

## Capítulo 2 - Aplicações de Sistemas SCM

### 2.1 - Introdução

Neste capítulo vários tipos de sistemas SCM são descritos. Embora uma lista completa de todas as possibilidades não esteja incluída, estes exemplos servem para ilustrar as vantagens e limitações dos sistemas SCM. Inclusive, várias outras arquiteturas mais complicadas podem ser desenvolvidas por variações ou combinações destes tipos básicos.

### 2.2 - Sistema de Distribuição Banda Larga Bidirecional

Uma aplicação, mostrada na Fig. 2.1, é um sistema de distribuição banda larga que pode ser considerado como parte de uma arquitetura "Fiber-to-the-home" [2]. Neste sistema a multiplexação por divisão de tempo (TDM) é usada para combinar voz, dados e vídeo para cada um dos N assinantes e a

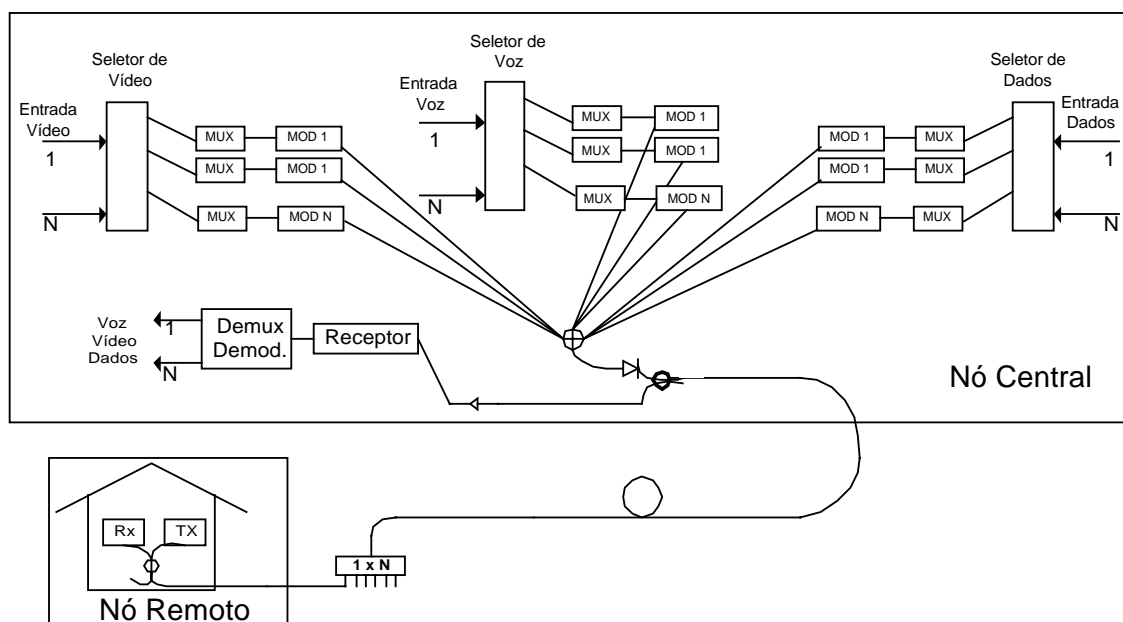


Figura 2.1 – Sistema de Distribuição Banda Larga Usando o Sistema SCM.

SCM é usada para transmitir os sinais de todos os assinantes em um único laser. A SCM também permite minimizar o custo do sistema pelo compartilhamento de laser e fibra entre vários assinantes. Todos os dados destinados a cada ponto são contidos em um único canal, diferente dos sistemas "broadcast" onde cada ponto pode selecionar entre uma variedade de canais. No nó remoto, um divisor óptico passivo é usado para distribuir o sinal para cada assinante. Com esta arquitetura é possível a distribuição de vários canais com taxas da ordem de 100 Mbps.

### ***2.3 - Substituição de Enlaces ponto a ponto de RF ou Microondas***

Uma subportadora óptica pode ser considerada para a substituição direta de uma portadora de RF/Microondas em um sistema elétrico (cabo coaxial ou guia de onda). O uso de uma fibra óptica como meio de transmissão traz algumas vantagens. Provavelmente a mais significativa seja a baixa perda incremental com o comprimento do enlace. A principal perda em um sistema de fibra é tipicamente nas conversões elétrico-ópticas no transmissor e receptor, enquanto que as perdas reais nos cabos ópticos estão em torno de três ordens de magnitude abaixo que nos cabos coaxiais. Isto significa que em frequências de microondas (e além) sistemas baseados em fibras ópticas têm uma perda de inserção menor que sistemas de cabo coaxial para comprimentos de enlace da ordem de dezenas de metros.

