| 40 | 0,13 | 8,2 | 3,9 | 1,0 |
| 45 | 0,2 | 7,0 | 3,4 | 0,9 |
| 50 | 0,3 | 6,0 | 3,0 | 0,8 |
| 55 | 10 | 1,4 | 1,0 | 0,5 |
| 60 | 14 | 1,1 | 0,8 | 0,4 |
| 66 | 1 | 3,7 | 2,0 | 0,6 |

Tabela 5.7 – Raio máximo das células em condições de céu claro para BER = 10⁻³.

| Frequência (GHz) | A _{gv} (dB/km) | Raio da célula (km) | | |
|------------------|-------------------------|---------------------|--------|--------|
| | | QPSK | 16-QAM | 64-QAM |
| 10 | 0,013 | 59,9 | 28,1 | 9,2 |
| 15 | 0,035 | 37,5 | 18,1 | 6,1 |
| 20 | 0,1 | 24,7 | 12,6 | 4,4 |
| 25 | 0,12 | 19,9 | 10,2 | 3,6 |
| 30 | 0,09 | 18,1 | 8,9 | 3,0 |
| 35 | 0,12 | 15,2 | 7,5 | 2,6 |
| 40 | 0,13 | 13,4 | 6,6 | 2,3 |
| 45 | 0,2 | 11,2 | 5,7 | 2,0 |
| 50 | 0,3 | 9,5 | 4,9 | 1,8 |
| 55 | 10 | 1,7 | 1,3 | 0,7 |
| 60 | 14 | 1,3 | 1,0 | 0,6 |
| 66 | 1 | 5,4 | 3,1 | 1,2 |

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410285/CA

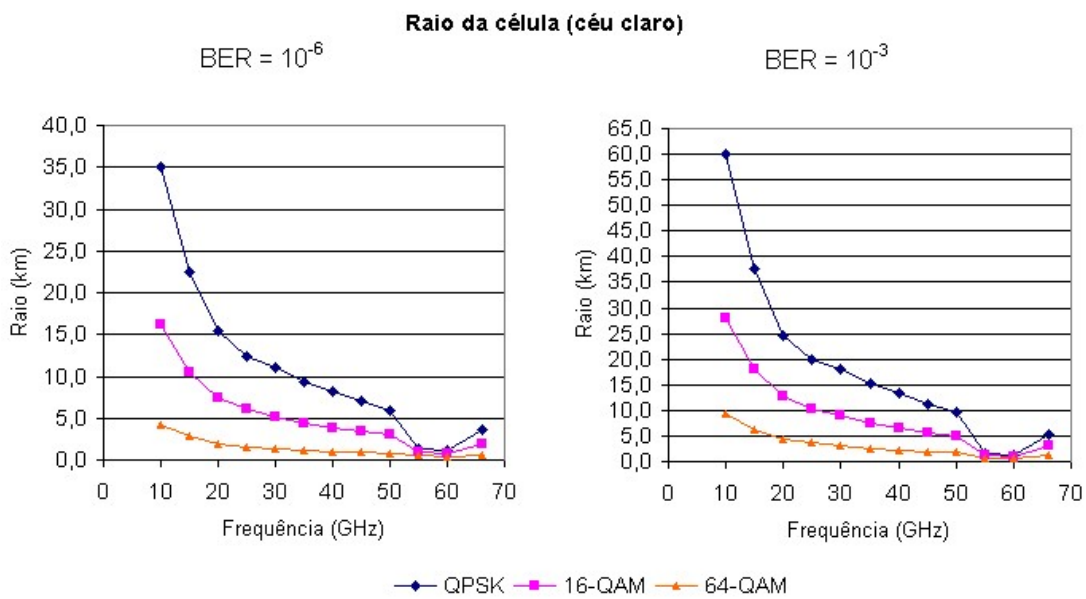


Figura 5.2 – Raio máximo das células em condições de céu claro

A Figura 5.3 apresenta uma célula em condições de céu claro com a ilustração das áreas cobertas com cada tipo de modulação.

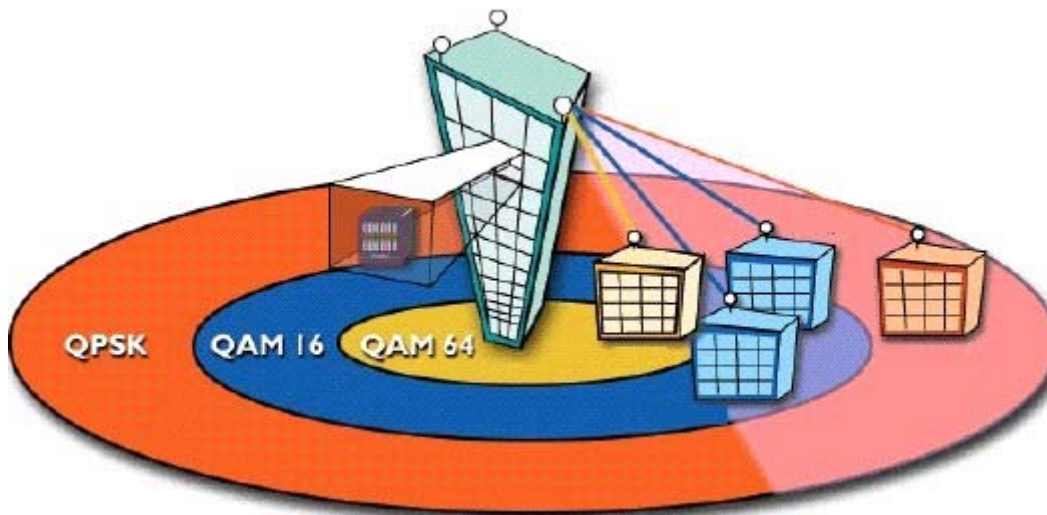


Figura 5.3 – Regiões da célula com cada tipo de modulação.

5.2.1.2. Cálculo do raio máximo das células em condições de chuvas

Algumas simulações de cálculo do raio das células foram realizadas incluindo o efeito das chuvas em regiões com climas diferentes, cada qual representado pelas seguintes cidades :

- temperado : Paris, Turim e Estocolmo;
- tropical de altitude : São Paulo, Brasília;
- tropical marítimo : Rio de Janeiro;
- clima equatorial : Belém.

Os valores das taxas de chuvas nestas cidades estão apresentados na Tabela 5.8 conforme os percentuais de tempo em que podem ser excedidas. Os dados referentes às cidades de clima temperado estão descritos em [63] e os dados referentes às cidades de climas tropical e equatorial em [64].

Os cálculos de raio das células foram realizados para as cidades mencionadas em frequências entre 10 e 66 GHz, 3 tipos de modulação (QPSK, 16-QAM e 64-QAM), 3 requisitos de disponibilidade (99,999%, 99,99% e 99,9%)

e 2 requisitos de taxa de erro de bits (10^{-6} e 10^{-3}) utilizando os métodos Pérez-Mello e ITU.

Tabela 5.8 – Taxas de chuvas das cidades analisadas.

| Cidade | Taxa de chuvas R_p (mm/h) | | |
|-------------------------|-----------------------------|-------|------|
| | 0,001% | 0,01% | 0,1% |
| São Paulo e Brasília | 148 | 81 | 26 |
| Rio de Janeiro | 143 | 78 | 22 |
| Belém | 176 | 115 | 53 |
| Paris | 90 | 33 | 8 |
| Turim | 110 | 50 | 8 |
| Estocolmo | 70 | 23 | 6 |

Foram observados valores próximos para raios de células em cidades de mesmo clima. Sendo assim, estão apresentados os valores calculados apenas de uma cidade de cada clima (temperado, tropical e equatorial). As cidades escolhidas foram Paris, Rio de Janeiro e Belém e os valores calculados estão apresentados nas Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11, respectivamente.

Tabela 5.9 – Raio máximo das células em condições de chuvas (Paris)

| Freq. (GHz) | Método | QPSK | | | | | | 16-QAM | | | | | | 64-QAM | | | | | |
|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 99,999% | | 99,99% | | 99,9% | | 99,999% | | 99,99% | | 99,9% | | 99,999% | | 99,99% | | 99,9% | |
| | | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} |
| 10 | PérezMello | 7,7 | 9,9 | 13,5 | 18,3 | 23,2 | 34,4 | 5,2 | 6,9 | 8,3 | 11,9 | 12,5 | 19,6 | 2,2 | 3,7 | 3,0 | 5,7 | 3,8 | 7,8 |
| | ITU | 8,4 | 11,0 | 13,9 | 19,8 | 22,2 | 35,0 | 5,6 | 7,5 | 8,3 | 12,0 | 11,7 | 18,5 | 2,4 | 4,1 | 3,1 | 5,6 | 3,6 | 7,3 |
| 20 | PérezMello | 2,3 | 3,0 | 4,1 | 5,3 | 7,4 | 10,0 | 1,6 | 2,1 | 2,7 | 3,7 | 4,5 | 6,4 | 0,6 | 1,1 | 1,1 | 1,9 | 1,6 | 3,0 |
| | ITU | 2,4 | 3,0 | 4,1 | 5,2 | 7,1 | 9,8 | 1,8 | 2,2 | 2,8 | 3,7 | 4,4 | 6,2 | 0,9 | 1,4 | 1,2 | 2,1 | 1,6 | 3,0 |
| 30 | PérezMello | 1,2 | 1,6 | 2,2 | 2,9 | 4,0 | 5,3 | 0,7 | 1,1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,5 | | | 0,6 | 1,0 | 0,9 | 1,7 |
| | ITU | 1,4 | 1,7 | 2,4 | 2,9 | 4,2 | 5,6 | 1,1 | 1,3 | 1,7 | 2,2 | 2,7 | 3,7 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 1,3 | 1,0 | 1,9 |
| 40 | PérezMello | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 1,9 | 2,6 | 3,5 | | 0,6 | 0,9 | 1,3 | 1,7 | 2,3 | | | | 0,6 | 0,6 | 1,2 |
| | ITU | 1,0 | 1,2 | 1,7 | 2,1 | 3,0 | 4,0 | 0,8 | 0,9 | 1,2 | 1,6 | 1,9 | 2,7 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 0,8 | 1,4 |
| 50 | PérezMello | | 0,7 | 1,1 | 1,4 | 1,9 | 2,5 | | | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 1,7 | | | | 0,4 | 0,5 | 0,9 |
| | ITU | 0,8 | 1,0 | 1,4 | 1,7 | 2,4 | 3,1 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 2,1 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 1,1 |
| 66 | PérezMello | | | 0,7 | 1,0 | 1,3 | 1,7 | | | | 0,6 | 0,9 | 1,2 | | | | | 0,3 | 0,6 |
| | ITU | 0,7 | 0,8 | 1,1 | 1,3 | 1,8 | 2,3 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,6 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,5 | 0,8 |

Tabela 5.10 – Raio máximo das células em condições de chuvas (Rio de Janeiro)

| Freq. (GHz) | Método | QPSK | | | | | | 16-QAM | | | | | | 64-QAM | | | | | |
|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 99,999% | | 99,99% | | 99,9% | | 99,999% | | 99,99% | | 99,9% | | 99,999% | | 99,99% | | 99,9% | |
| | | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} |
| 10 | PérezMello | 5,7 | 7,1 | 8,4 | 10,9 | 16,3 | 22,6 | 3,9 | 5,1 | 5,6 | 7,6 | 9,7 | 14,1 | 1,7 | 2,9 | 2,3 | 4,0 | 3,3 | 6,4 |
| | ITU | 4,6 | 8,4 | 8,6 | 11,9 | 16,9 | 27,1 | 3,3 | 5,7 | 5,5 | 7,6 | 9,2 | 14,6 | 1,7 | 3,2 | 2,3 | 3,9 | 3,1 | 6,1 |
| 20 | PérezMello | 1,7 | 2,1 | 2,6 | 3,2 | 5,0 | 6,5 | 1,1 | 1,5 | 1,7 | 2,3 | 3,2 | 4,4 | 0,4 | 0,7 | 0,7 | 1,2 | 1,3 | 2,3 |
| | ITU | 1,3 | 2,2 | 2,4 | 2,9 | 4,7 | 6,5 | 1,0 | 1,7 | 1,7 | 2,2 | 3,1 | 4,3 | 0,6 | 1,1 | 0,9 | 1,3 | 1,3 | 2,3 |
| 30 | PérezMello | 0,7 | 1,0 | 1,3 | 1,7 | 2,7 | 3,5 | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | | | 0,5 | 0,7 | 1,2 | | |
| | ITU | 0,8 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 2,7 | 3,5 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 1,8 | 2,5 | 0,4 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 0,8 | 1,4 |
| 40 | PérezMello | | | 0,8 | 1,1 | 1,8 | 2,3 | | | 0,7 | 1,2 | 1,6 | | | | | 0,4 | 0,8 | |
| | ITU | 0,6 | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,9 | 2,6 | 0,4 | 0,7 | 0,7 | 0,9 | 1,3 | 1,8 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 1,0 |
| 50 | PérezMello | | | 0,5 | 0,8 | 1,3 | 1,7 | | | 0,8 | 1,2 | | | | | | 0,6 | | |
| | ITU | 0,5 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,6 | 2,1 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,8 |
| 66 | PérezMello | | | | | 0,9 | 1,2 | | | 0,6 | 0,8 | | | | | | 0,3 | | |
| | ITU | 0,4 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1,3 | 1,7 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,9 | 0,7 |

