

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

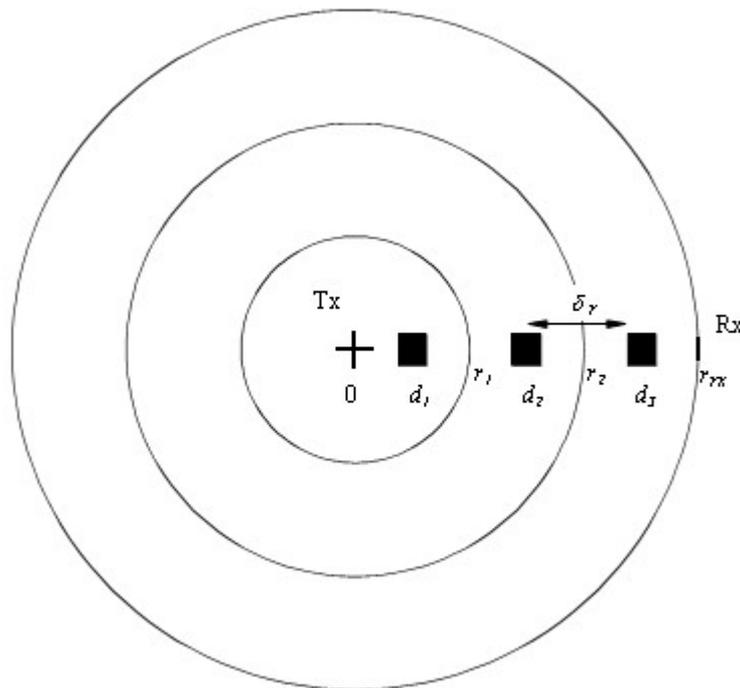


Figura 4.1 – Ilustração da localização das edificações entre as estações transmissora e receptora [43]

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.

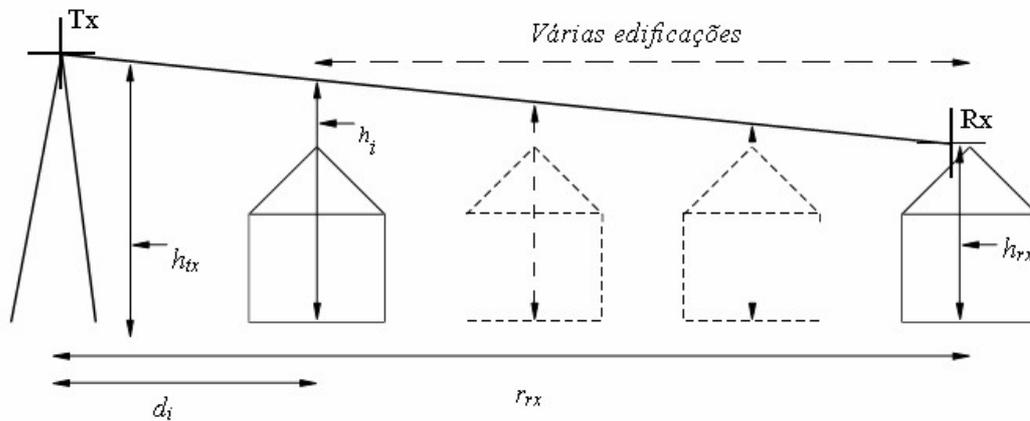


Figura 4.2 – Ilustração das distâncias envolvidas na determinação da condição de desobstrução entre as estações transmissora e receptora [43]

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].

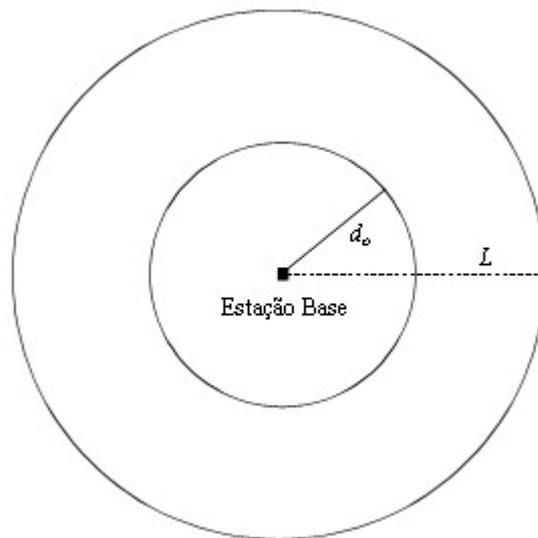


Figura 4.3 – Ilustração de uma célula de raio L e área de cobertura durante a ocorrência de chuvas limitada pelo raio d_o [43]

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.