Outra importante característica das fibras ópticas é o seu baixo peso e tamanho. Em sistemas onde o volume é uma preocupação, como por exemplo aviação, navegação ou plataformas espaciais, as fibras ópticas tornam-se bastante atraentes. Isto é especialmente verdade em sistemas complexos como "arrays" de antenas onde os sinais devem ser distribuídos entre vários componentes e subsistemas. A ausência das interferências eletromagnéticas é outra característica interessante em tais sistemas.

Considerando o uso de um enlace de fibra óptica, um projeto de RF/Microondas deve levar em consideração um número maior de parâmetros além da perda de inserção, como a largura de banda, relação sinal ruído ou alguma figura de ruído, linearidade e faixa dinâmica.

O casamento de impedâncias não dissipativas na fonte e no detector melhora o ganho do enlace, e aumenta a sua eficiência de conversão. Deve ser notado, porém, que as técnicas de casamento de impedância restringem a largura de banda. A maioria dos sistemas analógicos será limitada por ruído balístico; entretanto, o melhoramento do detector tem pouco ou nenhum efeito na figura de ruído, onde o casamento de impedâncias e/ou aumento na eficiência de conversão melhora (ou seja, diminui) a figura de ruído. Estas conclusões são verdadeiras para modulações direta e externa. A maior diferença entre os dois casos é quando um acréscimo na potência óptica é considerado. Para modulação direta, o ganho do enlace não é melhorado (a modulação de RF no laser é a mesma) e o aumento no ruído balístico significa o aumento da figura de ruído. No entanto, a consideração da figura de ruído significa que sistemas diretamente modulados devem operar em um nível de potência óptica o menor possível que seja consistente com as condições demodulação. Para modulação externa, embora o ruído balístico ainda aumente com a potência óptica, o ganho do enlace aumenta quadraticamente devido à natureza quadrática do fotodetector. Isto significa que a figura de ruído decai (quase linearmente) com o aumento da potência óptica.

## **2.4 - Sistemas de distribuição de vídeo**

Provavelmente a maior área de aplicação para sistemas SCM por fibras ópticas até o momento tenha sido em distribuição de vídeo ou serviços de CATV. As distâncias de transmissão em tais redes são relativamente pequenas, e os níveis de potência óptica recebida são tais que o ruído balístico ou o RIN são os tipos de ruído dominantes. Linearidade é uma importante preocupação mesmo para profundidades de modulação moderadas porque os sistemas tipicamente envolvem a distribuição de vários canais. Um grande número de produtos de intermodulação cai em cima ou próximo das frequências das subportadoras e o efeito cumulativo ou *composto* destes produtos - composto de Segunda ordem (CSO) e composto de terceira ordem (CTB) - devem ser levados em consideração. Por exemplo, com a

multiplexação de 60 canais igualmente espaçados, mais de 100 produtos de intermodulação podem cair em várias subportadoras (predominantemente na banda central) enquanto que algumas dezenas de produtos de segunda ordem surgirão em algumas frequências (predominantemente na extremidade da banda). Quando poucos canais precisam ser transmitidos, ocupando menos que uma oitava da largura de banda, é obviamente vantajoso já que os efeitos dos produtos de Segunda ordem são evitados.

A maioria dos sistemas de distribuição de vídeo usa transmissão na banda vestigial AM (AM - VSB) para compatibilidade com os receptores de televisão comuns. Especificações típicas para uma rede tronco de distribuição (de 40 a 80 canais) são:  $CNR > 55$  dB,  $CTB < -65$  dBc e  $CSO < -55$  dBc [3].

A modulação de grupo também tem sido sugerida para diminuir as necessidades dos parâmetros de CATV. Grupos de canais individuais com subportadoras são modulados em portadoras de um nível mais alto (com FM sendo usada nestas portadoras). Isto pode reduzir a intermodulação dentro dos grupos e com uma escolha apropriada das faixas de frequência pode reduzir a interferência. No entanto, isto causa implicações na arquitetura da rede.