Tabela 5.11 – Raio máximo das células em condições de chuvas (Belém)

| Freq. (GHz) | Método | QPSK | | | | | | 16-QAM | | | | | | 64-QAM | | | | | |
|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 99,999% | | 99,99% | | 99,9% | | 99,999% | | 99,99% | | 99,9% | | 99,999% | | 99,99% | | 99,9% | |
| | | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-3} |
| 10 | PérezMello | 4,9 | 6,1 | 6,6 | 8,3 | 10,6 | 13,9 | 3,4 | 4,4 | 4,5 | 5,9 | 6,8 | 9,4 | 1,5 | 2,5 | 2,0 | 3,3 | 2,7 | 4,8 |
| | ITU | 3,0 | 5,3 | 5,9 | 7,8 | 13,1 | 20,6 | 2,2 | 3,8 | 3,9 | 5,3 | 7,4 | 11,4 | 1,2 | 2,3 | 1,8 | 2,9 | 2,7 | 5,1 |
| 20 | PérezMello | 1,4 | 1,8 | 2,0 | 2,5 | 3,2 | 4,1 | 0,9 | 1,2 | 1,3 | 1,8 | 2,2 | 2,9 | | | 0,9 | 0,9 | 1,6 | |
| | ITU | 1,0 | 1,6 | 1,8 | 2,2 | 3,8 | 5,1 | 0,8 | 1,2 | 1,3 | 1,7 | 2,5 | 3,5 | 0,5 | 0,8 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,9 |
| 30 | PérezMello | | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 1,7 | 2,2 | | | 0,8 | 1,1 | 1,5 | | | | | 0,8 | | |
| | ITU | 0,6 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 2,3 | 3,0 | 0,5 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,6 | 2,1 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,7 | 1,2 |
| 40 | PérezMello | | | 0,8 | 1,1 | 1,5 | | | | 0,7 | 1,0 | | | | | | | | |
| | ITU | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,7 | 2,2 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,9 |
| 50 | PérezMello | | | | | 0,8 | 1,1 | | | 0,7 | | | | | | | | | |
| | ITU | 0,4 | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 1,7 | 2,2 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,9 |
| 66 | PérezMello | | | | | 0,5 | 0,8 | | | | | | | | | | | | |
| | ITU | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1,1 | 1,5 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,1 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,6 |

Foi observado que no caso do método Pérez-Mello não foi possível resolver numericamente a Equação 5.14 para distâncias menores que aproximadamente 0,5 km, motivo pelo qual existem campos que não foram preenchidos nas tabelas de raio de células. Sendo assim, todos os gráficos que estão apresentados foram obtidos de simulações realizadas com o método do ITU para estimativa de atenuação por chuvas.

Os valores apresentados nas Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11 mostram o grande impacto que as chuvas têm na cobertura de sistemas baseados na tecnologia IEEE 802.16. Em regiões com altos índices de chuvas o uso da modulação 64-QAM, que tem a melhor eficiência espectral dentre os tipos utilizados nesta tecnologia,

somente é possível caso sejam aceitos requisitos inferiores de disponibilidade e taxa maiores de erro de bits. No caso de Belém, se forem utilizadas frequências superiores a 30 GHz, a distância máxima com cobertura deste tipo de modulação será inferior a 1 km.

Com base nas simulações realizadas, é possível verificar o efeito que alguns parâmetros têm individualmente no tamanho das células. Estes parâmetros são: tipo de modulação, disponibilidade, clima e taxa de erros de bits.

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam gráficos que mostram o efeito do tipo de clima no raio máximo das células para cada tipo de modulação quando são mantidos fixos os demais parâmetros do sistema.

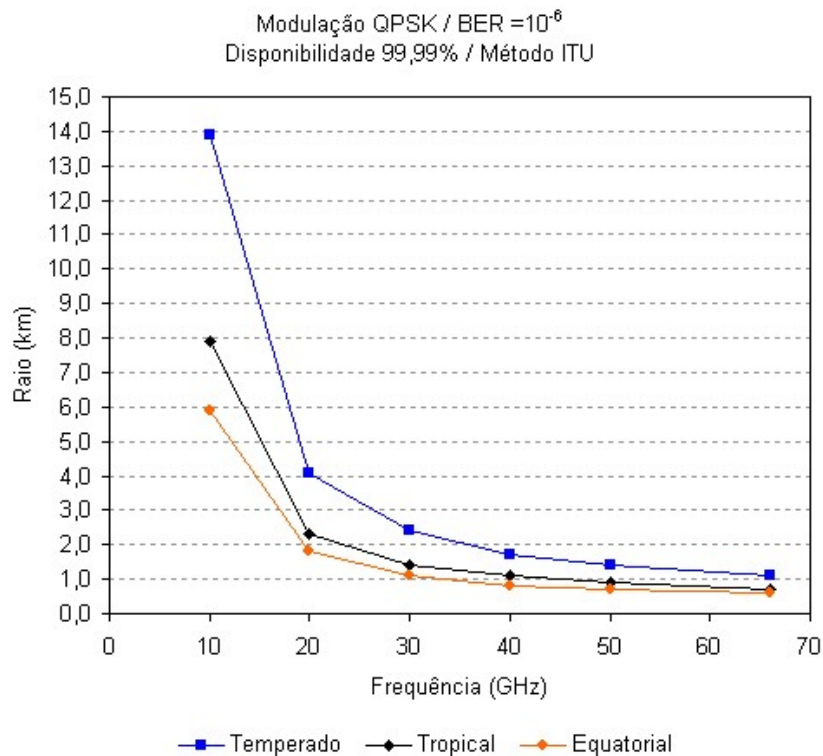


Figura 5.4 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (QPSK)

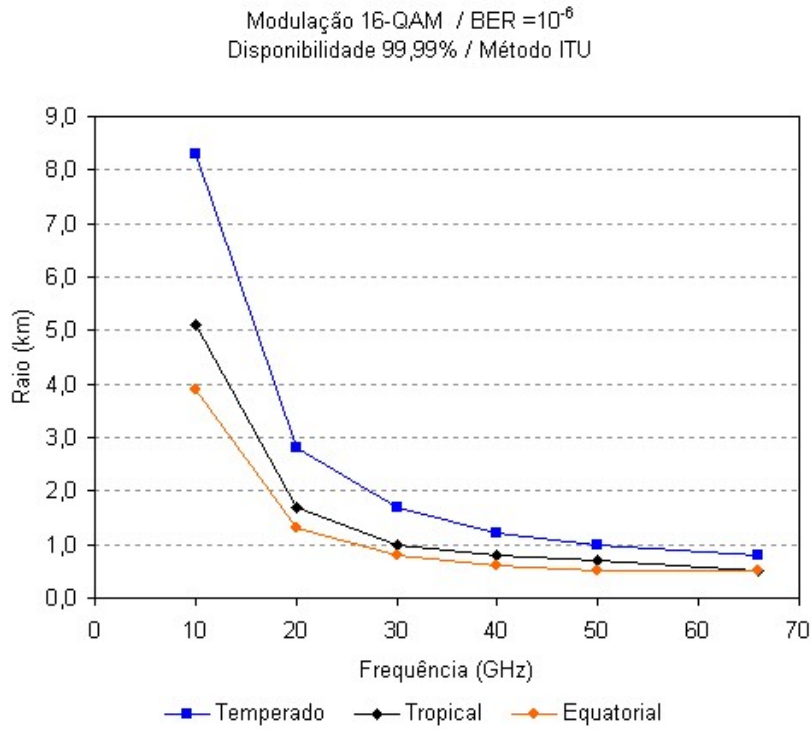


Figura 5.5 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (16-QAM)

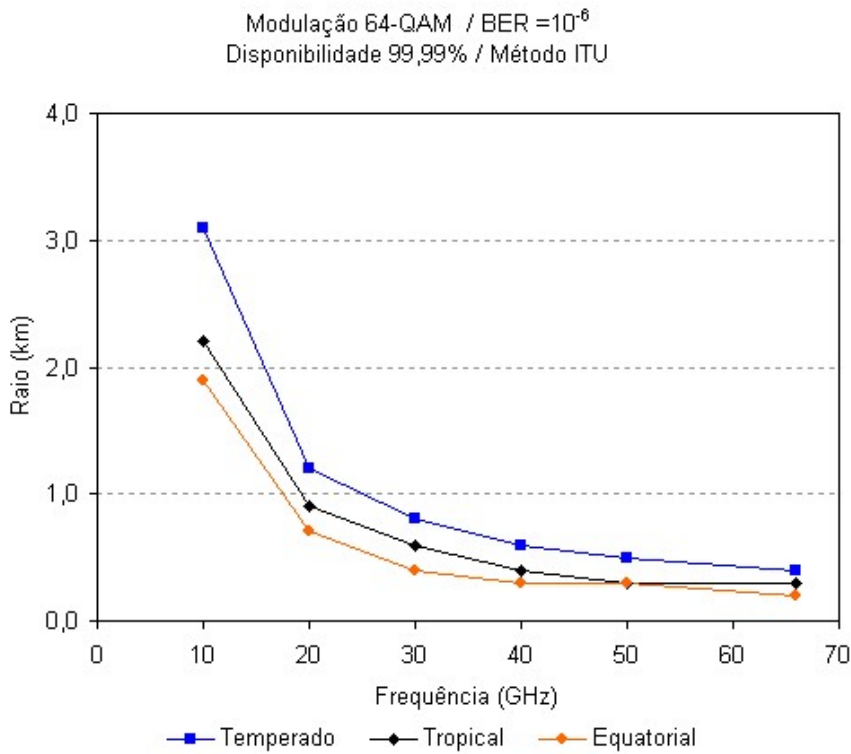


Figura 5.6 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (64-QAM)

O gráfico da Figura 5.7 mostra o efeito do requisito especificado de disponibilidade no raio máximo da célula em cada um dos 3 tipos de modulação.

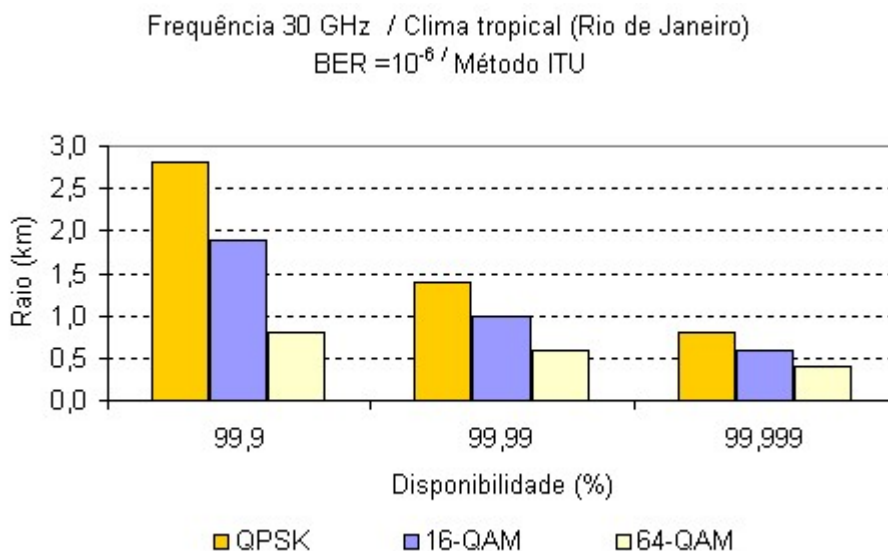


Figura 5.7 – Efeito da especificação da disponibilidade no raio máximo da célula em condições de chuvas

O exemplo apresentado na Figura 5.7 mostra que se for especificado um requisito de disponibilidade de 99,999% para um sistema operando na cidade do Rio de Janeiro na frequência de 30 GHz, o raio máximo da célula será de 0,8 km. Este nível de disponibilidade significa que apenas em cerca de 5 minutos durante um ano o sistema estaria indisponível. Um sistema com estas características terá um custo muito alto devido ao grande número de estações base necessárias para cobrir uma região extensa. Dependendo das aplicações para as quais o sistema se destina talvez seja mais aconselhável uma disponibilidade menor, por exemplo, 99,99% que implica em aproximadamente 53 minutos de indisponibilidade no período de um ano.

A influência da especificação da taxa de erro de bits e do tipo de modulação é apresentada através do gráfico da Figura 5.8.

O gráfico da Figura 5.8 é útil para mostrar que a busca pela melhor configuração de especificações para um sistema depende da frequência de operação e do que se quer priorizar. Se a prioridade for maximizar a área da célula e maximizar a capacidade disponível, é necessário operar com uma taxa de erro de

bits maior caso a frequência de operação seja igual ou inferior a 30 GHz. Se a frequência de operação for superior a 30 GHz, não há diferença significativa no raio da célula entre as 2 especificações de taxa de erro de bits.