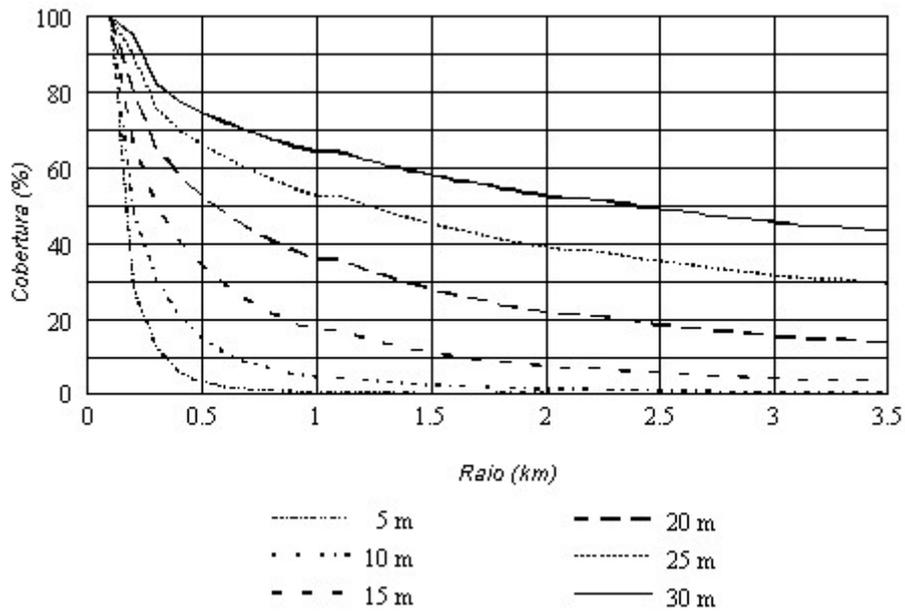


Figura 4.4 – Variação da cobertura em função do raio da célula para diferentes alturas da antena da estação base [43].

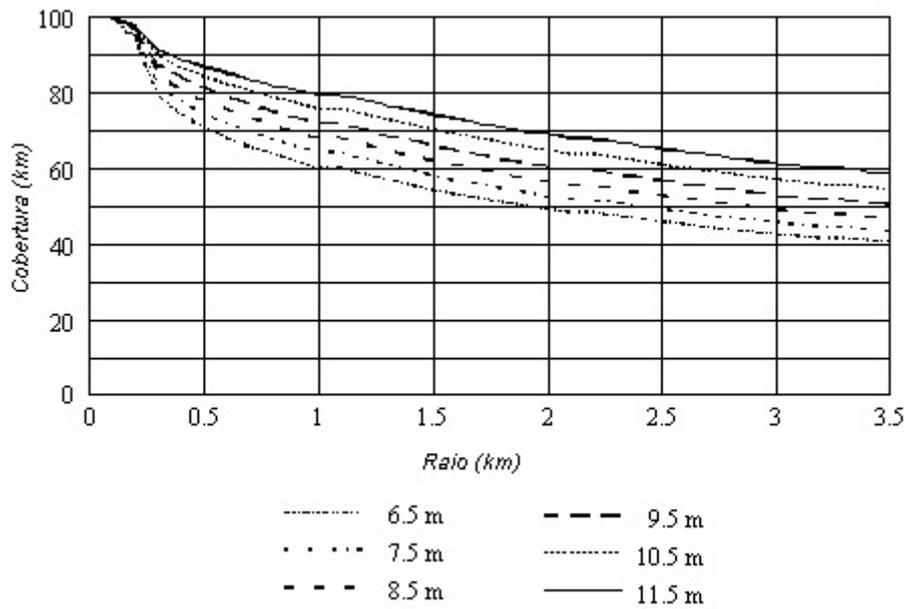


Figura 4.5 – Variação da cobertura em função do raio da célula para diferentes alturas das antenas das estações assinantes [43]

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].

