

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.

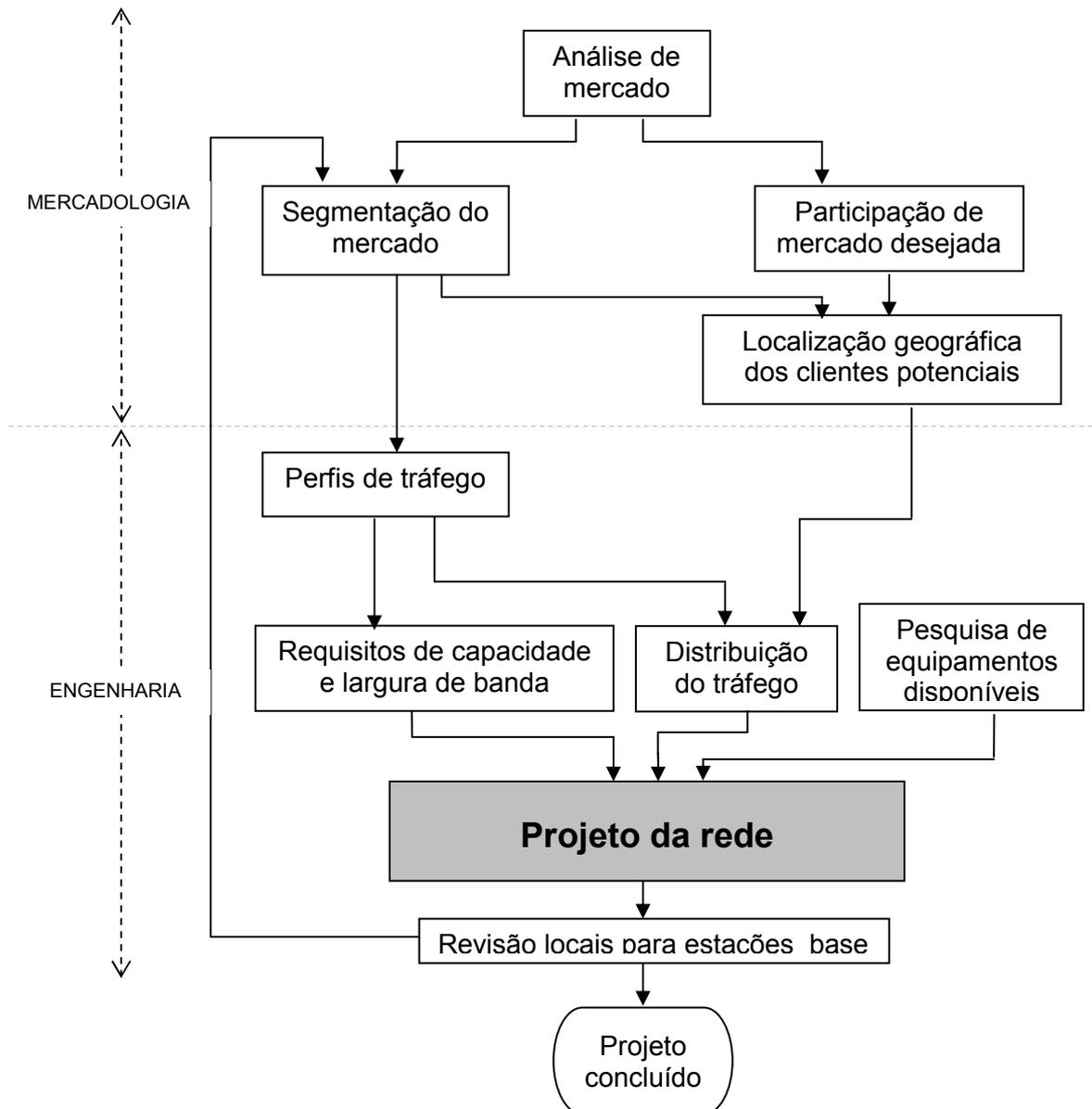


Figura 5.1 – Etapas principais do planejamento

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 :

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

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

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

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

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 :

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

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)	$P_{r \text{ min}} \text{ (dBm)}$		
	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)	$S/(N+I)_{\text{req}} \text{ (dB)}$		
	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)	$I \text{ (dBm)}$		
	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