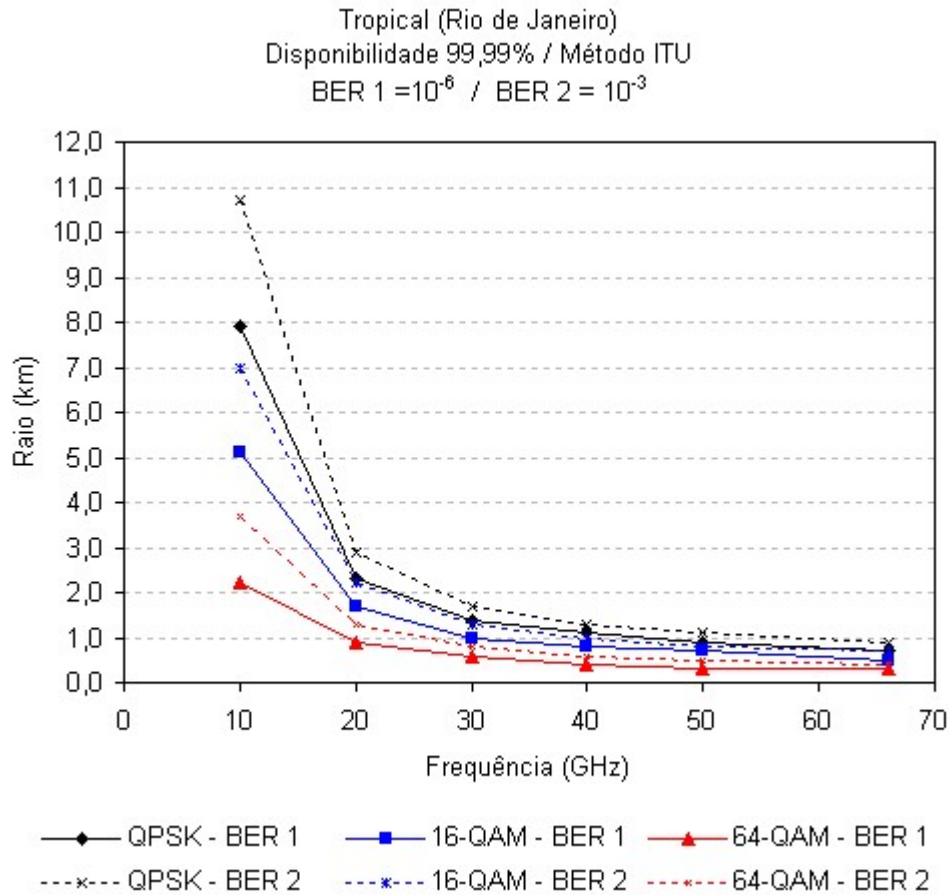


Figura 5.8 – Variação do raio máximo da célula em condições de chuvas conforme a especificação da taxa de erro de bits e do tipo de modulação utilizado

Em todos os gráficos apresentados as curvas foram geradas por processo de interpolação a partir dos raios calculados para as frequências de 10, 20, 30, 40, 50 e 66 GHz. Não fizeram parte da simulação os cálculos para as frequências de 55 e 60 GHz por causa dos efeitos severos da atenuação por gases atmosféricos e vapor de água, conforme foi apresentado na seção anterior. Sendo assim, os valores mostrados pelas curvas dos gráficos entre as frequências de 50 e 66 GHz não são válidos.

5.2.2. Cálculo da capacidade

A taxa máxima de comunicação de dados depende da largura do canal utilizado e da eficiência de uso do espectro pelo tipo de modulação utilizado. A Tabela 2.1 apresentou as taxas de comunicação possíveis para cada tipo de modulação considerando 3 larguras típicas de canal de sistemas baseados na tecnologia IEEE 802.16. A partir desta tabela é possível verificar que as modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM apresentam valores de eficiência espectral de 1,6 bps/Hz, 3,2 bps/Hz e 4,8 bps/Hz, respectivamente. Sendo assim, é possível apresentar a seguinte equação de cálculo da taxa máxima de comunicação R_{max} :

$$R_{max} = E_f \cdot W \quad (5.18)$$

Onde E_f (bps/Hz) é a eficiência de uso espectral do tipo de modulação utilizado

W (Hz) é a largura do canal utilizado

Se considerarmos a capacidade máxima em termos de taxa máxima de comunicação de dados, a capacidade máxima de uma célula é diretamente proporcional à largura total de espectro disponível na célula e ao fator de reuso utilizado

O espectro total disponível é dividido em um número específico de canais. Sendo assim, podemos utilizar a seguinte expressão para calcular a capacidade de uma célula:

$$C_{célula} = F_r \cdot E_f \cdot n \cdot W \quad (5.19)$$

Onde F_r é o fator de reuso

E_f (bps/Hz) é a eficiência de uso espectral do tipo de modulação utilizado

n é a quantidade de canais utilizados na célula

W (Hz) é a largura do canal

A capacidade de um setor pode ser calculada por :

$$C_{setor} = C_{célula} / n_{setor} \quad (5.20)$$

Onde $C_{célula}$ é a capacidade da célula

n é a quantidade de setores da célula

Um parâmetro que fornece uma referência melhor da capacidade provida por um sistema é a capacidade por unidade de área e pode ser calculado por :

$$C_{por\ km^2} = C_{célula} / A_{célula} \quad (5.22)$$

Onde $C_{célula}$ é a capacidade da célula

$A_{célula}$ é a área total da célula em km^2

No caso de sistemas que utilizam modulação adaptativa, a capacidade varia conforme as condições climatológicas devido à variação do tipo de modulação que é utilizado. O cálculo da capacidade total deve considerar as condições de céu claro e de chuvas. Além disto, as células terão regiões em que a cobertura é provida por diferentes tipos de modulação, o que também tem impacto na capacidade da célula.

A capacidade máxima que o sistema pode prover ocorrerá em condições de céu claro e pode ser calculada através da Equação 5.19 considerando que toda a célula utilize a modulação de melhor eficiência espectral. Na prática isto nem sempre ocorre e uma estimativa mais precisa pode ser feita considerando os valores do raio máximo de cobertura de cada tipo de modulação. Caso a posição geográfica de todas as estações assinantes esteja definida é possível determinar a quantidade de estações que está localizada dentro da área de cada modulação e a capacidade total pode ser calculada da seguinte maneira :

$$C_{célula} = (p_1\% \cdot E_{f1} + p_2\% \cdot E_{f2} + p_3\% \cdot E_{f3}) F_r \cdot n \cdot W \quad (5.23)$$

Onde $p_1\%$, $p_2\%$ e $p_3\%$ são os percentuais de estações assinantes (em relação à quantidade total) que utilizam as modulações 1, 2 e 3, respectivamente

E_{f1} , E_{f2} e E_{f3} (bps/Hz) são os valores de eficiência espectral dos tipos de modulação 1, 2 e 3, respectivamente

F_r é o fator de reuso

n é a quantidade de canais utilizados na célula

W (Hz) é a largura do canal

Se a localização geográfica dos assinantes não estiver determinada é possível obter um valor aproximado da capacidade considerando que os assinantes estão distribuídos geograficamente de maneira homogênea dentro da célula. Neste caso a Equação 5.23 pode ser utilizada mas as variáveis $p_1\%$, $p_2\%$ e $p_3\%$ são os percentuais de áreas cobertas por cada modulação em relação à área total da célula.

Estes cálculos devem ser feitos para condições de céu claro e de chuva.

Se os valores dos raios de cobertura de cada modulação não estiverem disponíveis, a estimativa da capacidade pode ser feita considerando os percentuais de área coberta por cada tipo de modulação e que foram apresentados na Tabela 4.3.

Exemplo de cálculo da capacidade

Um canal de 28 MHz possibilita transmitir a uma taxa máxima de dados de $1,6 \times 28 = 44,8$ Mbps utilizando modulação QPSK e poderia acomodar o tráfego de 175 usuários residenciais, cada um com uma taxa de 256 kbps ($175 \times 256 \text{ kbps} = 44,8 \text{ Mbps}$) que é a taxa máxima disponível em alguns serviços de Internet em banda larga que usam tecnologia xDSL. Este cálculo considera que os 175 usuários poderiam estar ativos simultaneamente.

Se a banda de frequências disponível for de 2×112 MHz que é um caso típico de alocação de espectro na Europa [55], com o uso de canais com largura de 28 GHz, estariam disponíveis 8 canais.

Se considerarmos a configuração de células apresentada na Figura 4.14 em que cada célula utiliza 2 canais, têm setores de 90° e fator de reuso igual a 2, a capacidade de cada célula será de 179,2 Mbps ($2 \times 2 \times 1,6 \times 28$) utilizando modulação QPSK e poderá garantir o acesso de 700 usuários com a taxa de 256 kbps. Na prática este número poderia maior uma vez que os recursos podem ser compartilhados entre os usuários de maneira dinâmica.

O uso de modulação adaptativa aumenta esta capacidade conforme estudado antes. Considerando células de 4 setores, assinantes distribuídos de maneira homogênea dentro da célula e uso dos 3 tipos de modulação previstos no padrão

IEEE 802.16, teremos dentro da área coberta da célula, conforme a Tabela 4.3, 19,35% de assinantes em condições de utilizar modulação 64-QAM, 45,16 % para modulação 16-QAM e os demais assinantes (35,49%) cujas localizações somente permitiriam o uso de modulação QPSK.

Se assumirmos que a capacidade do canal de 28 GHz é distribuída entre os usuários de cada tipo de modulação de modo proporcional ao número de usuários de cada um, 35,49% da capacidade do canal estarão disponíveis para os assinantes que usam modulação QPSK, 45,16% para os assinantes que usam 16-QAM e 19,35% para os assinantes que usam 64-QAM. Conforme a Tabela 2.1, a taxa máxima de símbolos para um canal de 28 MHz é 22,4 MBaud. Considerando os percentuais mencionados para cada tipo de modulação teremos as seguintes capacidades : 15,8995 Mbps para usuários de QPSK, 40,4634 Mbps para usuários de 16-QAM e 23,22 Mbps para usuários de 64-QAM. Isto representa uma capacidade máxima de 79,5829 Mbps por setor e 318,3316 Mbps por célula.

Esta capacidade seria suficiente para prover o acesso simultâneo a 1243 assinantes a uma taxa de 256 kbps. Número bem maior que os 700 assinantes que seriam possíveis se o esquema de modulação fosse fixo em QPSK.

A capacidade máxima em cada célula poderia ainda ser distribuída para os assinantes de modo a permitir diferentes taxas máximas. Por exemplo, 70 assinantes poderiam ter a capacidade de usar taxas de 2 Mbps e cerca de 696 assinantes poderiam usar taxas de 256 kbps.

Se as células tiverem, por exemplo, raio de 1,5 km a capacidade máxima obtida por célula representa uma taxa de comunicação por área igual a 45,03 Mbps/km². Apenas para ilustrar, considerando as mesmas premissas e características utilizadas no exemplo apresentado, para que o sistema alcance uma taxa de 50 Mbps/km² que é considerada uma capacidade boa para sistemas sem fio [40], seria necessário que a célula tivesse um raio máximo de aproximadamente 1,4 km.

5.2.3. Estimativa de interferência co-canal

Conforme já foi apresentado neste estudo, a ocorrência de interferências é inevitável em sistemas de acesso fixo sem fio em faixa larga operando em

ambientes abertos usando topologia ponto-multiponto. O desempenho dos sistemas está diretamente relacionado ao nível de interferências a que estão sujeitas as estações que compõem o sistema. Cabe, portanto, ao projetista do sistema buscar configurações durante o planejamento que levem os níveis de interferência a patamares mínimos e garantam o atendimento aos requisitos de relação S/I. Para isto é imprescindível uma estimativa do nível de interferência a que uma estação estará sujeita.

Na seção 4.3 foi apresentada uma maneira de estimar a relação sinal-interferência a que uma estação assinante está sujeita. A estimativa é feita através da Equação 4.19 que está apresentada novamente a seguir [54, 65].

$$\frac{S}{I}(dB) = 20 \log \frac{D}{d} \quad (5.24)$$

Onde d é a distância entre a estação assinante e sua estação base

D é a distância entre a estação assinante e a estação base interferente

Esta estimativa considera que: as estações base utilizam a mesma potência de transmissão, não existe obstrução no percurso do sinal através de células adjacentes, as condições climatológicas são homogêneas nas células e que as células têm o mesmo tamanho. Uma vez que o nível do sinal desejado é conhecido, é possível estimar a interferência causada na estação assinante por qualquer estação base.

A estimativa da interferência a que uma estação base está sujeita é mais complexa pois as estações assinantes operam com potência variável devido ao mecanismo de controle de potência. Sendo assim, o uso deste método somente se aplica para estimar o pior caso de interferência em estações base [54].

Em situações onde as condições climatológicas a que o sinal desejado e o sinal interferente sejam diferentes, como ocorre quando apenas um dos sinais está percorrendo uma região com chuvas, a atenuação diferencial deve ser levada em consideração conforme foi apresentado nas seções 3.1.3 e 4.2.2.3. Nesta condição, a estimativa da interferência pode obtida a partir da Equação 4.18 que é novamente apresentada a seguir [52].

$$\frac{S}{I} (dB)_{chuva} = \frac{S}{I} (dB) - [A_A(p) - 0,34 A_B(p)] \cdot (2,65 \cdot |\theta|^{0,23} + 0,004 \cdot |\Delta d|^{2,25}) \cdot f^{-0,4} \quad (5.25)$$

Onde θ (rad) é o ângulo entre os enlaces

Δd (km) é a diferença entre as distâncias dos enlaces

f (GHz) é a frequência de operação

A_A e A_B são as atenuações dos enlaces que podem ser excedidas durante o percentual de tempo p .

Os modos de estimar as interferências que foram descritos consideram somente as interferências entre células, não levando em consideração as interferências que podem ocorrer dentro da mesma célula devido ao reuso de frequências dependendo do diagrama de irradiação das antenas das estações assinantes. Sendo assim, a estimativa das interferências a partir da Equação 5.24 pode levar a valores menores do que ocorre em situações reais que utilizam um fator de reuso maior do que 1 na célula.

Uma maneira de estimar as interferências intracélula é apresentada em [53]. Neste caso, a relação sinal-interferência é calculada através da Equação 5.26.

$$\frac{S}{I} = \frac{I}{\alpha(N_1 + N_2 \cdot p)} \quad (5.26)$$

Onde N_1 é a quantidade de setores que utilizam o mesmo canal de frequência e a mesma polarização que o setor da estação assinante sob análise

N_2 é a quantidade de setores que utilizam o mesmo canal de frequência e a polarização cruzada

α é a atenuação nos lóbulos laterais da antena receptora (tipicamente, 25 dB [53])

p é o nível de polarização cruzada

Embora a tecnologia das antenas possibilite uma discriminação de polarização de 30 a 40 dB, se forem considerados efeitos combinados que causam despolarização, o nível de polarização cruzada pode chegar a -7 dB [53].

Esta análise considera que as antenas de todos setores da célula transmitem a mesma potência de transmissão.

5.2.4. Metodologia de projeto de rede

Uma metodologia de projeto de redes baseadas na tecnologia IEEE 802.16 é apresentada a seguir. Esta metodologia se aplica a projetos de redes que priorizam a maximização da cobertura com o menor número de estações base.

