

2

Meios de transmissão utilizados em redes de telecomunicações

2.1.

Introdução

Atualmente, as estruturas das redes de comunicação são classificadas conforme a escala: rede de acesso, rede metropolitana e rede *backbone*. Nesse capítulo, introduziremos as diferentes tecnologias de transmissão nessas redes.

Hoje em dia, geralmente, as redes das prestadoras de serviços de telecomunicações utilizam redes suportadas por três tecnologias: fibra óptica, par metálico e rádio digital. A escolha desses meios de transmissão é baseada em aspectos econômicos, geográficos, sociais ou técnicos. Basicamente, um critério muito utilizado é de usar par metálico para rede de acesso nas grandes e médias cidades, fibra óptica para conexão entre cidades, estados ou países e rádio como rede de acesso para pequenas cidades ou conexão entre pontos que o relevo não permita a passagem da fibra.

A maioria das redes de transmissão, das operadoras, foi construída no período em que o controle dos serviços era de responsabilidade do governo e a tecnologia predominante era a de par metálico. O objetivo era atender a demanda pelo serviço comutado e esta opção não precisava de um alto investimento. Além disso, nesse período a utilização de fibra óptica como meio de acesso ainda estava em desenvolvimento e ainda não era economicamente viável.

Outra característica marcante é a diversidade de fabricantes por tecnologia, conseqüência, também, do período estatal do mercado de telecomunicação, onde, as decisões de compra eram tomadas em função de licitações e não como a melhor solução técnica.

Nesse capítulo, descreveremos as três tecnologias. Ilustrando dificuldades de implantação, manutenção e gerenciamento. Vale ressaltar que essas tecnologias serão utilizadas na resolução dos problemas propostos por essa dissertação.

2.2. As Redes de Comunicação

Com a disseminação da Internet podemos acessar qualquer tipo de informação, em alta velocidade, em qualquer momento e em qualquer ponto do planeta. E com o aumento dos produtos oferecidos, como jogos on-line, videoconferências, VoIP e transmissão de TV, a demanda por banda larga exige uma ampliação e melhor utilização dos meios de transmissão existentes.

Uma tecnologia como fibra óptica possui os requisitos necessários para suportar a demanda necessária para os aplicativos acima mencionados, porque é potencialmente capacitada em termos de limite de banda (aproximadamente 50 terabits por segundo) [2, 3], baixo sinal de atenuação, baixo sinal de distorção e baixo consumo de energia elétrica. Por causa, de todas essas qualidades mencionadas, em inúmeras redes a tecnologia utilizada na camada física é a fibra. Porém, o seu alto custo de implantação e manutenção não a torna viável para todos os casos, e com isso, outras duas tecnologias são amplamente requisitadas para atender demandas específicas: rádio e par metálico.

Por outro lado, a tecnologia de rádio digital como meio de transmissão atinge localidades onde o acesso físico é impossibilitado por causa do relevo. Com um alto custo de implantação devido à construção de torres e toda infraestrutura que suporta as antenas, a sua utilização só é considerada em situações crônicas. Com banda entre 2 Mbps a 155 Mbps, sua utilização foi determinante na implantação dos *backbones* da região norte e interiores dos grandes estados do Brasil. Um problema marcante nessa tecnologia é o custo de manutenção, pois como é utilizada em locais de difícil acesso, os reparos ficam muito dispendiosos.

Por outro lado, a tecnologia baseada em par metálico é bem capilarizada nas grandes capitais, por ser o meio corrente de transmissão do serviço de voz. Porém, para circuitos de baixa velocidade ou serviços de pequeno porte, o meio mais utilizado é o par metálico. Como as redes de transmissão das operadoras foram estruturadas em função do legado do período estatal, o alcance dessa rede é de quase 100% nos novos pontos que entram na rede. Por outro lado, uma característica negativa é a limitação de banda que impede de ser utilizada em muitos produtos das empresas.