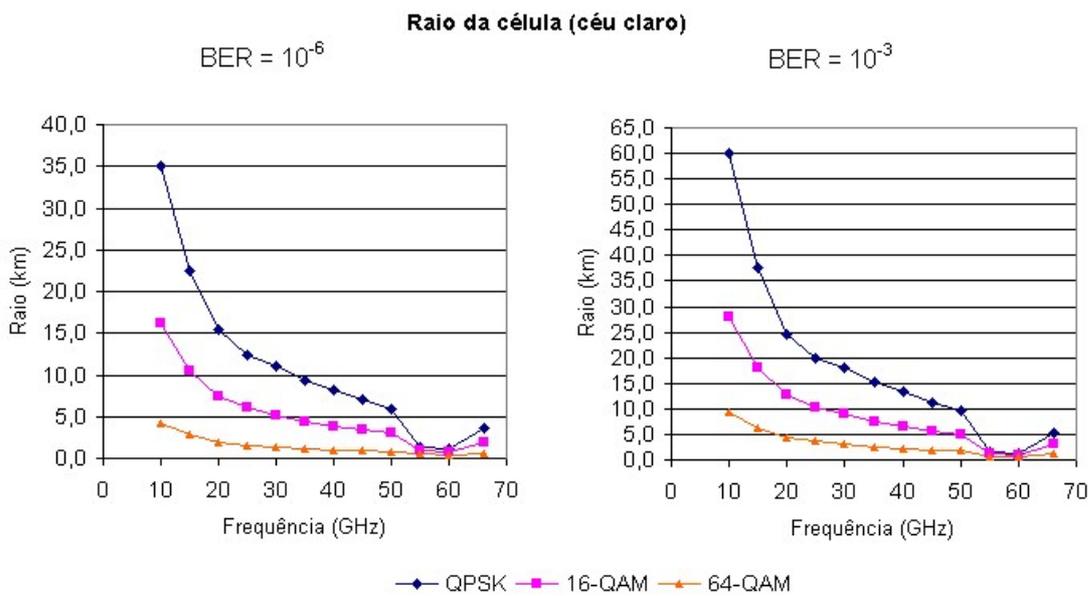


Figura 5.2 – Raio máximo das células em condições de céu claro

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

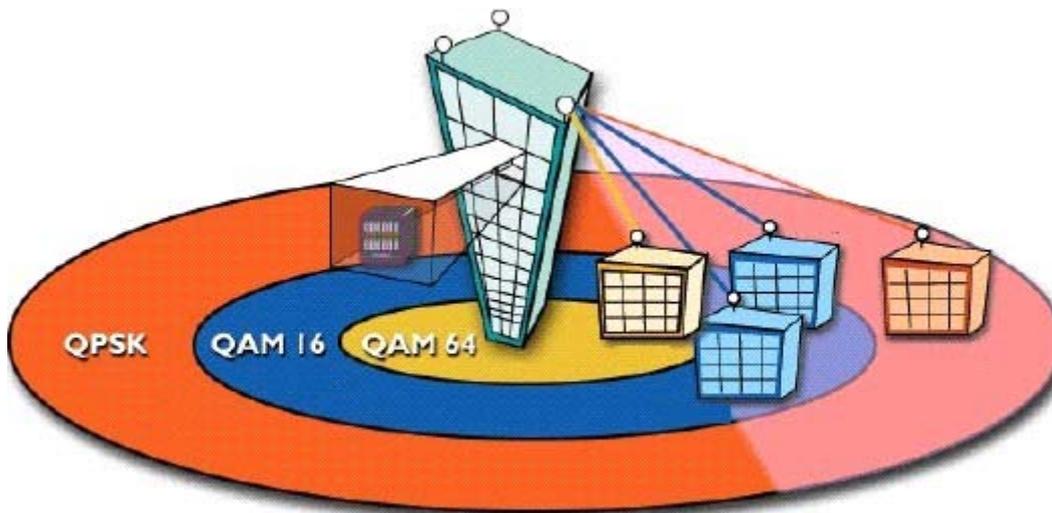


Figura 5.3 – Regiões da célula com cada tipo de modulação.