1. Especificações do sistema

Algumas especificações precisam estar definidas para possibilitar o início do projeto. São elas :

- frequência de operação;
- largura de espectro disponível;
- largura dos canais;
- requisito de taxa de erro de bits (BER) para o sistema;
- requisito mínimo de disponibilidade;
- características dos equipamentos disponíveis de serem utilizados :
potência máxima de transmissão dos rádios das estações base e assinante, ganho e diagrama de irradiação das antenas das estações base e assinante e perdas totais previstas nas estações;
- alturas máximas para as antenas das estações base e assinante;
- taxa de chuvas para a região onde o sistema irá operar.

2. Escolha dos locais candidatos para instalar as estações base

Um conjunto de locais deve ser escolhido para a realização da análise de visibilidade que é a próxima etapa. A escolha dos locais deve ser feita tendo como referência a distribuição do tráfego estimado na região onde o sistema irá operar para identificar os locais mais próximos das regiões de interesse.

Locais candidatos devem possibilitar grande área de cobertura e alta capacidade de tráfego e satisfazer requisitos mínimos de disponibilidade além de minimizarem os custos de infra-estrutura e o potencial para ocorrência de interferência [66]. Regiões altas como topo de edifícios, torres existentes de sistemas rádio, topos de montanhas são exemplos de locais que podem atender a estes requisitos [60].

3. *Análise de visibilidade*

A análise de visibilidade é realizada para determinar a quantidade total de área da região analisada que atende ao requisito de existência de visibilidade para o conjunto de locais candidatos. O objetivo da análise é obter o conjunto com o menor número de locais que proporcione visibilidade para o maior percentual de edificações [60].

A necessidade de visada direta entre a estação assinante e a estação base em sistemas fixos de acesso sem fio baseados no padrão IEEE 802.16 operando em frequências entre 10 e 66 GHz faz com que seja necessária a utilização de bancos de dados detalhados contendo as características de topografia, edificações e vegetação da área de interesse. Regiões com relevo irregular e regiões com alto grau de urbanização proporcionam desafios adicionais nesta etapa do projeto.

A análise de visibilidade projeta linhas de visada de um local candidato para todos os pontos da área ao seu redor determinando as áreas onde haverá visada direta [60]. A Figura 5.9 ilustra um exemplo desta análise em que o local candidato está situado no centro da figura. Nesta figura, as regiões claras são as regiões onde existe visada direta para o local candidato e as regiões escuras são as regiões de sombra.

A seção 4.1.1 apresentou um método para a realização desta etapa do projeto da rede.

O uso de ferramentas que permitem simular a propagação nas regiões de interesse é de grande utilidade para a avaliação da visibilidade para cada local candidato. Tais ferramentas permitem uma revisão rápida da quantidade de locais candidatos e possibilita selecionar os locais que otimizem a cobertura na área sob análise [59].

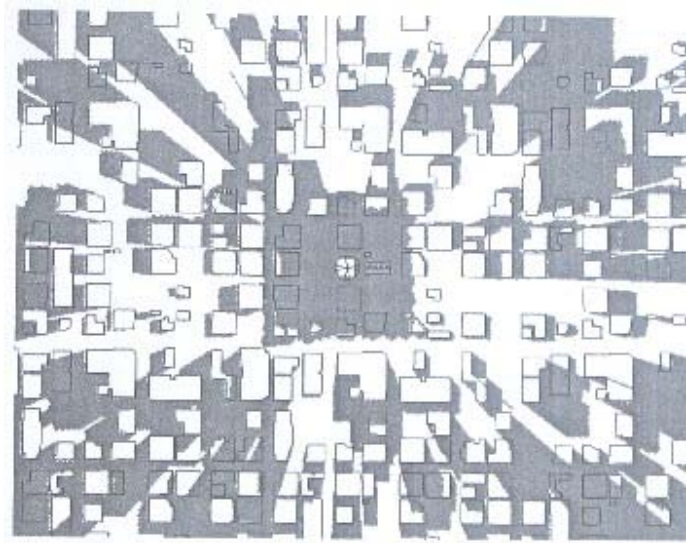


Figura 5.9 – Exemplo de análise de visibilidade [60]

É importante fazer simulações com alturas diferentes das antenas nos locais candidatos e verificar o efeito que ocorre na área total com visibilidade.

A análise de visibilidade é comum na maioria das ferramentas de planejamento e em alguns pacotes de *software* de informações geográficas (GIS). Sua precisão é dependente da precisão dos bancos de dados utilizados.

A realização da análise de visibilidade para os locais que foram escolhidos na etapa anterior irá verificar a adequação destes locais ao requisito de existência de visada direta. Se confirmada a adequação a este requisito, estes locais passam a formar um conjunto pré-selecionado de locais candidatos que serão submetidos aos estudos de previsão de cobertura para que se possa verificar se eles realmente podem ser utilizados para a instalação das estações base.

4. Priorização dos locais pré-selecionados para instalação das estações base

Antes de submeter os locais pré-selecionados à análise de previsão de cobertura é necessário considerar outros aspectos sobre estes locais. A escolha de um local para instalação de uma estação base depende de ele atender ao requisito de existência de visibilidade para a área de interesse mas também depende de fatores tais como a disponibilidade para sua utilização através de aquisição ou locação e da viabilidade financeira de sua obtenção. Além destes aspectos é

preciso avaliar a disponibilidade de espaço físico, energia para os equipamentos e interconexão da estação com o restante da rede.

A lista de locais pode ser organizada por ordem de adequação aos aspectos de visibilidade em conjunto com o grau de adequação aos fatores mencionados. É útil criar uma lista de locais conforme a prioridade de suas aquisições. Os preferidos podem ser, por exemplo, os que irão servir ao maior número de clientes potenciais ou os que possibilitem as maiores receitas em termos financeiros [60].

É importante a obtenção de informações sobre os proprietários ou pessoas responsáveis pelas áreas dos locais desejados para que se possa negociar a utilização e, posteriormente durante a implantação, obter aprovação para quaisquer trabalhos que forem necessários [59].

5. Cálculo do raio máximo das células para os locais escolhidos

A taxa de precipitação de chuvas é o principal fator de limitação do raio das células em sistemas operando em ambientes abertos na faixa de frequência entre 10 e 66 GHz mas dependendo do grau de urbanização da região, a limitação do raio das células pode ocorrer em função dos bloqueios causados pelas edificações ao invés de ser determinada pela ocorrência de chuvas na região. Regiões rurais, em geral, apresentam poucos obstáculos à propagação permitindo grandes raios de células enquanto regiões densamente urbanizadas apresentam muitos obstáculos levando a células de raios menores [67].

A estimativa do raio máximo das células envolve a realização do cálculo dos enlaces e depende das características dos equipamentos e das especificações definidas para o sistema. O raio máximo das células é calculado em condições de céu claro e de chuva conforme foi apresentado nas seções 5.2.1 e 5.2.2, respectivamente. Como o padrão IEEE 802.16 utiliza modulação adaptativa [12], devem ser calculados os raios máximos para cada tipo de modulação pois cada célula terá áreas com diferentes tipos de modulação o que terá impacto na capacidade disponível.

Como a prioridade do projeto nesta metodologia é maximizar a área de cobertura com o menor número de estações base, deve-se escolher um valor de raio máximo que garanta a operação do sistema em condições de chuva utilizando a modulação QPSK. Este valor é o maior valor de raio dentre os 3 tipos de modulação e permite minimizar o número de estações base.

Uma vez escolhido o valor do raio da célula que garanta o funcionamento do sistema em condições de chuva, será possível prever as regiões da célula que poderão utilizar as modulações 16-QAM e 64-QAM em condições de céu claro.

6. Previsão da cobertura

Uma vez determinados os locais que possibilitem visibilidade para a maior área e calculado o raio máximo das células é preciso prever a cobertura para cada local candidato. O fato de existir visada direta de um determinado local para uma estação base não garante que existirá cobertura neste local. A existência de cobertura depende de haver visibilidade mas também depende das características dos equipamentos, da disponibilidade especificada para o sistema, do requisito máximo de taxa de erros de bits, das características climatológicas da região e de outros aspectos analisados na seção 4.1 onde foi apresentado um método de previsão da área de cobertura.

Um dos requisitos que deve ser atendido para existir cobertura em um determinado local é o requisito de intensidade mínima de sinal nos receptores das estações assinantes. Este requisito mínimo foi apresentado na Tabela 5.3.

Os programas utilizados para previsão de cobertura calculam a intensidade de sinal que chega ao local da estação assinante. Para compatibilizar esta informação com os requisitos mínimos especificados dos receptores é preciso considerar o ganho na antena e as perdas totais na estação.

A previsão de cobertura deve ser feita para todos os locais pré-selecionados.

7. Revisão dos locais das estações base

Dependendo dos valores obtidos nas simulações de cobertura, uma revisão da localização das ERBs pode ser necessária e os estudos de previsão da cobertura deverão ser refeitos.

8. Planejamento de frequências, setorização e capacidade

O planejamento de frequências e da setorização deverá considerar os aspectos técnicos apresentados nas seções 4.2 e 4.3.

Nesta etapa os canais disponíveis de frequências são alocados nas células que podem ser configuradas em uma primeira etapa com antenas omnidirecionais

nas estações base. As frequências devem ser distribuídas de modo a minimizar a ocorrência de interferência co-canal e de canal adjacente.

As interferências co-canal podem ser estimadas seguindo os procedimentos apresentados na seção 5.2.3. Se os valores obtidos para a relação $S/(N+I)$ em alguma área não atenderem aos requisitos mínimos que foram apresentados na Tabela 5.4 é necessário rever a distribuição dos canais, implementar a setorização das células ou, até mesmo, revisar a localização das estações base.

A partir dos valores calculados de relação $S/(N+I)$ para toda a região é possível obter os mapas de cobertura conforme o tipo de modulação para situações de céu claro e de chuva.

Nesta etapa o perfil do tráfego estimado para cada região é um fator importante para que o planejamento de frequências e da setorização possibilite que os requisitos de capacidade sejam atendidos. Uma área com grande concentração de residências como clientes potenciais apresenta um requisito de capacidade inferior a uma região em que os clientes potenciais são empresas que requerem grandes recursos de telecomunicações. Os fatores que influem na capacidade de um sistema foram apresentados na seção 4.4.

Para cada configuração de frequências e de setorização é necessário realizar uma estimativa da capacidade máxima que pode ser disponibilizada para verificar se atende ao perfil de tráfego esperado na região. O cálculo deve ser feito conforme procedimento apresentado na seção 5.2.2. Caso não atenda, nova configuração deve ser planejada.

Se a largura de espectro disponível para o sistema já estiver especificada, o planejamento das células deverá incluir este parâmetro na busca pela melhor configuração dividindo o espectro disponível em canais com larguras compatíveis com os equipamentos e com os requisitos de capacidade do sistema em cada região. Se a largura de espectro não estiver especificada, esta etapa permitirá estimar a largura mínima de espectro que deverá ser alocada para o sistema.

9. Estimativa da capacidade oferecida pelo sistema

Uma vez concluído o planejamento das frequências e da setorização de todas as células, é possível estimar a capacidade máxima oferecida pelo sistema através da Equação 5.23.

10. Especificação dos equipamentos a serem utilizados

Depois da conclusão das etapas anteriores os equipamentos a serem utilizados na rede podem ser especificados. Quando existe uma variedade de equipamentos disponíveis, o projeto da rede deverá considerar todas as opções para que seja possível escolher os equipamentos que possibilitem o melhor desempenho do sistema com o menor custo.

6 Estudo de caso

Um estudo de caso foi implementado para aplicação da metodologia de projeto de rede apresentada. O estudo consistiu no projeto de uma rede de acesso sem fio para prover serviços de comunicação em faixa larga através da tecnologia IEEE 802.16 em uma região da cidade de São Paulo com área aproximada de 25 km² que inclui a região central da cidade.

O programa NetDimension foi utilizado para a realização do projeto. Ainda que este programa não tenha a opção de projeto de redes baseadas no padrão IEEE 802.16 ele foi utilizado na opção de projeto de rede LMDS adaptando ao padrão todas as características da rede que são configuráveis no programa. Os métodos apresentados no Capítulo 4 e que fazem parte da metodologia do projeto da rede estão incorporados no programa e, por isto, não estão apresentados no estudo de caso.

O projeto realizado se restringiu aos aspectos técnicos da rede e as ações se concentraram na busca pelo melhor desempenho nestes aspectos. O projeto priorizou a maximização da área de cobertura com o menor número de estações base.

O mapa da região a ser coberta está apresentado na Figura 6.1 com uma legenda indicando a altitude do terreno.

A região escolhida apresenta alguns desafios para o planejamento de um sistema que requer visada direta porque a cobertura precisa ser provida em uma região de relevo irregular que apresenta áreas densamente urbanizadas com grande concentração de edifícios altos e áreas residenciais onde prevalece a existência de casas. O relevo da região está ilustrado na área em destaque da Figura 6.2.