Atualmente, as redes de comunicação são sub-divididas em três tipos: acesso (dimensões de 1-10 km), metropolitano (em torno de 10-100 km) e *backbone* (maior que 100 km), conforme Fig. 1. Cada tipo de sub-rede possui um

conjunto de funções diferentes e cada uma tem um conjunto diferente de desafios, requisitos tecnológicos e problemas pesquisados.

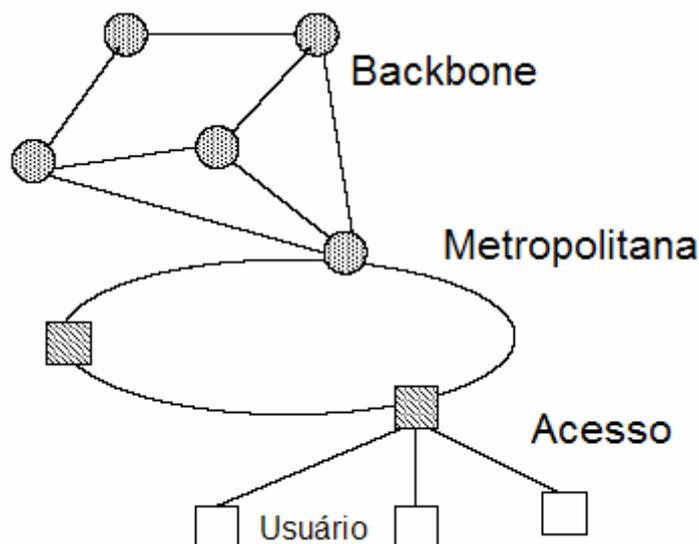


Figura 1 - Estrutura da rede, atual, em *backbone*, metropolitana e acesso

As redes de acesso conectam os usuários (casa ou comércio) para prover o serviço, em outras palavras, ela serve como “*last mile*” para o fluxo da informação. Em geral, o *last mile* torna-se o gargalo da infra-estrutura da rede [4]. É nessa sub-divisão da rede que encontramos a maior presença da tecnologia de par metálico, devido ao serviço comutado, cujo baixo custo e capilaridade facilitam o atendimento aos clientes.

As redes metropolitanas (ou metro) cobrem grandes regiões geográficas, ou seja, centenas de quilômetros quadrados. Essa sub-divisão de rede interconecta as redes de acesso com o *backbone* das operadoras. Normalmente, a camada física na rede metropolitana é baseada no conceito SONET/SDH.

A rede *backbone* possui nós de rede ópticos interconectados por malha com os *links* de fibra. O tráfego do usuário final é coletado pela rede de acesso e enviado para o *backbone* através da rede metropolitana. O planejamento e gerenciamento desse *backbone* óptico são uma área de estudos amplamente investigada.

2.3. Fibra Óptica

Fibra óptica é o meio físico para transporte dos sinais em redes ópticas. A sua geometria será a seguir apresentada assim como suas propriedades e características de transmissão serão resumidas.

2.3.1. Transmissão do sinal óptico

O material constituinte das fibras ópticas é o silício. Um corte seccional numa fibra é mostrado na figura 2. É no núcleo que a luz viaja e este é envolvido por um manto que mantém os raios dentro do núcleo. O tamanho do núcleo da fibra óptica determina as características de propagação da luz. Cada sinal óptico é gerado por inúmeros pulsos, e todos se propagam ao mesmo tempo na fibra. Isto ocorre em fibras *multimode*, porém pode causar problemas com cada onda chegando ao final da fibra fora de sincronização. A maioria das redes óptica moderna utiliza fibras *singlemode*, que possui um núcleo menor que a *multimode*. O tamanho do núcleo é pequeno o bastante para garantir a passagem de único pulso de cada sinal óptico que viaja na fibra, evitando assim problemas na recepção final. Para se ter uma idéia do tamanho, em uma fibra *singlemode* o núcleo possui, normalmente, em torno de 10 micrometros de diâmetro e o manto é mais de 10 vezes este tamanho, aproximadamente 125 micrometros. Uma camada de polímero é adicionada para proteção e todo material termina possuindo cerca de 0,25 milímetros de diâmetro.