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.

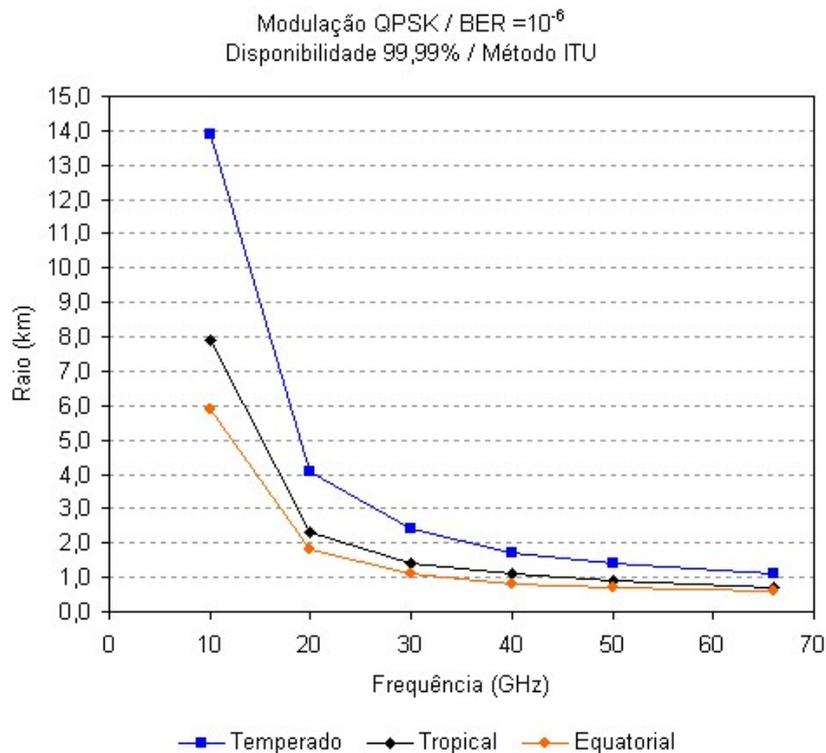


Figura 5.4 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (QPSK)

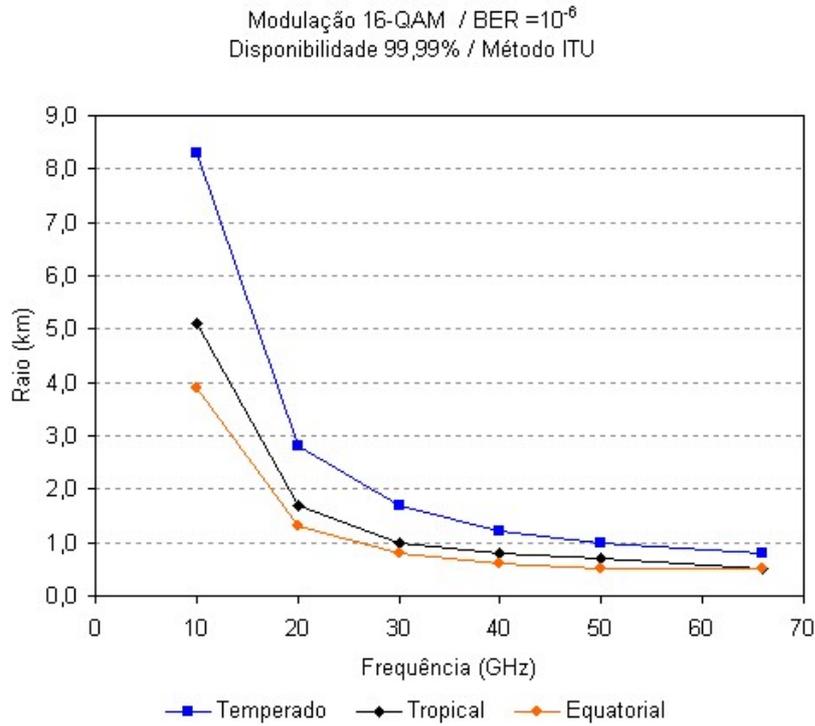


Figura 5.5 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (16-QAM)