Especificações do sistema

As seguintes especificações foram definidas para o sistema a ser implementado:

- frequência de operação : 28 GHz;
- largura de espectro disponível : 224 MHz;
- largura dos canais utilizados : 28 MHz;
- taxa de erro de bits (BER) : 10^{-6} ;



Figura 6.1 – Região da cidade de São Paulo onde a rede foi projetada

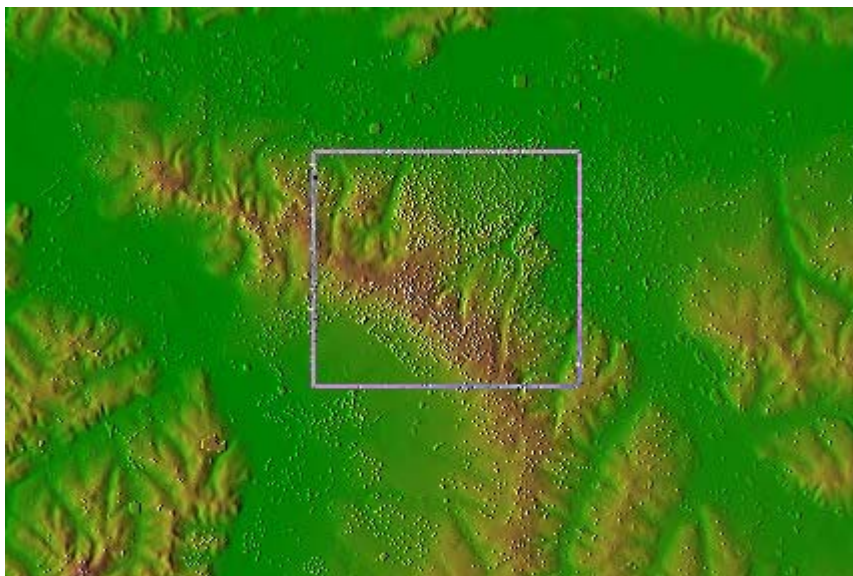


Figura 6.2 – O relevo da região escolhida está apresentado na área destacada

- requisito mínimo de disponibilidade : 99,99%
- potência de transmissão da estação base : 24 dBm;
- ganho da antena da estação base : 19 dBi;
- altura da antena da estação base : 20 m;
- perdas na estação base : 3 dB;
- ganho da antena da estação assinante : 34 dBi;
- altura da antena da estação assinante : 20 m;
- perdas na estação assinante : 3 dB.

A taxa de chuvas que pode ser excedida em 0,01% do tempo na cidade de São Paulo é 81 mm/h e foi utilizado o método do ITU para cálculo da atenuação por chuvas.

Escolha dos locais candidatos para instalar as estações base e análise de visibilidade

A análise de visibilidade foi realizada junto com a escolha e a priorização dos locais para instalação das estações base.

Devido ao relevo irregular e ao alto grau de urbanização na maior parte da área, inúmeras simulações foram realizadas até se obter uma configuração em que são necessárias 18 estações base para prover visibilidade para a maior parte da região total.

A Figura 6.3 apresenta os locais escolhidos para instalação das estações base e a área total com visibilidade para todos os locais escolhidos.

Priorização dos locais pré-selecionados para instalação das estações base

A etapa de priorização dos locais pré-selecionados foi desconsiderada porque este estudo de caso se concentra nos aspectos técnicos da rede sem levar em consideração os aspectos relacionados com a infra-estrutura dos locais.

Cálculo do raio máximo das células

O raio máximo das células foi calculado em condições de céu claro e de chuva para a frequência de 28 GHz e requisito de taxa de erro de bits de 10^{-6} . Os valores para cada tipo de modulação e disponibilidade estão apresentados na Tabela 6.1.

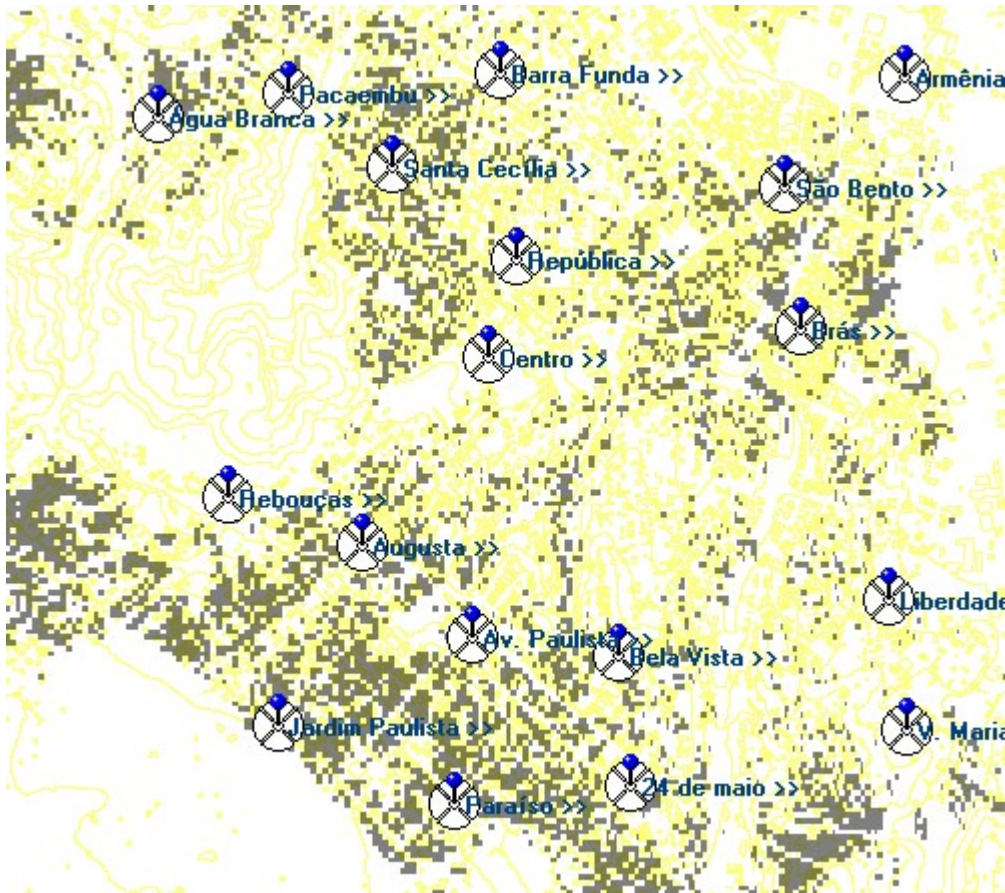


Figura 6.3 – Ilustração da área total com visibilidade para os locais escolhidos para as estações base

Tabela 6.1 – Raio máximo da célula na cidade de São Paulo

| Modulação | Disponibilidade | Raio (km) chuva/ITU | Raio (km) céu claro |
|-----------|-----------------|---------------------|---------------------|
| QPSK | 99,999% | 0,9 | 11,7 |
| | 99,99% | 1,5 | |
| | 99,9% | 3,0 | |
| 16-QAM | 99,999% | 0,7 | 5,6 |
| | 99,99% | 1,1 | |
| | 99,9% | 2,0 | |
| 64-QAM | 99,999% | 0,4 | 1,5 |
| | 99,99% | 0,6 | |
| | 99,9% | 0,9 | |

Se o objetivo fosse prover a maior capacidade possível durante a maior parte do tempo com o requisito especificado de taxa de erro de bits, seria necessário considerar um raio máximo que possibilitasse o uso do tipo de modulação de melhor eficiência espectral em toda a área da célula mesmo durante a ocorrência das chuvas. Neste caso o raio máximo das células deveria ser o menor valor da Tabela 6.1 de forma que em 99,999% do tempo a modulação 64-QAM poderia ser utilizada em toda a célula. Esta escolha, entretanto, faria com que as células tivessem raios muito pequenos, aproximadamente 0,4 km, que representaria uma área aproximada de 0,5 km² por célula. Para cobrir toda a área desejada seriam necessárias mais de 50 estações base, número este que ainda poderia ser maior ao serem considerados os requisitos de visada direta.

Como a prioridade definida para o projeto foi maximizar a área de cobertura com o menor número de estações base e, além disto, o requisito de disponibilidade especificado é de 99,99%, foi escolhido o raio máximo obtido para a modulação QPSK em condições de chuva que é de aproximadamente 1,5 km fazendo com que a área da célula seja de aproximadamente 7,1 km² e sejam necessárias menos estações base para cobrir toda a área desejada do que no caso de priorizar a maximização da capacidade durante a maior parte do tempo.

O valor escolhido de raio de célula garantirá, conforme a Tabela 6.1, que em condições de céu claro toda a célula pode operar com modulação 64-QAM atendendo ao requisito de taxa de erro de bits de 10⁻⁶. Em condições de chuva todas as regiões da célula terão cobertura ainda que a capacidade disponível irá diminuir nas regiões mais distantes da estação base devido ao uso de tipos de modulação de menor eficiência espectral.

A Figura 6.4 ilustra a configuração de raios de células que foi obtida com os parâmetros escolhidos.

Devido ao grau de urbanização de algumas regiões, entretanto, a distância entre estações base vizinhas teve que ser, em vários casos, inferior ao raio previsto para as células para que o requisito de visibilidade fosse atendido. A consequência disto é que mais regiões poderão utilizar modulação de melhor eficiência espectral o que possibilita um aumento da capacidade oferecida pela rede.

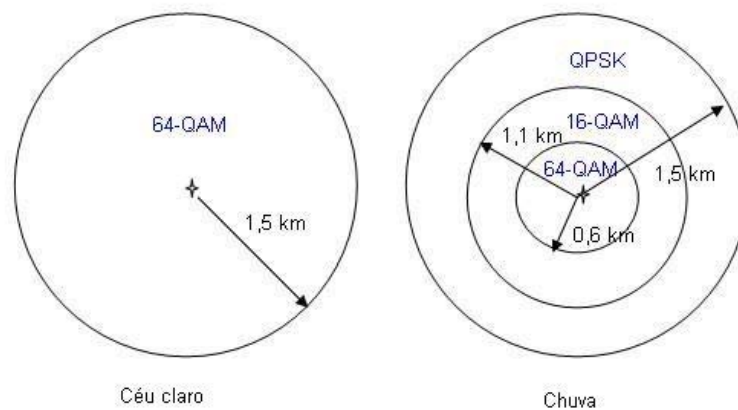


Figura 6.4 – Tamanho das células e área com cada tipo de modulação

Previsão da cobertura e revisão dos locais das estações base

A previsão da cobertura foi realizada considerando as características de equipamentos e as especificações que foram definidas para este projeto. Dependendo dos valores obtidos nas simulações de cobertura, foram realizadas revisões da localização das estações base. Inicialmente foram feitas simulações com antenas omnidirecionais nas estações base mas, com esta configuração, não foi possível atender aos alguns requisitos que serão descritos adiante.

As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam mapas de cobertura em situações de céu claro ilustrando, respectivamente, a intensidade dos sinais e o melhor servidor em uma configuração com antenas setorizadas de 90° nas estações base.

Se fossem considerados apenas os requisitos mínimos de intensidade de sinal para cada tipo de modulação desprezando a influência das interferências, podemos observar no mapa da Figura 6.7 que a maior parte da área coberta estaria em condições de utilizar a modulação 64-QAM em condições de céu claro, conforme foi planejado. As regiões onde a cobertura ocorreria através de modulação 16-QAM ou QPSK existem porque nestas regiões não há visibilidade para as estações base mais próximas.

A influência das chuvas na cobertura do sistema foi observada através do mapa apresentado na Figura 6.8 que ilustra, a partir de patamares de intensidade de sinal, as regiões cobertas com modulação QPSK para 3 níveis de disponibilidade desconsiderando os demais tipos de modulação.