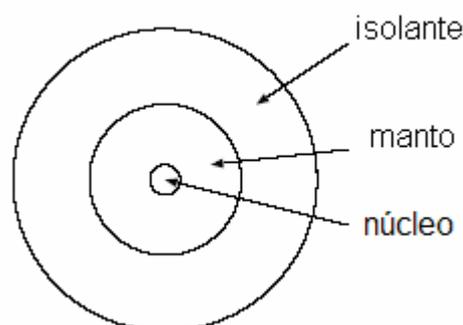


Figura 2 - Corte seccional da fibra

O sinal óptico é propagado pelas fibras por milhares de quilômetros. A figura 3 ilustra o princípio da reflexão entre dois materiais com diferentes índices de refração. O índice de refração é a razão entre a velocidade da luz no espaço e a

velocidade da luz no meio. O índice de refração do meio 1 é n_1 e o índice de refração do meio 2 é n_2 . As relações entre o ângulo incidente θ_i , o ângulo de reflexão θ_r , e o ângulo do raio transmitido θ_t são:

$$\theta_r = \theta_i \quad (2.1)$$

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_i) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_t) \quad (2.2)$$

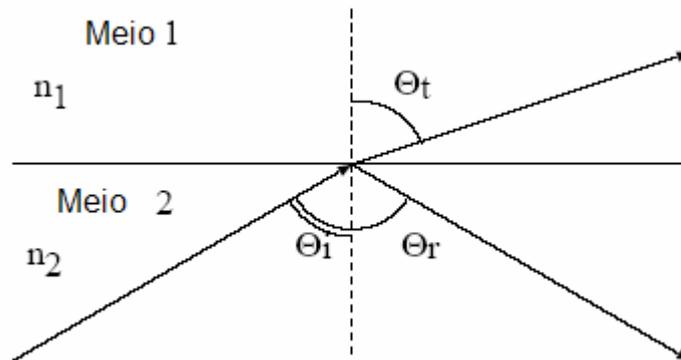


Figura 3 - Refração e reflexão do raio

A equação 2.2 é chamada Lei de Snell, e descreve o ângulo de refração do raio na borda de dois meios diferentes. Há um ângulo crítico θ_c para o raio incidente, onde

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.3)$$

Para ângulos maiores que θ_c a energia do raio incidente é totalmente refletida resultando no raio guiado. Raios guiados são usados para transmitir os sinais ópticos.

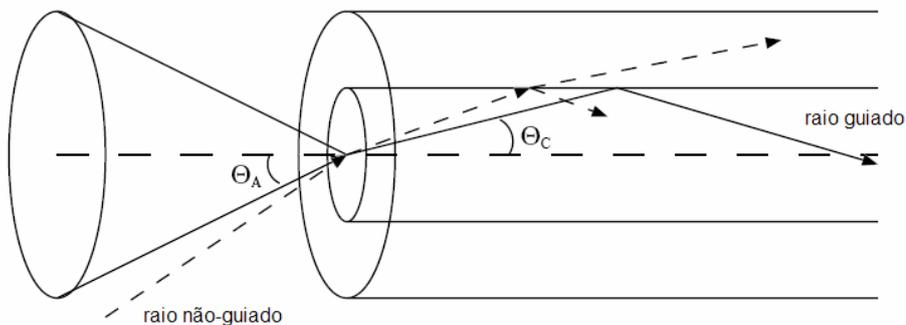


Figura 4 - Propagação do raio na fibra

O núcleo da fibra possui índice de refração n_1 e o manto possui um índice de refração ligeiramente menor n_2 ($n_2 < n_1$). A Figura 4 ilustra a propagação do raio de luz na fibra. O raio de luz entra na fibra, com um ângulo incidência suficientemente pequeno, propaga-se através da fibra refletindo-se nas paredes do núcleo. Um raio não-guiado que entra na fibra com um ângulo grande é parcialmente refratado em cada salto. O maior ângulo de um raio guiado é chamado de ângulo de aceitação θ_A , e pode ser calculado de acordo com o índice de refração do meio. Se o raio penetra na fibra a partir do ar, o ângulo de aceitação é dado por:

$$\theta_A = \sin^{-1}\left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) \quad (2.4)$$