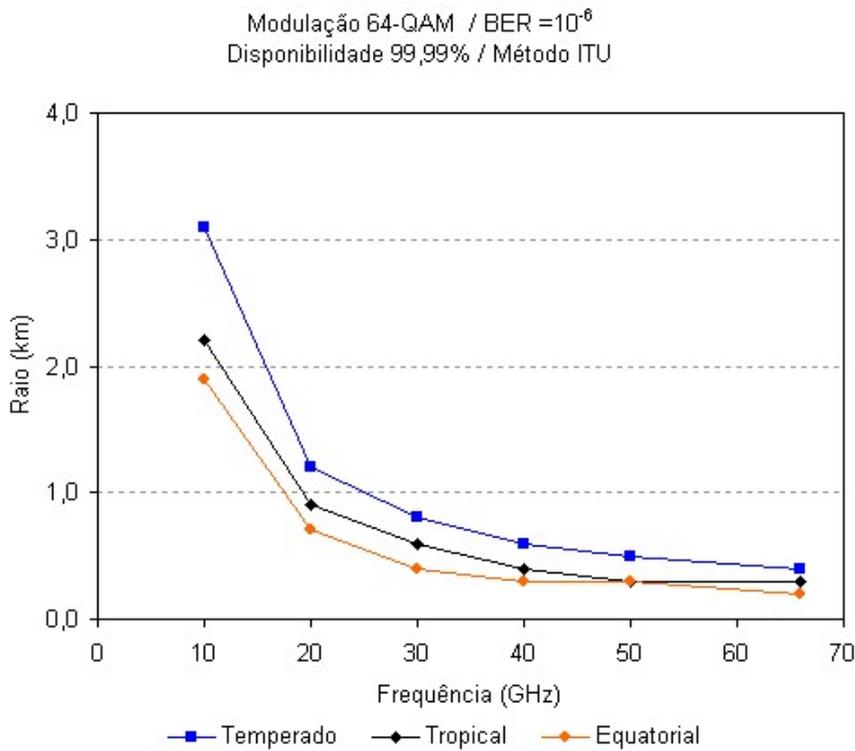


Figura 5.6 – Raio máximo das células em condições de chuvas para climas diferentes (64-QAM)

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.

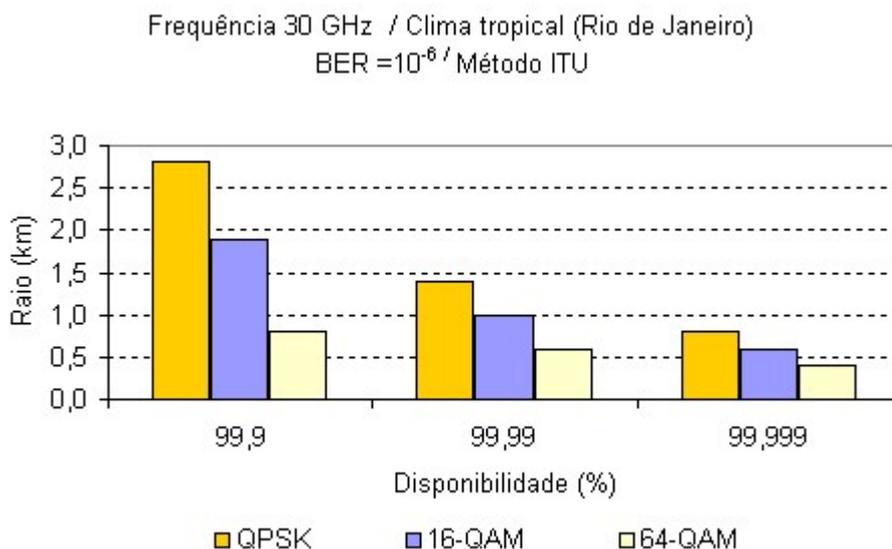


Figura 5.7 – Efeito da especificação da disponibilidade no raio máximo da célula em condições de chuvas

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.