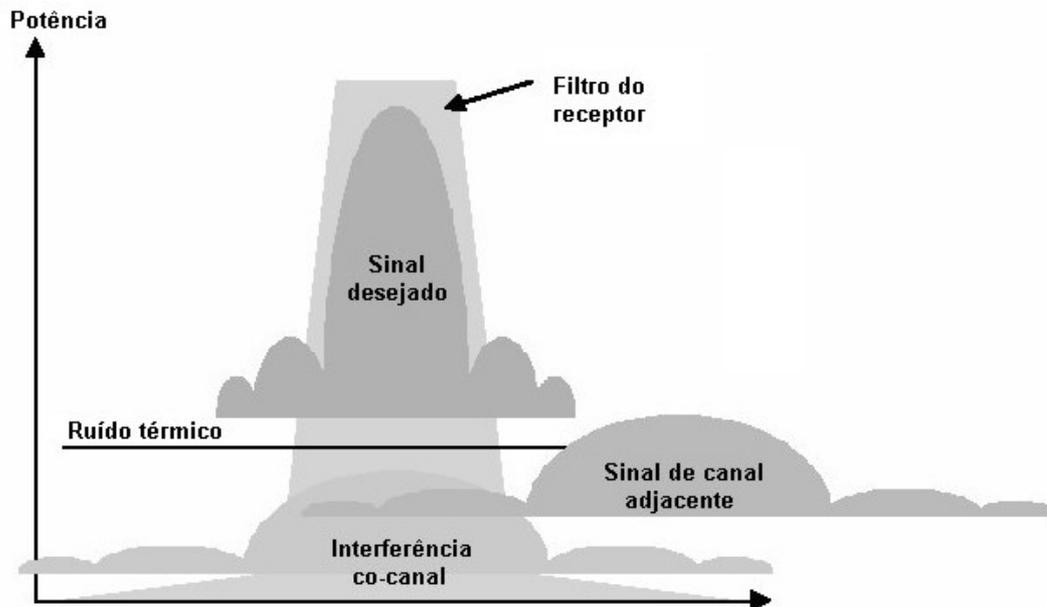


Figura 4.6 – Formas de interferência [11].

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.

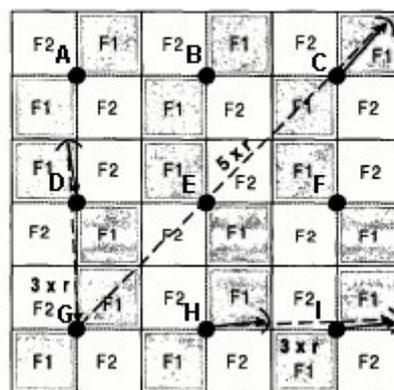


Figura 4.7 – Interferências intra-sistema [46].

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.

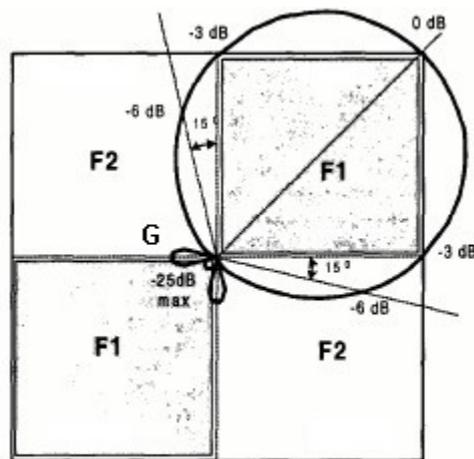


Figura 4.8 – Diagrama de irradiação de uma das antenas da estação base G [46]

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}).

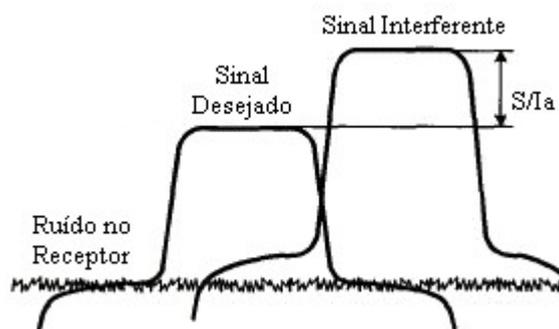


Figura 4.9 – Ilustração de relação sinal/interferência de canal adjacente [46]

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.