Nos trechos com equipamentos de WDM (*Wavelength-division multiplexing*), a largura de faixa da fibra é dividida em diversos canais, cada um operando com diferentes comprimentos de onda. O número de canais que pode existir em uma única fibra é limitado, primeiramente, pelo total de largura de faixa disponível na fibra e o espaçamento entre os canais [5, 6]. Convencionalmente, as fibras possuem baixa atenuação na faixa de 1.335 nm – 1.625 nm. O comprimento de onda dos canais deve ser suficientemente espaçado evitando sobreposição de sinais entre os canais, e conseqüentemente interferência entre os canais. No DWDM (*Dense wavelength-division multiplexing*) um grande número de comprimentos de ondas (em torno de 160) é utilizado em uma fibra. Uma alternativa é a tecnologia WDM com um menor número de comprimentos de onda (menos que 10).

2.4. Par metálico

Sendo o meio de transmissão mais antigo entre os tratados nessa dissertação, suas características voltadas para o serviço comutado limitam sua área de atuação. Por outro lado, não existe um meio de transmissão com uma capilaridade equivalente ao par metálico.

Composto por dois fios de cobre, isolados e com aproximadamente 1 mm de diâmetro formam uma espiral, como uma molécula de DNA [1]. Essa disposição tem o objetivo de reduzir a interferência elétrica, provocada por outros

pares próximos, pois dois fios em paralelo constituem uma antena simples, e esta não é a função desejada para o par metálico.

Como já foi dito, a principal aplicação do par metálico é no sistema telefônico. Outra vantagem, que o par possui é de não precisar de amplificadores para distâncias longas.

Em prédios, se os pares que sobem no mesmo duto para atender um andar, por exemplo, não estiverem bem trançados, os usuários sofreram de interferência ou ruído ao utilizar o serviço prestado.

Apesar de poder ser usado, tanto para transmissão digital e analógica, a sua largura de faixa depende do diâmetro do fio e da distância entre seus extremos. Apesar de um desempenho limitado, o seu baixo custo garante a permanência e viabilidade na sua utilização.

Hoje em dia, as operadoras utilizam essa rede para fornecer, por exemplo, conexões de banda larga. Porém a limitação em relação à distância impossibilita muitos usuários de terem acesso a esse serviço, pois se encontram longe da estação mais próxima. Através de um teste de avaliação do local efetuado no momento da pré-venda, muitos usuários são desqualificados, pois não teriam um serviço de qualidade aceitável.

2.5. Rádio Digital

Rádio digital ponto a ponto é mais um meio de comunicação utilizado em redes de telecomunicações. Como a fibra óptica, essa tecnologia pode ser utilizada nos três tipos de sub-divisões das redes: acesso, metropolitana e *backbone*.

Com um alto custo de implantação e manutenção, esse meio é utilizado em localidades de difícil acesso, longe dos centros urbanos e em relevos que impossibilitam a implantação de fibra ou par metálico.

Nos sub-capítulos seguintes serão apresentadas características e propriedades desse meio de comunicação.

2.5.1. Transmissão

Todo enlace de rádio digital é utilizado para transmissão de informação entre dois pontos fixos, tendo o espaço livre como meio de propagação. Por conseqüência, muitos dos problemas, do dia-dia, ficam fora de controle.