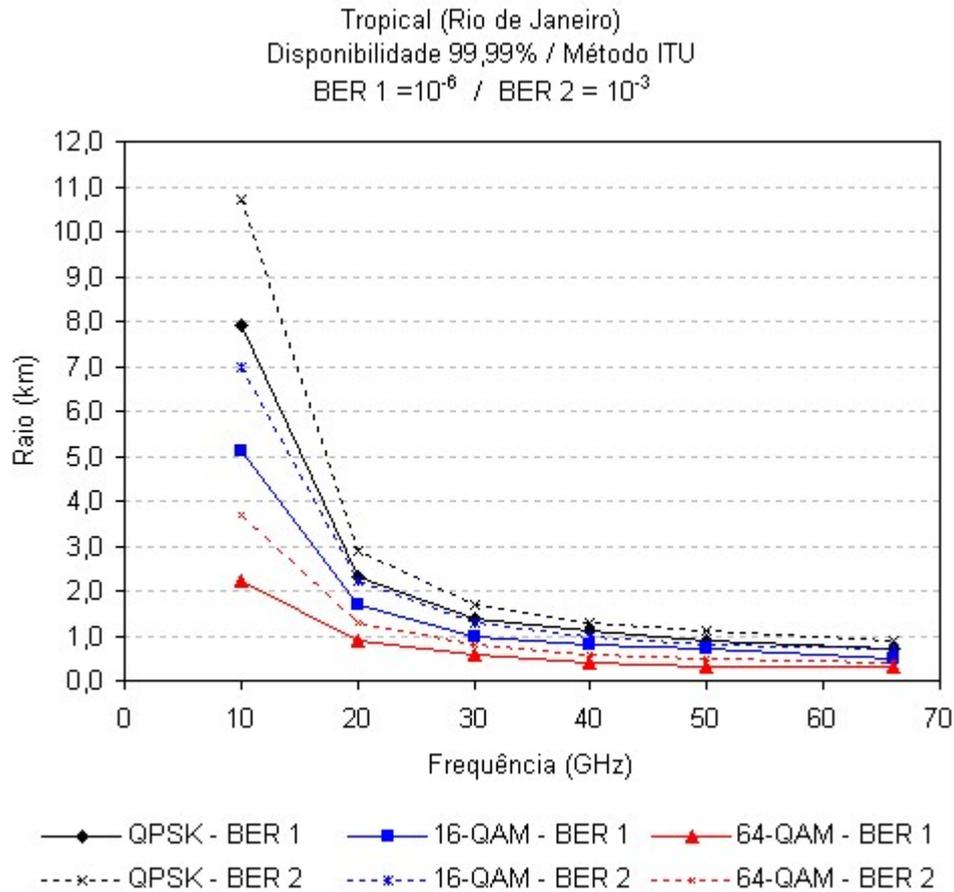


Figura 5.8 – Variação do raio máximo da célula em condições de chuvas conforme a especificação da taxa de erro de bits e do tipo de modulação utilizado

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].

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

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].

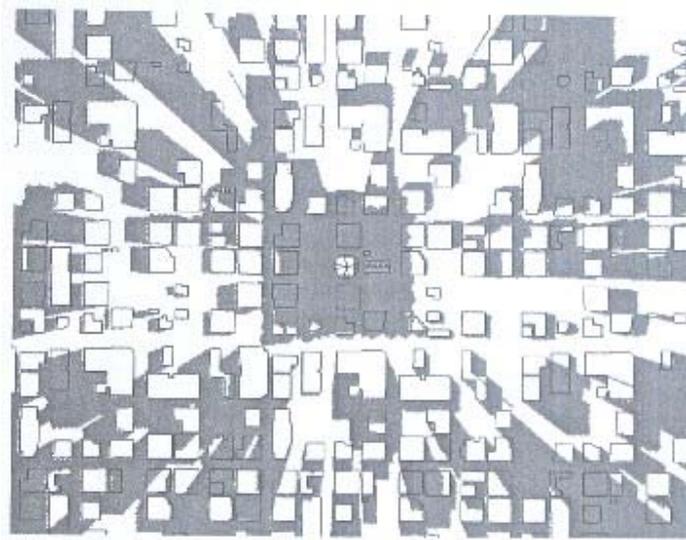


Figura 5.9 – Exemplo de análise de visibilidade [60]

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.