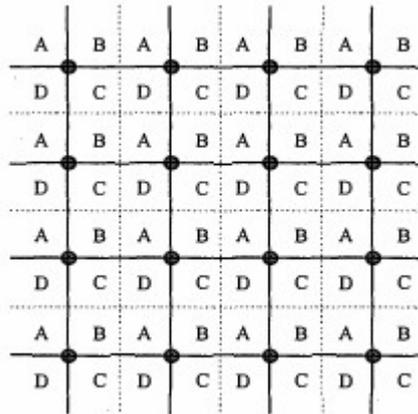


Figura 4.10 – Ilustração de configuração com células retangulares e setores de 90° .

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.

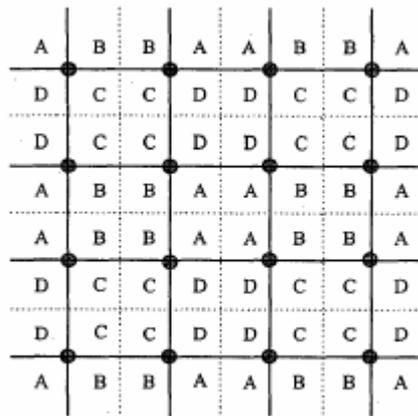


Figura 4.11 – Ilustração de configuração de células com repetição “espelhada” dos canais [54].

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.

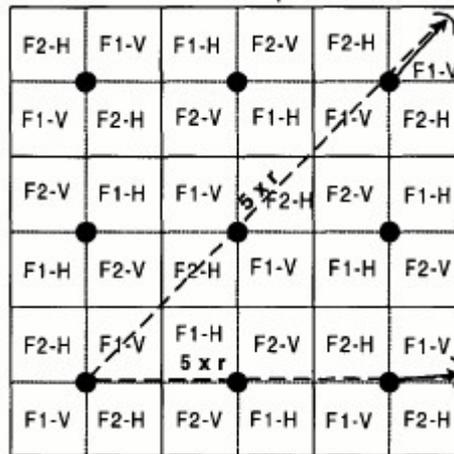


Figura 4.12 – Configuração de células com o uso de polarizações diferentes [46].

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.

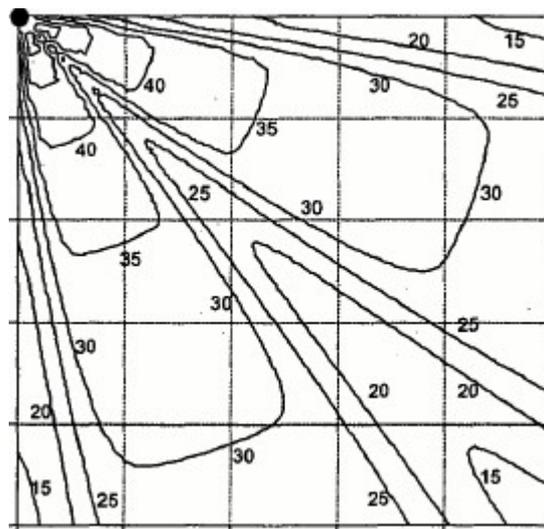


Figura 4.13 – Distribuição de valores de S/I dentro de um setor [54].

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.

