

2

Sistemas de Rádio

Para caracterizar o problema a ser estudado é necessária uma pequena apresentação do ambiente de comunicações móveis. A maior motivação do trabalho são os novos sistemas de comunicações móveis que estão surgindo. Estes requerem novos paradigmas que transcendem os métodos usuais em telefonia móvel celular, que não mais resolvem os problemas mais complexos oriundos da evolução tecnológica.

Os novos desafios tecnológicos advêm de várias evoluções nas comunicações móveis como os novos tipos de tráfego em redes de telecomunicações, especificamente tráfego de pacotes multimídia de aplicações distintas (voz, imagem, som, dados, e etc...) e com requisitos de “QoS” diferentes. A outra variante determinante é uma série de topologias diferentes, além da tradicional topologia de telefonia móvel celular, desenvolvidas para permitir que dispositivos móveis estejam conectados entre si e também a rede global ubiquamente. A modelagem apresentada mostra que existe uma topologia básica onde podem ser estudados as gerências e controles, especificadas abaixo, e que poderão a vir ser utilizada nos sistemas móveis de qualquer espécie.

2.1.

Comunicações de dados

Buscando o aumento do consumo nos sistemas de comunicações móveis, novas opções ou serviços melhores a um menor custo precisam ser oferecidos ao mercado. Multimídia, que nada mais é que transmissão simultânea de vários tipos de informações diferentes (voz, Internet, vídeo, áudio), é à base desses novos serviços que estão sendo ou serão disponibilizados. Tipicamente um usuário poderá estar interessado em se comunicar através de uma chamada interativa de

vídeo (videofone) ou voz (telefone) e isto requer que as entidades de informação (normalmente denominadas pacotes devido à nomenclatura da rede IP) tenham uma taxa de chegada aproximadamente constante. Já em sistemas que não necessitam interação em tempo real, tipo e-mail ou transferência de arquivos, os usuários poderão receber banda à medida que esta esteja disponível, que é o conhecido critério de qualidade “best effort” predominante na Internet. Imagens e músicas, que podem ser caracterizadas como um tipo de transferência de arquivos, têm requisitos bem diferentes quando comparados a modos conversacionais, permitindo maiores atrasos desde que mantenha uma certa uniformidade, e sendo possível contar com retransmissões. Considerando que diferentes tipos de serviço geram tráfegos com diferentes taxas de pacotes, e possuem diferentes requisitos de qualidade, o controle da rede necessita considerar e tirar proveito das propriedades de tráfego para maximizar a eficiência espectral.

Um recente exemplo é o padrão “universal mobile telecommunications systems (UMTS)”, onde foi especificada uma arquitetura de camadas para o “QoS”. A estrutura de suporte ao “QoS” é baseada em serviços contratados, que compostos formam o serviço completo a um usuário. Para cada serviço contratado, são definidos atributos de “QoS”, que descrevem requisitos de taxa de bits, atrasos e prioridades dentre outros. Para a classificação dos serviços, o tráfego é dividido em classes: tempo real conversacional, tempo real “streaming”, “best effort” interativo e “best effort background”. [31]

Classe de Serviço	Aplicações típicas	Características do serviço
Conversação tempo real	Voz, vídeo conferência	Preserva relação temporal entre pacotes, atraso de pacotes muito baixo.
“Streaming” tempo real	Áudio/Vídeo “streams”	Preserva relação temporal entre pacotes
“Best Effort” interativo	Navegação na Web	Padrões de requisição e resposta. Baixa taxa de erro
“Best Effort” background	Transferência de arquivo, correio eletrônico	O atraso não é crítico, baixa taxa de erro

Tabela 1 Classes de serviço em redes UMTS

Classe de tráfego	Conversacional	Streaming	Interativo	Background
Taxa máxima (kbps)	< 2000	< 2000	< 2000	< 2000
SDU máximo (byte)	<1500	<1500	< 1500	< 1500
Taxa garantida	<2000	<2000		
Atraso de transmissão (ms)	80 - valor máximo permitido	500 – valor máximo permitido		
Prioridade	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3
Taxa de erro residual	$5 \cdot 10^{-2}$, 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-6}	$5 \cdot 10^{-2}$, 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6}	$4 \cdot 10^{-3}$, 10^{-5} , $6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$, 10^{-5} , $6 \cdot 10^{-8}$

Tabela 2 – Requisitos de QoS para as classes de serviço

Devido ao crescimento da Internet, existe a demanda de aplicações de alta taxa de dados e serviços multimídia. Com isso a rede precisa prover diferentes taxas de transmissão e requisitos de “QoS”, compartilhando a capacidade da melhor maneira possível. Diferentemente dos serviços tradicionais de voz, onde a métrica da qualidade de serviço incluem a probabilidade de bloqueio e a taxa de interrupção de chamadas, outras métricas são necessárias para os serviços multimídia. Capacidade máxima total, atraso e probabilidade de indisponibilidade são comumente usadas. Claramente elas refletem a “velocidade” dos bits e conseqüentemente estão naturalmente relacionadas à qualidade sentida pelo usuário, porém além destas, existem outras métricas que se relacionam de forma indireta ao usuário final. Por exemplo, a potência transmitida afeta vários fatores importantes, incluindo o tempo de vida da bateria dos dispositivos móveis que é extremamente crítica. Os dispositivos disponíveis hoje no mercado permitem 1 hora de conversação a uma taxa de aproximadamente 10 Kbps. Sendo o consumo de energia nos dispositivos de rádio proporcional a taxa transmitida, então com a mesma tecnologia os dispositivos poderiam funcionar aproximadamente 20 segundos a uma taxa de 2 Mbps. Para os futuros usuários da Internet móvel, a bateria será percebida como uma “caixa preta” contendo uma limitada quantidade

de bits, ao invés de ser uma fonte de energia que possibilite uma certa duração. Assim o controle da rede tem que considerar um criterioso controle dos recursos de energia, ao mesmo tempo em que tenta satisfazer os outros requisitos de QoS em um ambiente rádio variante no tempo. O objetivo desse controle será disponibilizar uma certa quantidade de bits, com uma certa qualidade, com o mínimo de energia possível. Assim técnicas avançadas de alocação de potência permitirão no sentido mencionado acima, que se “coloque” mais bits na bateria.