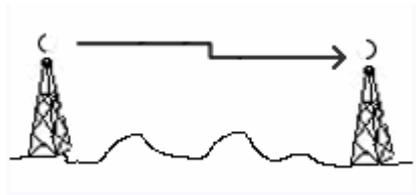


Figura 5 – Transmissão ponto a ponto entre dois pontos fixos

As principais aplicações de enlaces rádio digital ponto a ponto são:

- Rede de transporte das operadoras de telefonia fixa e celular. São muito utilizados pelas operadoras de celular na interligação de ERBs (Estação Rádio Base) com as CCCs (Central de Comutação e Controle);
- Redes de dados para atendimento de clientes corporativos, principalmente na implantação do acesso;
- Redes de distribuição de sinais de TV;
- Provedores de internet.

Nessa tese, o foco será na sua utilização para redes de dados, pois esse meio de transmissão é utilizado para conectar clientes em locais afastados dos grandes centros urbanos e em localidades que o relevo impede a implantação de fibra ou par metálico. No Brasil, esse meio é amplamente difundido nos interiores dos estados e na região norte.

Apesar do seu alto custo de implantação (pois envolve muitas vezes construção de torres, aluguel de terreno e transporte de material) essa solução sempre é utilizada para conectar muitos pontos em projetos para clientes corporativos. Além disso, a topologia predominante, quando envolve rádio digital, é a estrela.

Para transmissão, a informação (voz, dados e imagens) é digitalizada e transportada em canais padronizados (SDH e PDH). No próximo capítulo estaremos detalhando mais esses canais padronizados.

Todos os passos para essa digitalização da informação podem ser visualizados no diagrama funcional, abaixo:

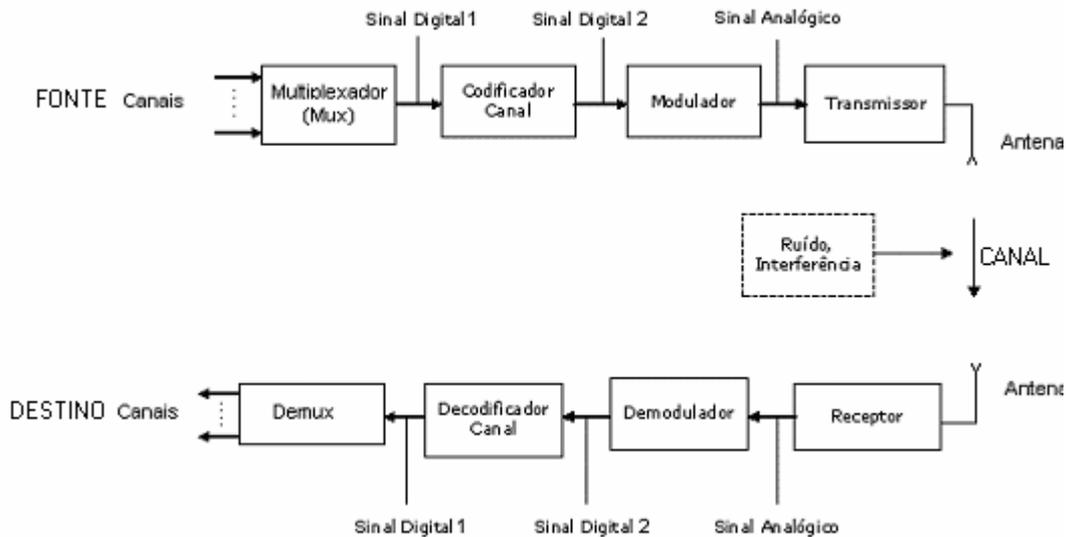


Figura 6 – Diagrama funcional do enlace digital ponto a ponto.

Como pode ser visto acima o sinal transmitido no canal de comunicações encontra-se na forma analógica, porém, entre a fonte e o destino existe um processo de digitalização dos sinais envolvidos.

O Sinal Digital 1 em um enlace rádio digital assume normalmente um dos formatos PDH (E1 a E4) ou SDH (STM1) apresentados na tabela a seguir.