O vídeo digital pode também ser distribuído pelo uso de modulação digital com portadora FSK ou PSK, por exemplo. Descomprimido com técnica tradicional, cada canal de vídeo requer uma taxa de aproximadamente 100 Mbps. Porém, desenvolvimentos recentes no padrão de compressão de vídeo MPEG devem permitir transmissões a taxas menores que 6 Mb/s. Em curto prazo, a simplicidade do receptor, sua disponibilidade devido aos serviços de broadcast via satélite, e a diferença muito pequena nos requisitos de CNR sugerem que o vídeo FM deve ser mais atrativo que o FSK. Porém, os desenvolvimentos no campo da compressão de vídeo sugerem que em breve o vídeo digital se tornará a melhor opção. A modulação em frequência também tem sido considerada para transmissão de HDTV em fibra óptica; uma largura de banda de 108 MHz é necessária em comparação com a taxa digital não comprimida de 432 Mbps [3]. Mais uma vez, técnicas de compressão, que devem diminuir a taxa necessária para aproximadamente 20 Mbps, devem tornar os formatos de modulação digital a melhor escolha.

## **2.5 - Serviços banda larga comutados**

Em longo prazo é esperado que os serviços de ISDN banda larga (B-ISDN) disponibilizarão serviços digitais para os assinantes usando interfaces baseadas em ATM ("Asynchronous Transfer Mode"). As taxas envolvidas (inicialmente 155 Mbps e posteriormente superiores) são tais que as topologias "Fiber-to-the-home" (FTTH) para o "loop" do assinante tornam-se interessantes. Vantagens significantes podem ser conseguidas pelo uso de técnicas SCM para sobrepor os serviços digitais e a distribuição de vídeo. Porém, a curto/médio prazo é improvável que estes serviços utilizem esta largura de banda completamente. São necessárias alternativas de menor custo para as fibras e os componentes optoeletrônicos.

Estas topologias alternativas são a rede óptica passiva (PON - Passive optical network) e "Fiber-to-the curb" (FTTC), nas quais os custos iniciais de instalação são reduzidos pelo compartilhamento de fibra e componentes optoeletrônicos entre grupos de assinantes.

É importante que no projeto da rede a curto/médio prazo haja flexibilidade suficiente para que os objetivos de longo prazo sejam alcançados. Por exemplo, a Fig. 2.2 descreve uma rede de serviços faixa larga na qual um nó remoto serve a 32 assinantes. Oito assinantes estão ligados em cada unidade de rede óptica (ONU); todo o sistema até este ponto, incluindo o divisor de 1:4, é óptico. Para cada assinante é alocada uma largura de banda de 100 MHz do "downstream". Inicialmente esta faixa suportaria dois canais de vídeo FM comutados (para serviços do tipo vídeo sob demanda) e uma conexão ISDN de taxa primária (2 Mbps).

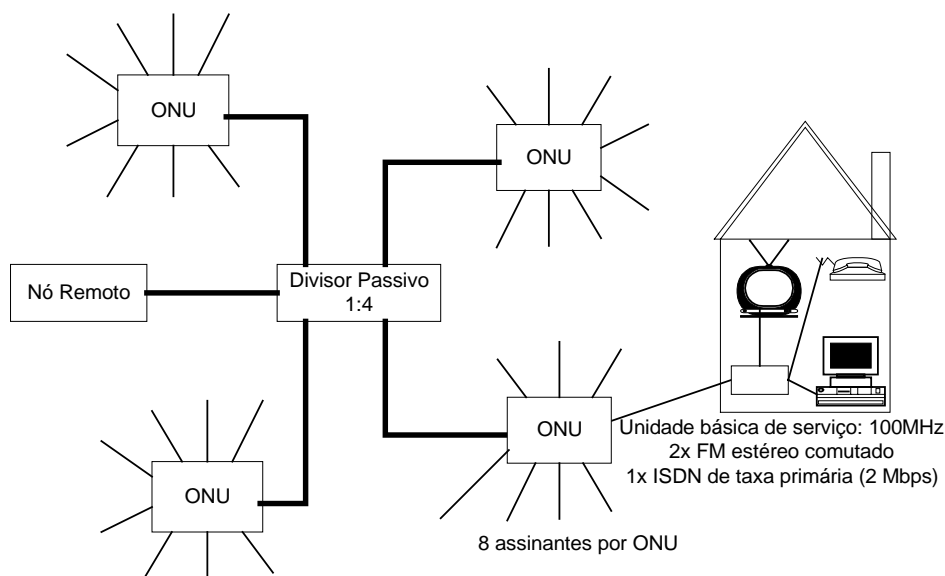


Figura 2.2 - Estrutura *Fiber to the Curb* de uma rede de serviços faixa larga usando SCM.