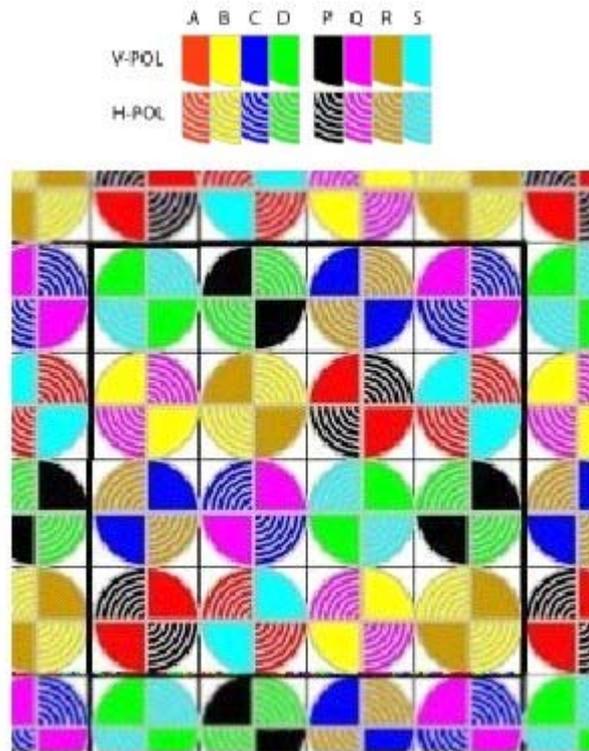


Figura 4.14 – Exemplo de configuração comum [55].

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]

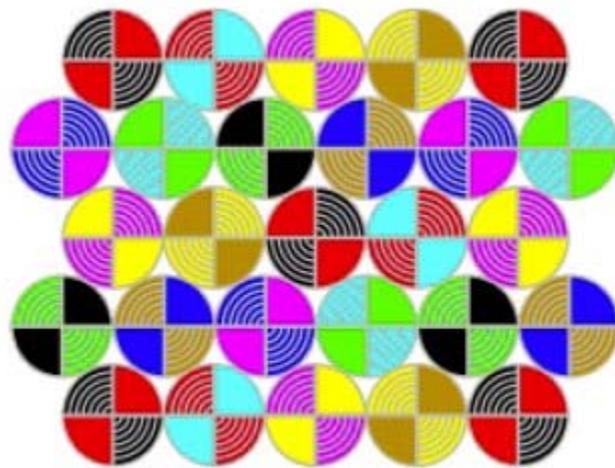


Figura 4.15 – Minimização das áreas sujeitas a problemas de cobertura [55].

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 F2H	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.

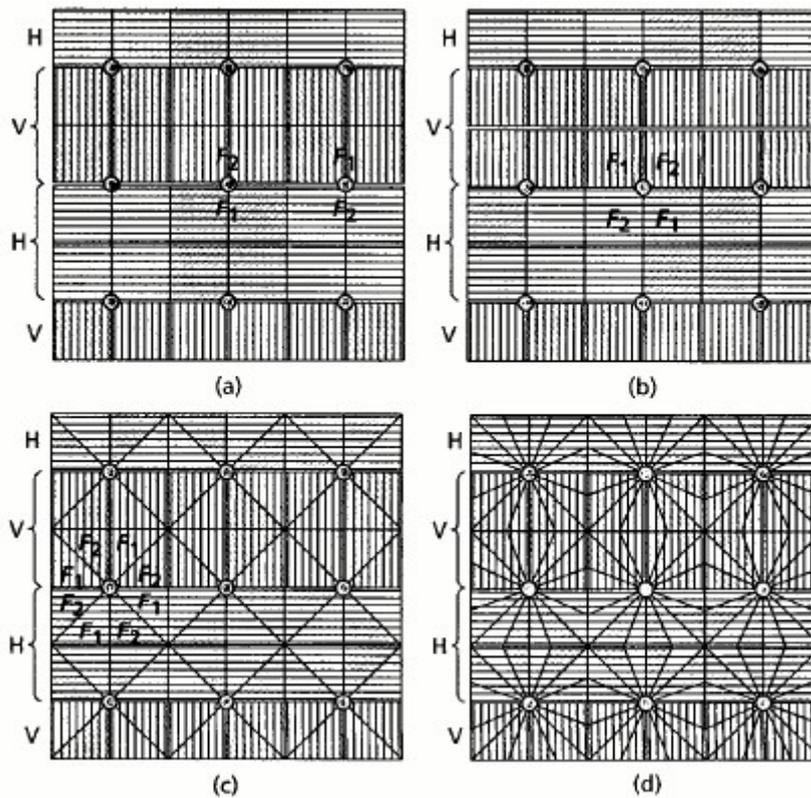


Figura 4.17 – Aumento gradual da capacidade [53]

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.