Hierarquia Digital	Taxa de Bits		Capacidade de Multiplexação de Canais
	Notação Usual	Valor Exato	
E1	2 Mbps	2.048 kbit/s	30 canais de 64 kbit/s
E2	8 Mbps	8.448 kbit/s	4 E1
E3	34 Mbps	34.368 kbit/s	16 E1
E4	140 Mbps	139.264 kbit/s	64 E1 ou 4 E3
STM-1	155 Mbps	155.520 kbit/s	63 E1 ou 3 E3

Tabela 1 – Tabela de Hierarquia Digital

O multiplexador na entrada permite o transporte de canais com hierarquia (taxas de bits) menor que a do Sinal Digital 1 conforme indicado na tabela.

O sinal Digital 1 é codificado gerando o sinal Digital 2. A finalidade desta codificação (codificação de canal) é melhorar a confiabilidade com que a informação é transmitida, permitindo que erros na transmissão sejam detectados e corrigidos. Podem ser utilizados dois tipos de códigos:

- Códigos de linha são os códigos referentes ao formato do sinal digital. Eles são utilizados na transmissão de um sinal digital de modo a eliminar uma longa seqüência de 0's ou 1's reduzindo a probabilidade de erro na transmissão. Exemplos: AMI, HDB-3 e CMI.
- Códigos para detecção e correção de erro como os FEC (*Foward Error Correction*).

Em seguida, o Sinal Digital 2 é então modulado sendo gerado desta forma um sinal analógico que pode ser transmitido na freqüência de operação do rádio.

A principal função da modulação é permitir que estes sinais de banda básica sejam transmitidos em freqüências mais altas possibilitando a ocupação do espectro eletromagnético. Os principais tipos de modulação são a *Amplitude Shift Keying (ASK)*, *Frequency Shift Keying (FSK)*, *Phase Shift Keying (PSK)* e a *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*.

Hoje em dia, os enlaces rádio digital estão utilizando modulações cada vez mais eficientes nas quais um símbolo representa mais de 1 bit. Estes esquemas de modulação permitem aumentar a taxa de bits transmitida em uma banda de freqüências, mas tornam a transmissão mais sensível a ruídos e interferência exigindo assim uma melhor codificação de canais além de outros cuidados no projeto e implantação do enlace.

O sinal modulado é amplificado e transmitido sendo recebido na outra ponta onde é demodulado e o sinal digital original é recuperado.

No próximo sub-capítulo falaremos sobre o enlace, ou seja, a propagação entre transmissor e receptor, onde sinal é atenuado e está sujeito a ruído e interferências.

2.5.2. Enlace ponto a ponto e multi-ponto

No dimensionamento de um enlace de rádio o objetivo é garantir que o sinal digital original que transporta a informação possa ser regenerado na outra ponta com uma taxa de erros aceitável. Para que isto ocorra a relação de potência entre a portadora e o ruído (C/N) na recepção tem que ser maior que um valor mínimo especificado. Este valor é função da modulação e mecanismos de codificação utilizados no enlace.

A potência do transmissor e das antenas deve ser dimensionadas de modo a compensar as perdas na propagação e outras referentes à polarização cruzada e atenuação nos conectores, cabos coaxiais ou guias de ondas.

É necessário também incluir uma margem de segurança para fazer frente a sinais interferentes próximos a banda de freqüências utilizada pelo enlace. Estes sinais podem aumentar o nível de ruído no receptor e por conseqüência deteriora a relação portadora ruído.

Em um enlace rádio o sinal é transmitido pela antena transmissora e propaga-se na forma de ondas de rádio (ondas eletromagnéticas) até a antena receptora. Ao se propagar de uma antena até a outra o sinal é atenuado estando sujeito às seguintes perdas:

1. Perdas no espaço livre: Apenas parte da energia transmitida através das ondas eletromagnéticas é captada pela antena receptora. Esta energia é tanto menor quanto maior a freqüência e a distância. Esta perda, denominada perda no espaço livre é expressa em dB pela seguinte fórmula.

$$\text{Perda no espaço livre (L)} = 32,5 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (2.5)$$

Onde, d é a distância em km e f a freqüência em MHz.