Na rede óptica estes canais são multiplexados por subportadora (no nó remoto) entre 1 e 4 GHz. Os ONUs convertem os canais necessários para os respectivos assinantes. A taxa primária de "upstream" das conexões ISDN são multiplexadas por subportadoras em uma frequência mais baixa (10 - 106 MHz) nos ONUs. A possível evolução dos serviços de rede comutada é então considerada na Figura 2.3 Inicialmente, em (b), um dos sinais de vídeo FM é substituído por um sinal de HDTV BPSK a 20 Mbps (comprimido). Em (c), é usado QPSK: dois sinais de HDTV são transmitidos na largura de banda anteriormente ocupada por um sinal de vídeo FM, e um serviço de dados a 45 Mb/s substitui o outro sinal de vídeo FM. Finalmente, em (d), um sinal B-ISDN QPSK a 155 Mb/s é transmitido na faixa do canal de 100 MHz do assinante.

Há também várias possibilidades para o uso simultâneo de WDM em tais sistemas.

No sistema da Fig 2.2, o canal de "downstream" emprega transmissores em 1,3  $\mu\text{m}$  e o de "upstream" 1,55  $\mu\text{m}$ . Também é possível o uso de um comprimento de onda para disponibilizar serviços interativos e outro para serviços broadcast (CATV). Em sistemas onde as mesmas frequências

elétricas estão sendo usadas em ambos os comprimentos de onda, as componentes de intermodulação podem ser um sério fator limitante.

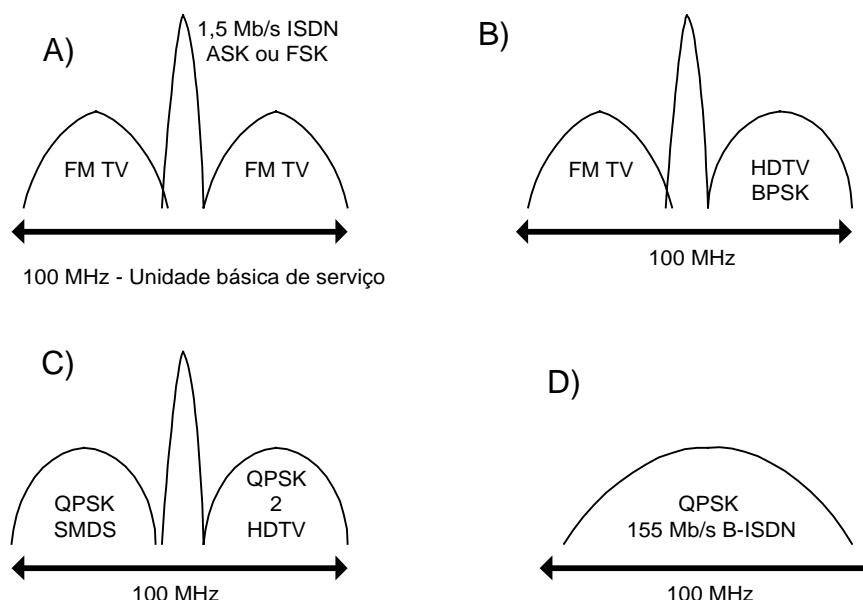


Figura 2.3 – Evolução dos serviços usando 4 configurações para o enlace de usuário de 100 MHz.