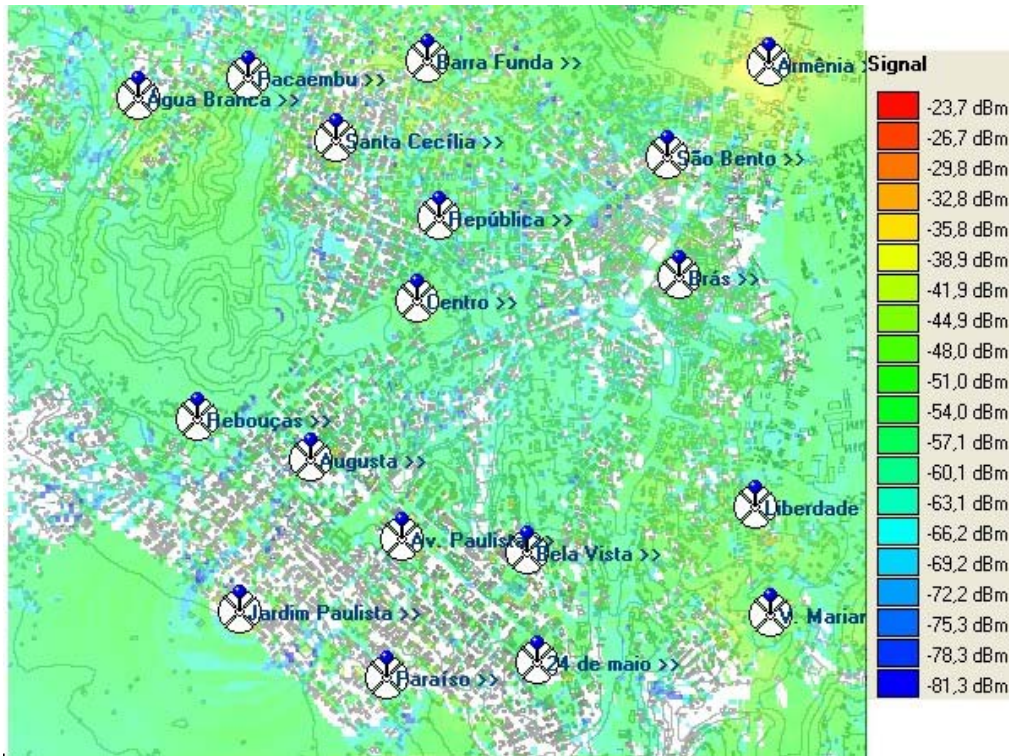


Figura 6.5 – Mapa de cobertura com intensidade de sinal em situação de céu claro

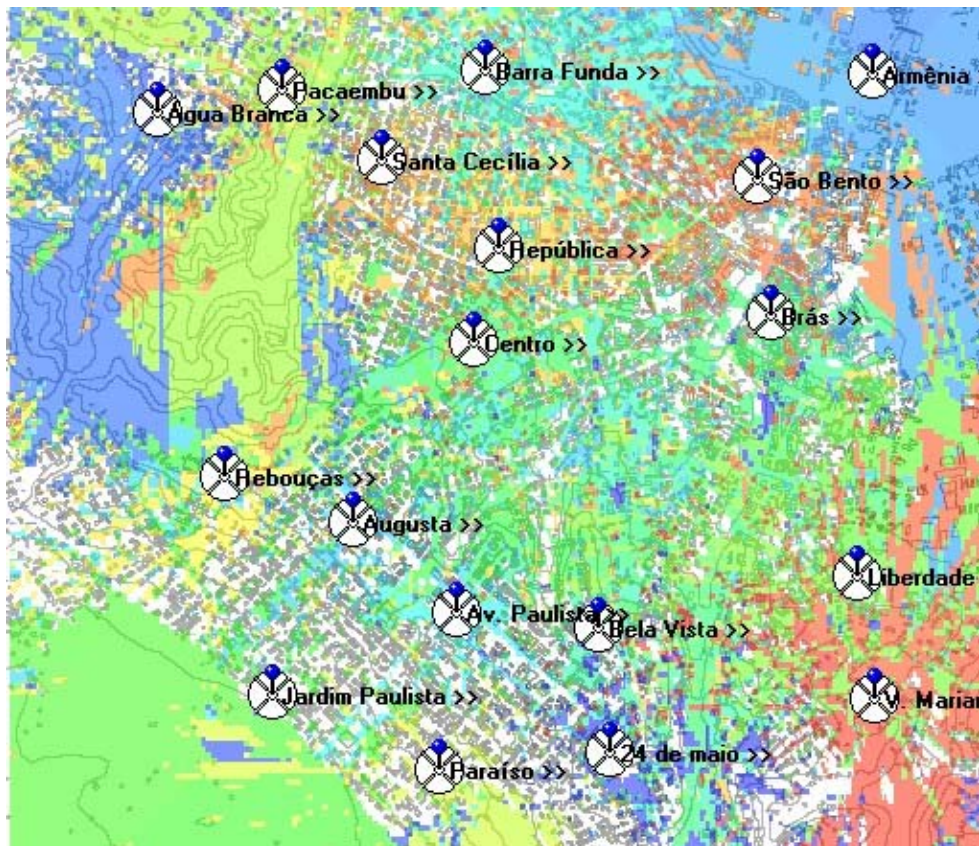


Figura 6.6 – Mapa de cobertura conforme o melhor servidor em situação de céu claro

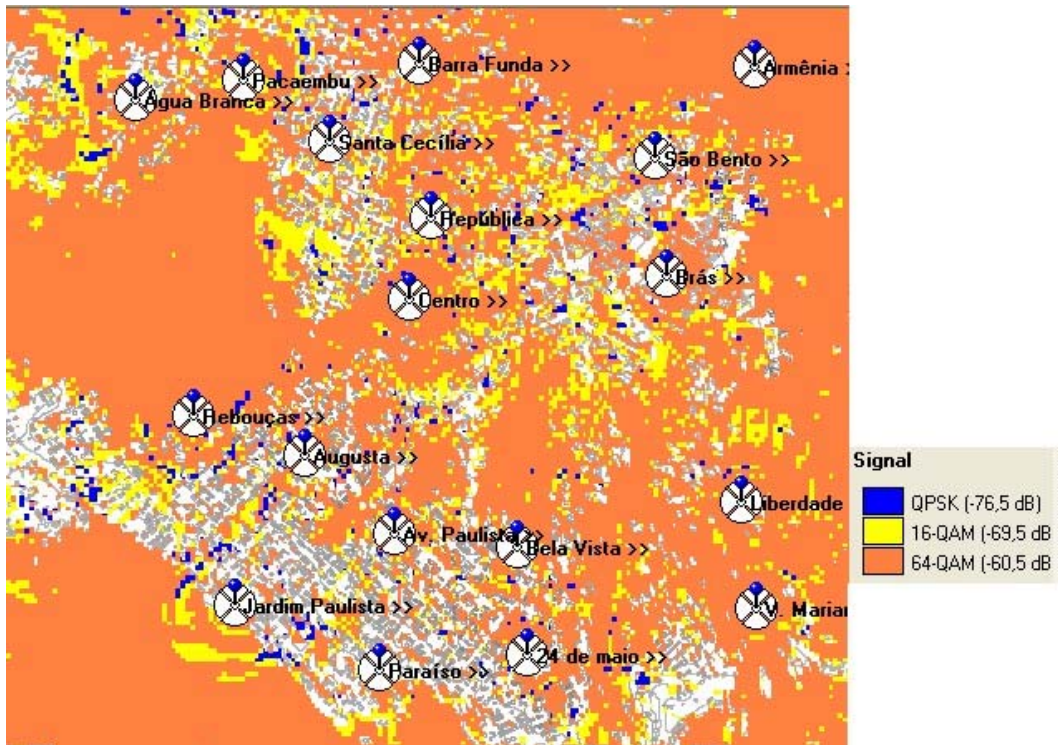


Figura 6.7 – Mapa de cobertura conforme o tipo de modulação (céu claro)

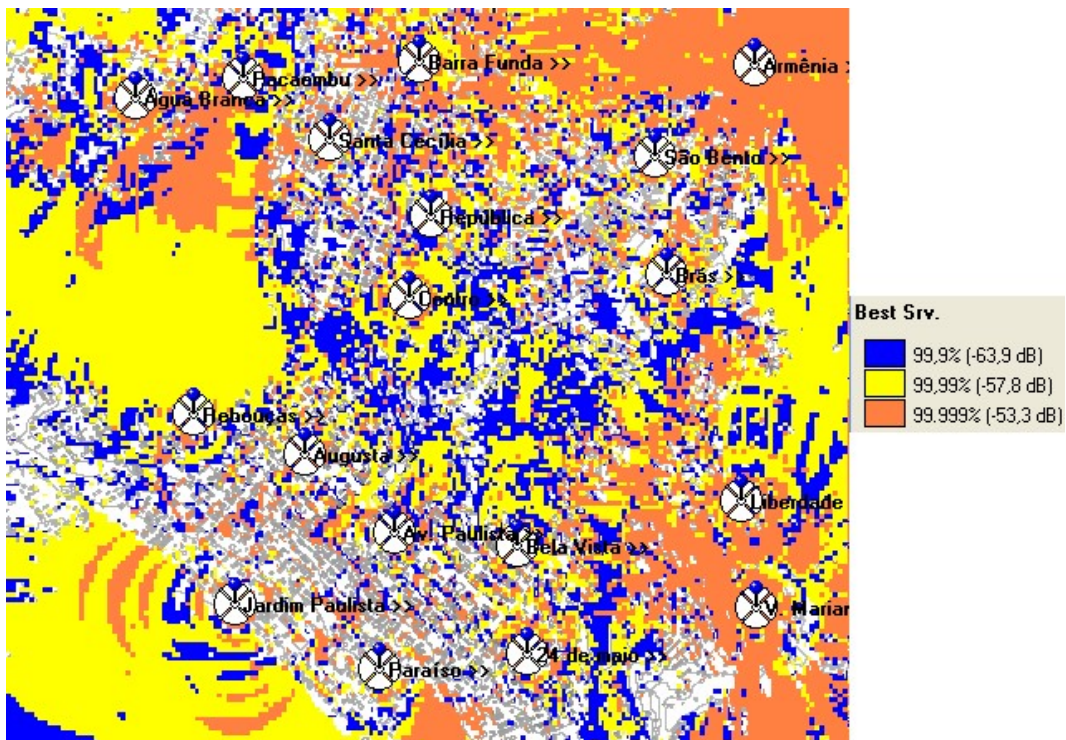


Figura 6.8 – Cobertura através de modulação QPSK considerando as chuvas

As áreas em cor laranja são cobertas por modulação QPSK para uma disponibilidade de 99,999%. No caso de disponibilidade 99,99%, as áreas em laranja e amarelo seriam cobertas com este tipo de modulação e para disponibilidade 99,9%, todas as áreas coloridas seriam cobertas por esta modulação.

Planejamento de frequências e setorização

Nesta etapa os canais disponíveis de frequências foram alocados nas células. O uso de antenas omnidirecionais não permitiu que os requisitos de níveis mínimos de relação $S/(N+I)$ fossem atendidos. Foi necessário implementar a setorização das células.

O planejamento de frequência e da setorização das células foi realizado utilizando como referência o modelo de planejamento sugerido em [55] que foi apresentado na Figura 4.14 e considera as células com 4 setores de 90° , 8 canais de frequências para todo o sistema dos quais 2 canais são utilizados por célula com fator de reuso igual a 2 e polarização diferente em setores vizinhos.

A Figura 6.9 mostra um mapa com os níveis de relação $S/(N+I)$ que foram obtidos com a configuração escolhida de estações base.

Considerando os requisitos mínimos de relação $S/(N+I)$ de cada tipo de modulação e que foram apresentados na Tabela 5.4 é possível observar o impacto que as interferências têm na cobertura por cada tipo de modulação.

Diversas regiões próximas de algumas estações base que seriam cobertas por modulação 64-QAM, se não fossem consideradas as interferências, não atendem ao requisito mínimo de relação $S/(N+I)$ para este tipo de modulação e só podem operar com modulação de menor eficiência espectral diminuindo a capacidade máxima possível.

Foram feitas novas simulações diminuindo a potência de transmissão das estações base em 3 dB (de 24 dBm para 21 dBm) com o objetivo de verificar se a queda no nível das interferências era maior possibilitando uma melhora nos níveis de relação $S/(N+I)$. A alteração obtida foi desprezível.

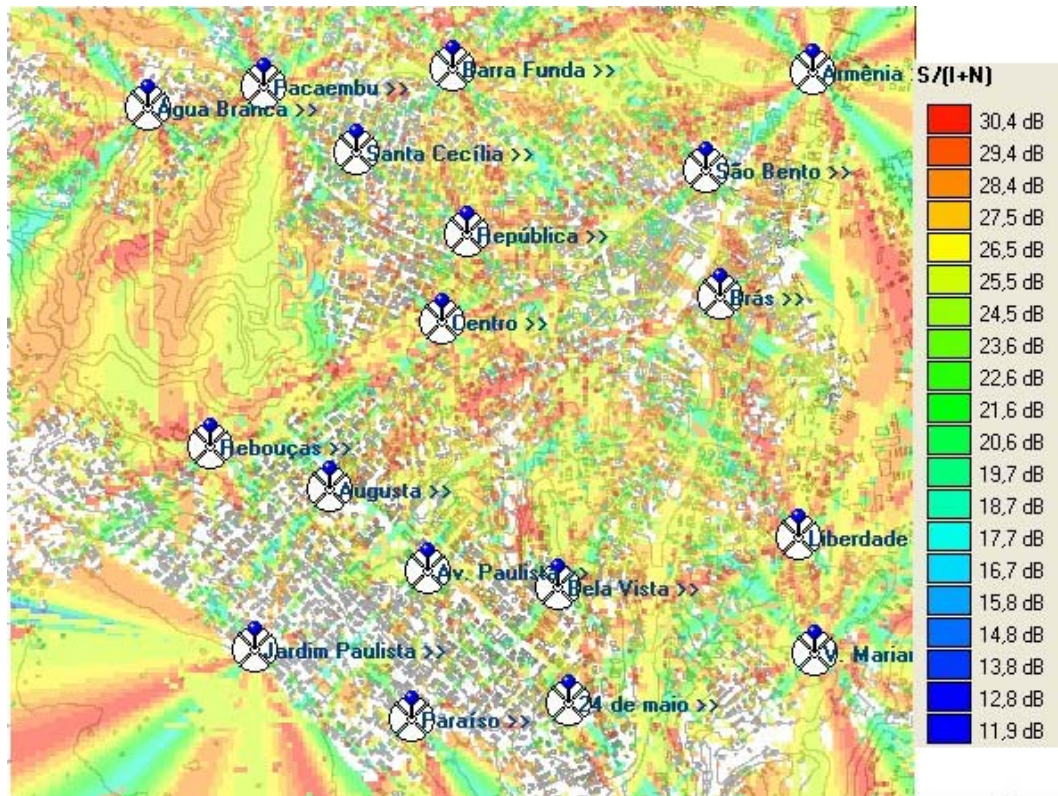


Figura 6.9 – Mapa de níveis de relação S/(N+I)

Estimativa da capacidade oferecida por célula

A estimativa da capacidade de cada célula depende da quantidade de área coberta por cada tipo de modulação. O programa utilizado para o projeto, entretanto, não permite que tais áreas sejam estimadas o que impede que a estimativa seja efetuada.

Especificação dos equipamentos a serem utilizados

Após todas as simulações realizadas, os equipamentos podem ser especificados a partir da configuração de rede obtida.

Conclusão

Os resultados obtidos durante as simulações realizadas mostram que a necessidade de visada direta e as interferências são os fatores mais limitantes no planejamento de sistemas de acesso sem fio em faixa larga baseados na tecnologia IEEE 802.16 operando em ambientes altamente urbanizados na faixa de frequências entre 10 e 66 GHz. Para que a cobertura seja maximizada é necessário

que as distâncias entre as estações base sejam menores que os diâmetros estimados para as células levando à ocorrência de sobreposição das células e aumentando o nível de interferência a que as estações estão sujeitas. Algumas técnicas para minimização das interferências foram apresentadas na seção 4.2.3.

Em uma situação real, novas simulações deveriam ser feitas na busca por uma melhora nos níveis de relação $S/(N+I)$. Alguns exemplos de ações que poderiam ser implementadas no projeto são : alteração do planejamento de frequências e de setorização, inclinação (*down tilt*) em algumas antenas, procura por outros modelos de antenas para as estações base.

7

Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

A conclusão recente de uma padronização para sistemas fixos para acesso sem fio em faixa larga operando em ambientes abertos em frequências entre 10 e 66 GHz dará grande impulso à utilização destes sistemas. As soluções existentes eram proprietárias e não seguiam nenhum tipo de padronização o que impedia a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes e aumentava o custo dos equipamentos devido à baixa escala de fabricação.