2. Desvanecimento: Ao se propagar as ondas de rádio estão sujeitas a reflexões no solo e na atmosfera que provocam alterações na sua amplitude e caminho percorrido ocasionando variações na potência do sinal recebido. Estas variações são chamadas de desvanecimento (fading). O desvanecimento pode ser causado também por obstáculos na linha de visada direta, ou por atenuação devido a chuvas.
3. Disponibilidade do enlace: Compensar todas as perdas no enlace devido a desvanecimento pode levar a utilização de margens muito grandes encarecendo ou até inviabilizando o enlace. Em certos casos, principalmente em freqüências mais altas onde a atenuação devida a chuvas é maior, procura-se especificar uma margem que garanta uma alta disponibilidade para o enlace, admitindo-se, no

entanto, que ele fique indisponível por um certo período de tempo. Por exemplo, um enlace com uma disponibilidade anual 99,995% ficará indisponível 26,28 minutos no ano. Em frequências acima de 10 GHz e em regiões de clima tropical como o Brasil a atenuação por chuva é um fator relevante no dimensionamento de enlaces de rádio. Este dimensionamento é feito utilizando modelos de estimativa de chuva da UIT ou outros desenvolvidos no Brasil.

É importante lembrar que a disponibilidade do sistema como um todo é menor que a disponibilidade do enlace, pois deve-se levar em consideração as falhas nos equipamentos que o compõem.

A topologia ponto a ponto tem com objetivo atender duas grandes demandas:

- Um escritório central ou matriz de uma empresa, a partir do qual se interliga outro escritório na mesma região (filiais);
- Um Ponto de Presença da rede multi-serviços de uma operadora de serviços de telecomunicações, a partir do qual se atende um usuário de uma região.

Na configuração Ponto-Multiponto o conceito é atender vários usuários simultaneamente a partir de um único ponto chamado de estação Master. Este ponto é estrategicamente posicionado para cobrir a área de interesse de atendimento. Ele pode ser:

- Um escritório central ou matriz de uma empresa, a partir do qual se interligam outros escritórios na mesma região (filiais);
- Um Ponto de Presença da rede multisserviços de uma operadora de serviços de telecomunicações, a partir do qual se atendem vários usuários de uma região.

Na arquitetura Ponto-Multiponto, são formadas células que podem utilizar antenas tipo omnidirecional (360°) ou diretiva setorial. O ângulo de cobertura da antena diretiva pode ser de 30°, 60°, 90° ou 120° dependendo da área em questão. Estas células podem ser configuradas para operar com várias antenas posicionadas seqüencialmente formando setores consecutivos que proporcionam uma grande área de cobertura.

Dependendo da demanda existente numa região específica é possível instalar várias antenas (cada uma com seu rádio) com o objetivo de aumentar a largura de faixa. Nesses casos, onde a estação *Master* possui vários rádios operando simultaneamente, é conveniente realizar um sincronismo entre os rádios para evitar interferências do próprio sistema.

Assim como na arquitetura Ponto a Ponto, podem ser oferecidos os serviços de interligação de redes corporativas ou de acesso a Internet utilizando os rádios *spread spectrum* com suas funcionalidades básicas.

O compartilhamento de banda do rádio para mais de um usuário ou uso de mais de um rádio por setor da célula pode demandar o uso de equipamentos do tipo *Switch's* ou *IP Mux's* (nos pontos dos usuários), além de roteadores no Ponto de Presença (estação *Master*) da operadora de serviços de telecomunicações. Também neste caso estes equipamentos permitem oferecer a funcionalidade de segurança entre as redes dos diversos usuários.