## 2.6 - Sistemas Rádio-fibra.

Na seção anterior foi comentado que os custos limitarão o uso de "Fiber-to-the-home" em curto prazo, e "loops" de assinante por par metálico são mais prováveis neste íterim. Uma alternativa para o enlace final por par metálico pode ser um enlace de rádio. A estrutura da rede, com um backbone da fibra óptica conectando os transceptores das estações rádio base, é bastante similar aos usados em uma variedade de aplicações desde a telefonia sem fio e redes de comunicações pessoais (PCN) até "Antenna Remoting" para estações terrestres de satélites. As frequências e tamanho das células serão diferentes, mas basicamente estes sistemas são de um tipo conhecido genericamente como rádio-fibra [4]. A multiplexação por subportadoras tem um papel importante na distribuição da rede de fibra destes sistemas.

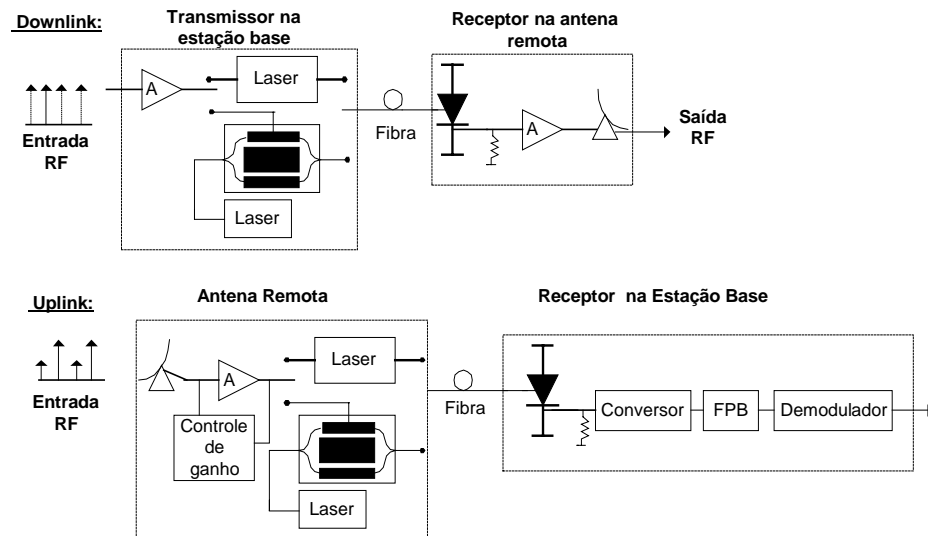


Figura 2.4 – Diagrama de blocos dos links analógicos no “downlink” e no “uplink” para infra-estruturas PCS

Para uma infra-estrutura PCS centralizada, a Fig 2.4 mostra um diagrama de blocos das estações remotas e uma estação base. A configuração mostrada não permite o compartilhamento de fibras entre o “up/”“downlink”” ou entre diferentes antenas remotas. No “downlink”, um sinal modulado em uma única portadora de RF, composta de vários canais de voz TDMA, é amplificado e então usado para modular um laser ou modulador externo. Esta luz modulada é transmitida pela fibra para uma antena remota, detectada, e então amplificada e transmitida para o usuário. As portadoras de RF mostradas com linhas pontilhadas significam que múltiplas portadoras de RF podem ser usadas por uma única antena remota.

No “uplink”, um sinal de RF com SCM (Subcarrier Modulation) é recebido em cada antena remota de usuários transmitindo em frequências diferentes. O sinal desejado de cada usuário é corrompido pelo ruído térmico do receptor e pela interferência co-canal. Também, há sinais interferentes de outras frequências, vindos dos usuários vizinhos que transmitem com frequências



diferentes. Este fenômeno é conhecido como interferência dos canais adjacentes. Em princípio, é possível a filtragem desses sinais interferentes na antena remota usando um filtro passa banda com um alto fator de qualidade, porém isso resulta em unidades remotas mais complicadas e caras.

Por exemplo, uma antena recebendo uma transmissão em uma determinada frequência do “uplink” receberá também transmissões nas outras frequências do “uplink”. Embora estes sinais interferentes possam ser filtrados no receptor da estação base, as não linearidades de terceira ordem devidas a imperfeições no meio óptico resultam em mais distorção não linear na banda do sinal desejado. O impacto dessas não linearidades pode se tornar significativo se as condições de desvanecimento forem tais que o sinal desejado no “uplink” na antena remota seja bem menor que outros sinais recebidos de canais adjacentes.

O ruído e as não linearidades que degradam o desempenho do enlace analógico de fibra ocorrem em estruturas PCS tanto no “downlink” como no “uplink”. No entanto, somente a degradação no “uplink” terá impacto significativo no desenvolvimento do sistema.