Este estudo buscou reunir e organizar o máximo de informações relevantes para o planejamento destes sistemas cujas principais características foram apresentadas através de um resumo da tecnologia padronizada pelo IEEE na recomendação IEEE 802.16 que será referência para a fabricação dos equipamentos a serem utilizados nestes sistemas.

Atualmente os esforços estão concentrados no desenvolvimento de equipamentos para sistemas que operem na faixa de frequências abaixo de 11 GHz que também está incluída na mesma padronização do IEEE. A utilização da faixa de 10 a 66 GHz por sistemas padronizados, entretanto, será uma alternativa eficiente à medida que aumentar a demanda por serviços de comunicação em faixa larga. Atualmente a faixa entre 28 e 31 GHz é utilizada pelos serviços de LMDS (Local Multipoint Distribution System) [4] que não seguem qualquer padronização pelos fabricantes.

Métodos para estimar os efeitos dos fatores que influenciam a propagação de ondas eletromagnéticas na faixa entre 10 e 66 GHz foram apresentados e métodos alternativos foram citados para proporcionar diversas alternativas de planejamento que requer um trabalho criterioso para maximizar a utilização da banda de frequência disponível, maximizar a capacidade oferecida pela rede e garantir requisitos específicos de disponibilidade buscando sempre a minimização dos custos envolvidos.

Os aspectos envolvidos no planejamento foram apresentados junto com exemplos ilustrativos e métodos propostos na literatura pesquisada. A organização

destes aspectos foi realizada através de uma proposta de metodologia de planejamento para facilitar a aplicação em situações práticas. Por este motivo, a metodologia proposta incluiu considerações mercadológicas e financeiras além das considerações técnicas.

Como a maior parte dos aspectos técnicos envolvidos no planejamento se concentra no projeto da rede, uma metodologia de projeto de redes foi apresentada para aplicação em sistemas baseados na tecnologia IEEE 802.16 na faixa de frequências estudada e um estudo de caso foi realizado para aplicação da metodologia apresentada.

Um dos aspectos mais importantes na elaboração do planejamento é definir o perfil de tráfego dos futuros usuários do sistema. Foi apresentado um modelo de perfis de tráfego encontrado na literatura pesquisada mas este assunto ainda pode ser estudado com maior profundidade em trabalhos futuros.

O desenvolvimento de um programa para automatizar a metodologia proposta especificamente para o tipo de sistema que foi estudado pode ser assunto para trabalhos futuros.

A análise dos efeitos dos multipercursos no planejamento destes sistemas e as ações para minimizar suas possíveis influências também pode ser assunto para trabalhos futuros.

8

Referências bibliográficas

- 1 ALVARION LTD. Introducing WiMAX – The Next Broadband Wireless Revolution. Disponível em <<http://www.alvarion.com> >. Acesso em: 02 mar. 2005.
- 2 FIXED Wireless Infrastructure Will Ride a Wave of Growth on Standards. **Microwave Journal**, Norwood, v. 47, n. 3, p. 49-50, mar. 2004.
- 3 INTEL CORPORATION. IEEE 802.16 and WiMAX – White Paper. Disponível em <http://www.intel.com/ebusiness/pdf/wireless/intel/80216_wimax.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2004.
- 4 MARKS, R. The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless. **IEEE Network**, New York, v. 13, n. 2, p. 4-5, mar. – abr. 1999.
- 5 WIELAND, K. Fixed Wireless Access. **Telecommunications International**, London, v. 35, n. 6, p. 74, 76, 79 e 81, jun. 2001.
- 6 THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems. **IEEE Recommended Practice for Local and Metropolitan Area Networks**, New York, IEEE Std. 802.16.2-2001, 2001.
- 7 THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks**, New York, IEEE Std. 802.16-2001, 2002.
- 8 THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Amendment 1 : Detailed System Profiles for 10-66 GHz. **IEEE Standard**

- for Local and Metropolitan Area Networks**, New York, IEEE Std. 802.16c-2002, 2003.
- 9 FIGUEIREDO, F. A Evolução da Tecnologia WiMAX. **RTI- Redes, Telecom e Instalações**, São Paulo, p. 42, 44-45, jul. 2004.
 - 10 THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Amendment 2 : Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz. **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks**, New York, IEEE Std. 802.16a-2003, 2003.
 - 11 THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems. **IEEE Recommended Practice for Local and Metropolitan Area Networks**, New York, IEEE Std. 802.16.2-2004, 2004.
 - 12 THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks**, New York, IEEE Std. 802.16-2004, 2004.
 - 13 PIGGIN, P. WiMAX In-depth. **IEE Communications Engineer**, London, v. 2, n. 5, p. 36-39, out.-nov. 2004.
 - 14 EKLUND, C.; MARKS, R.; STANWOOD, K.; WANG, S. IEEE Standard 802.16 : A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 40, n. 6, p. 98-107, jun. 2002.
 - 15 DeCRUYENAERE, J.; FALCONNER, D. A Shadowing Model for Prediction of Coverage in Fixed Terrestrial Wireless Systems. In: **VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE**, 50, 1999. VTC 1999 - Fall, IEEE VTS. **Proceedings...** v.3, p. 1427-1433, set. 1999.
 - 16 XU, H.; RAPPAPORT, T. S.; BOYLE, R. J.; SCHAFFNER, J. H. Measurements and Models for 38 GHz Point-to-Multipoint Radiowave

- Propagation. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 18, n. 3, p.310-321, mar. 2000.
- 17 PARSONS, J. D. **The Mobile Radio Propagation Channel**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 418 p.
- 18 WIMAX FORUM. WiMAX's Technology for LOS and NLOS Environments, 2004. Disponível em http://www.wimaxforum.org/technology/White_Papers/. Acesso em: 10 dez. 2005.
- 19 WOLF, D. A.; LIGTHART, L. P. Multipath Effects Due to Rain at 30-50 GHz Frequency Communication Links. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, New York, v. 41, n. 8, p. 1132-1138, ago. 1993.
- 20 XU, H.; RAPPAPORT, T. S.; BOYLE, R. J.; SCHAFFNER, J. H. 38 GHz Wide-Band Point-to-Multipoint Measurements Under Different Weather Conditions. **IEEE Communications Letters**, New York, v. 4, n. 1, p.7-8, jan. 2000.
- 21 FREEMAN, R. L. **Radio System Design For Telecommunications**. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997. 887 p.
- 22 PÉREZ GARCIA, N. A. **Modelamento de Efeitos de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-Ponto e Ponto-Multiponto**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2003.
- 23 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems. **ITU-R Recommendations**, Genebra, ITU-R Rec. P.530-10, 2001.
- 24 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Attenuation due to clouds and fog. **ITU-R Recommendations**, Genebra, ITU-R Rec. P.840-3, 1999.
- 25 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Attenuation by Atmospheric Gases. **ITU-R Recommendations**, Genebra, ITU-R Rec.

- P.676-5, 2001.
- 26 FONG, B.; FONG, A. C. M.; HONG, G. Y.; RYU, H. Measurement of Attenuation and Phase on 26-GHz Wide-Band Point-to-Multipoint Signals Under the Influence of Rain. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, New York, v. 4, p.20-21, 2005.
 - 27 FONG, B.; RAPAJIC, P. B.; FONG, A. C. M.; HONG, G. Y. Polarization of Received Signals for Wideband Wireless Communications in Heavy Rainfall Region. **IEEE Communications Letters**, New York, v. 7, n. 1, p.13-14, jan. 2003.
 - 28 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Characteristics of Precipitation for Propagation Modeling. **ITU-R Recommendations**, Genebra, ITU-R Rec. P.837-4, 2003.
 - 29 FLAINVILLE RAMOS, M. C.. **Atenuação por Chuvas em Regiões Tropicais : Aplicação ao Dimensionamento de Sistemas LMDS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontificia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2002.
 - 30 PÉREZ GARCIA, N. A.; SILVA MELLO L. A. R. Improved method for prediction of rain attenuation in terrestrial links. **Electronics Letters**, Londres, v. 40, n. 11, p. 683-684, maio 2004.
 - 31 CRANE, R. K. Prediction of Attenuation by Rain. **IEEE Transactions on Communicatons**, New York, v. COM-28, n. 9, p. 1717-1735, set. 1980.
 - 32 FEDI, E. Prediction of Attenuation due to Rainfall in Terrestrial Links. **Radio Science**, n. 16, p. 731-743, 1981.
 - 33 SILVA MELLO, L. A. R.; COSTA, E.; SOUZA, R. S. L. Rain attenuation measurements at 15 and 18 GHz. **Electronics Letters**, Londres, v. 38, n. 4, p. 197-198, fev. 2002.
 - 34 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. **ITU-R**

- Recommendations**, Genebra, ITU-R Rec. P.838-3, 2005.
- 35 PÉREZ GARCIA, N. A.; SILVA MELLO, L. A. R.; PONTES, M. S. Measurements and Prediction of Differential Rain Attenuation in Convergent Links. **Electronics Letters**, Londres, v. 41, n. 17, p. 11-12, ago. 2005.
- 36 PANAGOPOULOS, A. D.; KANELLOPOULOS, J. D. Differential rain attenuation statistics on two converging terrestrial links. In: ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 2002, IEEE, **Proceedings...** v. 2, p.730-733, jun. 2002.
- 37 PANAGOPOULOS, A. D.; KATSAMBAS, V. K.; KANELLOPOULOS, J. D. A Simple Model for Differential Rain Attenuation Statistics on Converging Terrestrial Microwave Paths. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 2, n.1, p.82-85, 2003.
- 38 PONTES, MARLENE S. A Method to Estimate Statistics of Rain Depolarization. **Annales des Telecommunications**, França, v. 32, n. 11-12, nov.-dez. 1977.
- 39 SILVA MELLO, L. A. R.; PONTES, M. S.; SOUZA, R. S. L.; MIRANDA, E. C. Rain Attenuation and Rain Depolarization Measurements in a LCMS Link at 28 GHz. In: MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE, 2001, SBMO/IEEE MTT-S IMOC 2001, **Proceedings...** v. 1, p.425-428, ago. 2001.
- 40 FONG, B.; ANSARI, N.; FONG, A. C. M.; HONG, G. Y. On the scalability of fixed broadband wireless access network deployment. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 42, n. 9, p. S12-S18, set. 2004.
- 41 DeCRUYENAERE, J.; FALCONNER, D. Propagation Simulation for the Prediction of LMCS/LMDS Coverage. In: ANTENNA TECHNOLOGY AND APPLIED ELECTROMAGNETICS INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 4, 1998, ANTEM'98, IETR, Ottawa, **Proceedings...** 1998.

- 42 SEIDEL, S. Radio Propagation and Planning at 28 GHz for Local Multipoint Distribution Service (LMDS). In: IEEE ANTENNA AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1998, New York. **Proceedings...** v. 2, p. 622-625, 1998.
- 43 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Broadband Millimetric Radio Access Systems Operating in a Frequency Range of About 20-50 GHz . **ITU-R Recommendations**, Genebra, ITU-R Rec. P.1410-3, 2005.
- 44 PANAGOPOULOS, A. D.; PAPANIKOLAOU, V. S. ; PAPOUTSIS, J. E.; CHATZARAKIS, G.; KANELLOPOULOS, J. D.; COTTIS, P. G. A New Coverage Prediction Method for Local Multipoint Distribution Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 12, 2003, ICAP2003. **Proceedings...** v. 1, p.437-440, mar. 2003.
- 45 PANAGOPOULOS, A. D.; PAPANIKOLAOU, V. S. ; PAPOUTSIS, J. E.; CHATZARAKIS, G.; KANELLOPOULOS, J. D.; COTTIS, P. G. General Coverage Prediction Algorithm for LMDS. **Electronics Letters**, Londres, v. 39, n. 8, p. 684-686, abr. 2003.
- 46 SCHERER, D. Optimizing Frequency Re-use in Point-to-Multipoint Deployments. In: RADIO AND WIRELESS CONFERENCE, 2000, RAWCON 2000, IEEE. **Proceedings...** p.83-86, set. 2000.
- 47 FALCONNER, D.; DeCRUYENAERE, J. A Coverage Enhancement Methods for LMDS. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 41, n. 7, p. 86-92, jul. 2003.
- 48 WANG, F. Assessment of Co-Channel Interference in Fixed Wireless Cellular System Operating at Ka Band. In: MICROWAVE CONFERENCE, 2001, APMC 2001, Taiwan. **Proceedings...** v.2, p.605-608, dez. 2001.
- 49 FRENZEL, L. E. WiMAX : The Race is On. **Electronic Design**, New York, v. 52, n. 25, p. 47-56, nov. 2004.

- 50 SINKA, C.; BITO, J. Rain Attenuation Countermeasure Technique for Broadband Fixed Wireless Access Networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 12, 2003, ICAP2003. **Proceedings...** v.1, p. 441-444, mar. 2003.
- 51 DALY, N. E.; TOZER, T. C.; PEARCE, D. A. J.; GRACE, D.; BURR, A. G. Capacity Effects on Terrestrial Broadband Wireless Access Networks Operating in the LMDS Frequency Band During Rainfall Conditions. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 51, 2000. VTC 2000 - Spring, IEEE, Toquio. **Proceedings...** v.3, p. 2444-2448, mai. 2000.
- 52 PÉREZ GARCÍA, N. A.; SILVA MELLO, L. A. R. Rain Attenuation Considerations in Broadband Wireless Systems Operating at Frequencies Above 10 GHz. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE AND WIRELESS COMMUNICATIONS NETWORKS, 3, 2001, MWCN 2001, Recife, **Proceedings...** p. 99-102, 2001.
- 53 ROMAN, V. Frequency Reuse and System Deployment in LMDS. **IEEE Personal Communications**, New York, p. 20-27, dez. 1999.
- 54 SARI, H. Trends and Challenges in Broadband Wireless Access. **IEEE Communications and Vehicular Technology**, SCVT-2000 Symposium, New York, p. 210-214, out. 2000.
- 55 FOSTER, R.; GARRISON, J.; MCMEEKIN, M.; HAINE, J. **Radio Frequency Deployment Considerations for the ClearBurst GB System**. Bellevue : Harris Corporation, 2001, 13 p. (White Paper da Harris Corporation, 13).
- 56 SKLAR, B. **Digital Communications – Fundamentals and Applications**. 1 ed. New Jersey: P T R Prentice Hall, 1988. 776 p.
- 57 BOLLAPRAGADA, R. An Approach for Planning Broadband Wireless Networks. **AIRO News**, Torino, v. IX, n. 1, p. 9-14, Spring 2004.