No “uplink”, o impacto das não linearidades é bem mais severo que no “downlink”, considerando que as múltiplas portadoras de RF transmitidas no “uplink” têm ampla variação de amplitude. Isto acontece porque os caminhos de propagação dos vários usuários de uma dada antena remota têm diferentes distâncias e diferentes características de sombreamento e multipercursos. Isto resulta frequentemente em interferência por canal adjacente (ACI), com componentes que podem ser até 30 dB maiores que o sinal desejado, mesmo com o controle de potência (isto ocorre porque o desvanecimento por multipercursos em diferentes direções é altamente descorrelacionado). Também, há muito mais portadoras transmitidas através da fibra no “uplink” (devido a usuários transmitindo em canal adjacente) que no “downlink” (para o qual há somente uma portadora por antena remota nos modelos consultados [5], [6])

## **2.7 - Redes de Múltiplo acesso / LANs**

Uma das aplicações da SCM em redes de múltiplo acesso é o uso da subportadora como canal de dados. Os quadros de dados podem ser modulados na subportadora usando técnicas de modulação digital como ASK, FSK ou PSK. Protocolos típicos de acesso a LAN podem ser usados em alguns casos, por exemplo com a detecção de colisão incorporando algumas modificações devido às diferenças do meio de transmissão e das técnicas de transmissão. Várias subportadoras diferentes podem ser usadas para sobrepor um número de redes de acesso no mesmo meio físico. Porém, o tipo de superposição que seria mais atraente é a rede de dados e outros tipos de redes, como a distribuição de TV em circuito fechado.

A multiplexação de subportadora pode também ser usada como parte da própria técnica de múltiplo acesso. Tal estrutura de rede é mostrada esquematicamente na Fig 2.5, onde um acoplador estrela é usado para interconectar N usuários. Cada usuário recebe uma frequência de subportadora pré-alocada correspondente ao destino requerido. A complexidade de cada receptor e a potência óptica total necessária em cada nó tornam-se um problema em grandes redes. A multiplexação por subportadoras permite que a largura de banda permaneça constante com o aumento do número de nós. Os usuários transmitem em um lado da estrela e recebem a soma de todos os sinais transmitidos do outro lado. Circuitos de comunicação diferentes são estabelecidos através da transmissão em uma frequência de subportadora que corresponda ao usuário de destino desejado. Arquiteturas em barramento também poderiam ser usadas, mas a perda associada com derivações de fibra em cascata torna-se um fator limitante.

Para esta aplicação, somente uma subportadora é transmitida por cada laser. O índice de modulação de cada sinal é então restringido pela mistura não linear entre as diferentes subportadoras do laser. A distorção harmônica pode ser um problema em sistemas de várias oitavas, mas o problema de limitação de desempenho é geralmente o ruído balístico. Para arquiteturas em estrela, onde N canais são recebidos simultaneamente, a potência total do ruído

balístico é então proporcional a  $N$ , mas considerando que a corrente para cada canal é independente de  $N$ , o limite de ruído balístico é dado então por:[2]

$$\frac{N B}{I_N} = \frac{m^2}{4qSNR}, \quad (2.1)$$

onde  $B$  é a largura de banda de cada canal,  $m$  é o índice de modulação,  $I_N$  é a fotocorrente média em cada laser,  $q$  é a carga elétrica e  $SNR$  é a relação sinal ruído necessária. A Equação 2.1 mostra que redes deste tipo podem ter vários Gigabits de "throughput". Isto é pouco, comparado com os sistemas WDM, mas bastante em comparação com as redes comerciais de hoje.

A análise de desempenho deste tipo de rede considerando a divisão de potência e as limitações do ruído balístico sugerem um potencial significativo.

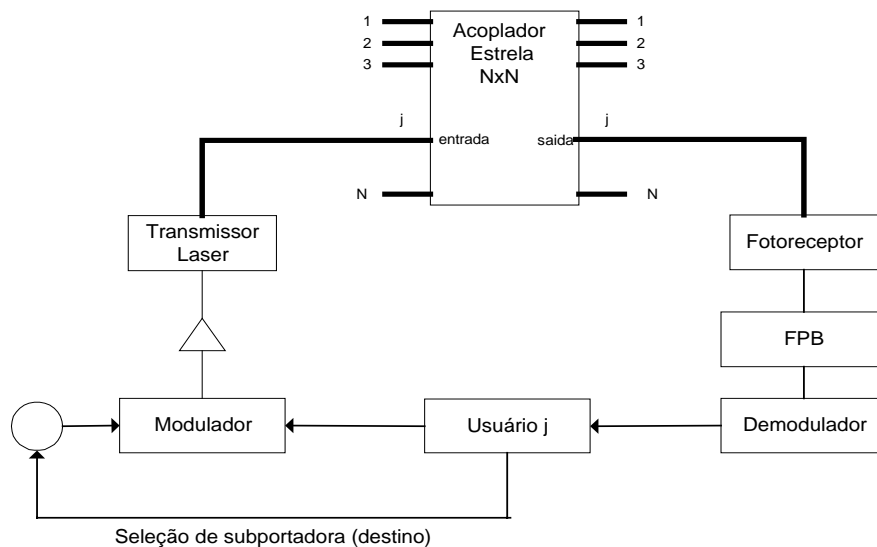


Figura 2.5 – Uma estrutura de LAN com múltiplo acesso por SCM

Por exemplo, uma rede pode ter mais de 1000 usuários com taxas em cada subportadora da ordem de 1,5 Mbps [3]. Porém, a limitação real para este tipo de estrutura é o ruído de batimento óptico. A lei quadrática do processo de fotodetecção causa um batimento (heterodinagem) da frequência do Laser e produz frequências diferentes que podem cair dentro da banda de operação do

fotodiodo causando interferência. Com um número baixo de usuários, os comprimentos de onda do laser podem ser selecionados para minimizar estes efeitos mas isto seria impraticável para qualquer LAN de tamanho razoável. Outra alternativa é o uso de fontes de baixa coerência (como LEDs), mas estas limitarão a distância de transmissão devido à dispersão na fibra.

Técnicas também têm sido propostas para eliminar o batimento óptico usando um único laser nas redes de múltiplo acesso. Por exemplo, a potência do laser pode ser igualmente distribuída entre os usuários no acoplador usado para conectá-los. Cada usuário modula a sua própria potência em sua própria frequência de subportadora. Estas transmissões em subportadora vão circular continuamente em torno da rede, mas são atenuadas severamente para mais de uma passagem. Porém, o baixo nível de cada subportadora comparada à potência óptica total leva ao uso de técnicas de detecção SCM coerentes.

Ao invés do uso de subportadoras para novos dados, é possível também o uso de subportadoras para as informações de controle (por exemplo, implementação de um protocolo de acesso) onde os dados são transmitidos em outro formato. Por exemplo, o uso de pacotes de dados em banda base e canais de controle multiplexados por subportadoras têm sido investigado em redes WDMA. Transmissores usam lasers de comprimento de onda fixo enquanto receptores empregam filtros sintonizáveis em comprimento de onda para selecionar o canal de dados desejado. O transmissor também enviará um cabeçalho de controle na frequência da subportadora correspondendo ao nó de destino. Este cabeçalho é detectado anteriormente ao filtro de comprimento de onda, pelo desvio de uma parte da potência óptica que chega e encaminhando esta ao receptor SCM. Este cabeçalho tem a informação necessária para a sintonia do filtro de comprimento de onda correto. Dois tipos de problemas podem então existir:

- 1 - O cabeçalho da subportadora é mandado a um nó que já esteja ouvindo a uma transmissão em outro comprimento de onda e não pode então resintonizar o seu filtro.

2 - O cabeçalho da subportadora é mandado para um nó ao mesmo tempo que outro nó está transmitindo seu cabeçalho para o mesmo destino, causando uma colisão entre dois cabeçalhos.

Para um desempenho ótimo, cada nó deveria ter sua própria frequência de subportadora para recepção. No entanto, isso seria difícil em grandes redes e desnecessário dependendo das condições de tráfego. Vários aspectos de protocolos de acesso que podem ser usados nestes sistemas ainda devem ser resolvidos.

Vistas algumas aplicações para sistemas SCM, o próximo capítulo tratará dos princípios teóricos da Modulação por Subportadoras e dos principais tipos de ruídos que degradam os enlaces analógicos.