- 58 CRAIG, K. H.; HURLEY, S.; TJELTA, T. Propagation Studies for Enhanced Broadband Wireless Access. Disponível em: <<http://hawk.iszf.irk.ru/URSI2002/GAabstracts/papers/p0492.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2006.
- 59 OLEXA, R. **Implementing 802.11, 802.16 and 802.20 Wireless Networks – Planning, Troubleshooting and Operations**. 1 ed. Burlington: Elsevier Inc., 2005. 232 p.
- 60 ANDERSON, H. R. **Fixed Broadband Wireless System Design**. 1 ed. West Sussex : John Wiley & Sons Ltd., 2003. 510 p.
- 61 IACOVANI, G.; PARISI, D.; ISOPI, M. Cell Capacity of LMDS Systems in Typical Traffic Scenarios. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 43, n. 4, p. 122-129, abr. 2005.
- 62 LEE, E. WiMAX Forum – Working Group Status Update. In: ITU REGIONAL SEMINAR ON BROADBAND WIRELESS ACCESS (BWA) FOR RURAL AND REMOTE AREAS FOR THE ASIA-PACIFIC REGION, 2005, Shenzhen. **Anais eletrônicos...** Shenzhen, 2005. Disponível em: <<http://www.itu.int/ITU-D/imt-2000/documents/Shenzhen2005/ShenzhenFinalProgram.html>>. Acesso em: 08 jan. 2006.
- 63 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. ITU-R Study Group 3 Data banks. **DBSG5**. Disponível em: <<http://www.itu.int/home/index.html>>. Acesso em: 2005.
- 64 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. ITU-R WP3J/20 Rainfall Characteristics in the Climatic Regions of Brazil. Disponível em: <<http://www.itu.int/md/R00-WP3J-C-0020/en>>. Acesso em: 2005.
- 65 LEE, C. H.; CHUNG, B. Y, LEE, S. H. Dynamic modulation scheme in consideration of cell interference for LMDS. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION TECHNOLOGY, 1998, ICCT 1998, **Proceedings...** v.2, p. 22-24, out. 1998.
- 66 ALLEN, S. M.; HURLEY, S.; TAPLIN, R. K.; WHITAKER, R. M.

- Automatic cell planning of broadband fixed wireless networks. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 53, 2001. VTC 2001 - Spring, IEEE. **Proceedings...** v.4, p. 2808-2812, mai. 2001.
- 67 GOETZ, R. Planning Fixed Broadband Wireless Access Networks based on WiMAX Technology - A Case Study on Business Modeling and Planning Process. In: ITU REGIONAL SEMINAR ON BROADBAND WIRELESS ACCESS (BWA) FOR RURAL AND REMOTE AREAS FOR THE ASIA-PACIFIC REGION, 2005, Shenzhen. **Anais eletrônicos...** Shenzhen, 2005. Disponível em: <<http://www.itu.int/ITU-D/imt-2000/documents/Shenzhen2005/ShenzhenFinalProgram.html>>. Acesso em: 08 jan. 2006.
- 68 CYRANKA, Lúcia F. M.; SOUZA, Vânia P. de. **Orientações Para Normatização de Trabalhos Acadêmicos**. 6 ed. rev. atual. Juiz de Fora : EDUFJF, 2000. 90 p.

APÊNDICE A

Informações sobre o Projeto Realizado

Tabela A.1 – Especificações das estações base

| wimax_18setor9sul.net | | NETDIMENSION PLANNING | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|---|------------------------------|---------|-----------|----------|-----------|----------|--------|
| Date/Time: 4/4/2006 23:25:50 | | DSC Tecnologia Ltda. Copyright (C) 1999,2000 | | | | | | | |
| Executed by: | Subscriber Unit: | | Rx: | | | | | | |
| | Antenna: SR2-275ASE | | Noise Figure: 6,00 dB | | | | | | |
| | Height: 20,0 m | | Availability: 99,99 % | | | | | | |
| | Gain: 31,00 dB | | | | | | | | |
| Kmed: 1,33 | Pressure: 1013,0 hPa | Vapor Density: 7,00 g/m3 | | | | | | | |
| Kmin: 0,67 | Temperature: 15,0°C | pL: 10,00 % | | | | | | | |
| Name | Longitude | Latitude | Altitude | Antenna | Frequency | Power | Azimuth | DownTilt | Height |
| <u>24 de maio</u> | -46°38'43.59" | -23°33'47.56" | 905 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>24 de maio.</u> | -46°38'43.59" | -23°33'47.56" | 905 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>24 de maio ></u> | -46°38'43.59" | -23°33'47.56" | 905 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>24 de maio >></u> | -46°38'43.59" | -23°33'47.56" | 905 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Água Branca</u> | -46°40'18.16" | -23°32'18.33" | 841 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Água Branca.</u> | -46°40'18.16" | -23°32'18.33" | 841 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Água Branca ></u> | -46°40'18.16" | -23°32'18.33" | 841 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Água Branca >></u> | -46°40'18.16" | -23°32'18.33" | 841 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Armênia</u> | -46°37'48.80" | -23°34'39.24" | 763 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Armênia.</u> | -46°37'48.80" | -23°34'39.24" | 763 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Armênia ></u> | -46°37'48.80" | -23°34'39.24" | 763 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Armênia >></u> | -46°37'48.80" | -23°34'39.24" | 763 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Augusta</u> | -46°39'37.40" | -23°32'56.80" | 912 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Augusta.</u> | -46°39'37.40" | -23°32'56.80" | 912 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Augusta ></u> | -46°39'37.40" | -23°32'56.80" | 912 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Augusta >></u> | -46°39'37.40" | -23°32'56.80" | 912 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Av. Paulista</u> | -46°39'15.51" | -23°33'17.45" | 909 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Av. Paulista.</u> | -46°39'15.51" | -23°33'17.45" | 909 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Av. Paulista ></u> | -46°39'15.51" | -23°33'17.45" | 909 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Av. Paulista >></u> | -46°39'15.51" | -23°33'17.45" | 909 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Barra Funda</u> | -46°39'9.59" | -23°33'23.04" | 789 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Barra Funda.</u> | -46°39'9.59" | -23°33'23.04" | 789 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Barra Funda ></u> | -46°39'9.59" | -23°33'23.04" | 789 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Barra Funda >></u> | -46°39'9.59" | -23°33'23.04" | 789 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Bela Vista</u> | -46°38'45.89" | -23°33'45.39" | 875 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Bela Vista.</u> | -46°38'45.89" | -23°33'45.39" | 875 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |

| Name | Longitude | Latitude | Altitude | Antenna | Frequency | Power | Azimuth | DownTilt | Height |
|---------------------------|---------------|---------------|----------|---------|-----------|----------|-----------|----------|--------|
| <u>Bela Vista</u> > | -46°38'45.89" | -23°33'45.39" | 875 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Bela Vista</u> >> | -46°38'45.89" | -23°33'45.39" | 875 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Brás</u> | -46°38'9.78" | -23°34'19.46" | 865 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Brás</u> . | -46°38'9.78" | -23°34'19.46" | 865 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Brás</u> > | -46°38'9.78" | -23°34'19.46" | 865 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Brás</u> >> | -46°38'9.78" | -23°34'19.46" | 865 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Centro</u> | -46°39'11.97" | -23°33'20.80" | 894 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Centro</u> . | -46°39'11.97" | -23°33'20.80" | 894 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Centro</u> > | -46°39'11.97" | -23°33'20.80" | 894 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Centro</u> >> | -46°39'11.97" | -23°33'20.80" | 894 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Jardim Paulista</u> | -46°39'54.26" | -23°32'40.89" | 820 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Jardim Paulista</u> . | -46°39'54.26" | -23°32'40.89" | 820 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Jardim Paulista</u> > | -46°39'54.26" | -23°32'40.89" | 820 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Jardim Paulista</u> >> | -46°39'54.26" | -23°32'40.89" | 820 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Liberdade</u> | -46°37'51.93" | -23°34'36.29" | 816 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Liberdade</u> . | -46°37'51.93" | -23°34'36.29" | 816 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Liberdade</u> > | -46°37'51.93" | -23°34'36.29" | 816 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Liberdade</u> >> | -46°37'51.93" | -23°34'36.29" | 816 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Pacaembu</u> | -46°39'52.11" | -23°32'42.93" | 823 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Pacaembu</u> . | -46°39'52.11" | -23°32'42.93" | 823 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Pacaembu</u> > | -46°39'52.11" | -23°32'42.93" | 823 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Pacaembu</u> >> | -46°39'52.11" | -23°32'42.93" | 823 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Paraíso</u> | -46°39'19.14" | -23°33'14.03" | 823 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Paraíso</u> . | -46°39'19.14" | -23°33'14.03" | 823 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Paraíso</u> > | -46°39'19.14" | -23°33'14.03" | 823 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Paraíso</u> >> | -46°39'19.14" | -23°33'14.03" | 823 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Rebouças</u> | -46°40'4.08" | -23°32'31.62" | 921 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Rebouças</u> . | -46°40'4.08" | -23°32'31.62" | 921 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Rebouças</u> > | -46°40'4.08" | -23°32'31.62" | 921 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Rebouças</u> >> | -46°40'4.08" | -23°32'31.62" | 921 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>República</u> | -46°39'6.67" | -23°33'25.80" | 925 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>República</u> . | -46°39'6.67" | -23°33'25.80" | 925 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>República</u> > | -46°39'6.67" | -23°33'25.80" | 925 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>República</u> >> | -46°39'6.67" | -23°33'25.80" | 925 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Santa Cecília</u> | -46°39'31.48" | -23°33'2.39" | 840 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Santa Cecília</u> . | -46°39'31.48" | -23°33'2.39" | 840 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |

| Name | Longitude | Latitude | Altitude | Antenna | Frequency | Power | Azimuth | DownTilt | Height |
|-------------------------|---------------|---------------|----------|---------|-----------|----------|-----------|----------|--------|
| <u>Santa Cecília</u> > | -46°39'31.48" | -23°33'2.39" | 840 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>Santa Cecília</u> >> | -46°39'31.48" | -23°33'2.39" | 840 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>São Bento</u> | -46°38'12.85" | -23°34'16.56" | 816 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>São Bento</u> . | -46°38'12.85" | -23°34'16.56" | 816 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>São Bento</u> > | -46°38'12.85" | -23°34'16.56" | 816 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>São Bento</u> >> | -46°38'12.85" | -23°34'16.56" | 816 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>V. Mariana</u> | -46°37'48.37" | -23°34'39.64" | 806 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 0,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>V. Mariana</u> . | -46°37'48.37" | -23°34'39.64" | 806 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 90,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>V. Mariana</u> > | -46°37'48.37" | -23°34'39.64" | 806 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 180,0 deg | 0,0 deg | 20 m |
| <u>V. Mariana</u> >> | -46°37'48.37" | -23°34'39.64" | 806 m | PD10200 | 28,0 GHz | 24,0 dBm | 270,0 deg | 0,0 deg | 20 m |

Tabela A.2 – Planejamento de frequências

| Frequency Planning | | | |
|---------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Cell | Channels | Cell | Channels |
| 24 de maio | 4 | Jardim Paulista | 5 |
| 24 de maio . | 5 | Jardim Paulista . | 4 |
| 24 de maio > | 4 | Jardim Paulista > | 5 |
| 24 de maio >> | 5 | Jardim Paulista >> | 4 |
| Água Branca | 1 | Liberdade | 1 |
| Água Branca . | 5 | Liberdade . | 8 |
| Água Branca > | 1 | Liberdade > | 1 |
| Água Branca >> | 5 | Liberdade >> | 8 |
| Amênia | 1 | Pacaembu | 8 |
| Amênia . | 5 | Pacaembu . | 1 |
| Amênia > | 1 | Pacaembu > | 8 |
| Amênia >> | 5 | Pacaembu >> | 1 |
| Augusta | 3 | Paraíso | 1 |
| Augusta . | 7 | Paraíso . | 5 |
| Augusta > | 3 | Paraíso > | 1 |
| Augusta >> | 7 | Paraíso >> | 5 |
| Av. Paulista | 8 | Rebouças | 1 |
| Av. Paulista . | 1 | Rebouças . | 8 |
| Av. Paulista > | 8 | Rebouças > | 1 |
| Av. Paulista >> | 1 | Rebouças >> | 8 |
| Barra Funda | 7 | República | 5 |
| Barra Funda . | 3 | República . | 4 |
| Barra Funda > | 7 | República > | 5 |
| Barra Funda >> | 3 | República >> | 4 |
| Bela Vista | 7 | Santa Cecília | 6 |
| Bela Vista . | 3 | Santa Cecília . | 2 |
| Bela Vista > | 7 | Santa Cecília > | 6 |
| Bela Vista >> | 3 | Santa Cecília >> | 2 |
| Brás | 3 | São Bento | 7 |
| Brás . | 6 | São Bento . | 2 |
| Brás > | 3 | São Bento > | 7 |
| Brás >> | 6 | São Bento >> | 2 |
| Centro | 4 | V. Mariana | 5 |
| Centro . | 8 | V. Mariana . | 1 |
| Centro > | 4 | V. Mariana > | 5 |
| Centro >> | 8 | V. Mariana >> | 1 |

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)