Comunicação de rádio eficiente no aspecto energético é um tópico que aparece cada vez mais na literatura técnica. Questões que estão sendo estudadas para as camadas baixas (de acordo com o modelo de rede ISO/OSI) incluem gerenciamento dinâmico de potência, modulação e esquemas de controle de erro; já nas camadas altas o objetivo é desenvolver esquemas de agendamento das transmissões.

2.2.

Gerenciamento de recursos de rádio

Quando um sistema de comunicações permite estabelecer seções com diferentes requisitos de “QoS”, o controle dos recursos rádio se torna uma tarefa complicada, até pelo amplo leque de possibilidades que se abre. No entanto é possível identificar os recursos básicos que serão gerenciados. Alguns desses já são gerenciados com sucesso nas redes atuais de telefonia móvel, como o controle de admissão. Agora eles terão que ser estendidos para as redes de dados de múltipla taxa e que incluem requisitos de “QoS” distintos. Além disso, dada a tolerância de atraso em alguns serviços, o agendamento (“scheduling”) da transmissão pode se tornar um método a ser incorporado no elenco de possíveis soluções para este problema.

2.2.1.

Controle de Potência

Um recurso de controle que está altamente relacionado à capacidade da rede é a potência transmitida. Por exemplo, usuários sensíveis a atrasos de mensagens e com requisitos de taxa de erro baixa, podem ser acomodados pelo aumento da potência transmitida, com o conseqüente aumento da relação sinal-ruído mais interferência (“SINR”). Porém isto causa um aumento da interferência percebida pelos outros usuários, que por conseqüência passam a experimentar um aumento em suas taxas de erro. Controle de potência é uma área ativa de pesquisa, e muito trabalho já foi desenvolvido para sistemas de taxa fixa. Porém com os sistemas futuros de dados com taxa e requisitos de “QoS” variáveis, a complexidade da alocação de taxa foi adicionada ao controle de potência, o que implica na necessidade de estender os estudos.

Em sistemas reais, a taxa de transmissão efetiva é diretamente relacionada com a “SINR”, e o controle de potência se mostra um agente eficiente para o seu controle. Assim se torna natural investigar esquemas conjuntos de controle de potência e taxa. A formulação clássica do problema de controle de potência é determinar de forma rápida uma alocação que acomode o maior número de usuários e que minimize a potência usada em cada transmissor. Já o problema de transmissão com taxa variável, em aplicações onde os serviços possuam requisitos distintos de qualidade, apesar de terem uma base comum com a dos serviços tradicionais, implicam novas variantes que poderão ser adicionadas, destacando-se dentre estas a possibilidade de agendamento “scheduling” dos pacotes a serem transmitidos. Neste trabalho se estuda requisito de qualidade relacionado a “SINR” e por conseqüência o controle de potência também baseado neste parâmetro. Será visto que neste caso o problema pode ser resolvido por meio de programação linear (real e inteira), onde em um instante arbitrário e a partir de valores como ganho de enlace, ruído, requisitos de “SINR” e outros, existe apenas uma única solução ótima. No problema de interesse um vasto número de algoritmos (alguns de natureza heurística, outros de natureza sub-ótima) foi desenvolvido, que permitem solucionar este problema sem ter que resolver o

problema pleno de otimização. Estas heurísticas são centralizadas ou distribuídas, mas neste trabalho só será analisada a primeira. Assim resolver o problema de alocação de potência de transmissão para sistemas de taxa variável, é basicamente resolver o problema da definição da taxa de transmissão requerida a cada unidade de tempo para o usuário. Após a determinação da taxa, o problema de potência pode ser resolvido por técnicas de programação linear como comentado acima. O escopo desta tese é apresentar novos meios de resolver de forma moderadamente rápida a alocação de potências em uma janela de tempo curta, na qual se assume que os parâmetros de propagação podem ser considerados constantes.

2.2.2.

Controle de taxa de transmissão

Os sistemas de comunicação que utilizam taxa variável, em períodos definidos de tempo (preferencialmente curtos), precisam definir a taxa na qual a comunicação entre usuários ocorrerá. Como as condições de propagação variam rapidamente, e as de tráfego um pouco mais lentamente, isto implica que frequentemente a taxa de transmissão necessita ser redefinida, mesmo durante o andamento de uma seção de comunicação.

Conhecendo-se os detalhes da modulação utilizada no sistema rádio e a taxa de erro máxima que a aplicação que está associada a uma seção de comunicação suporta, é possível relacionar a taxa de transmissão possível com o parâmetro de “SINR” no receptor rádio do enlace de comunicação. Esta informação, mais a informação de tráfego, é que são utilizadas nos mecanismos que calculam a taxa de transmissão que uma seção de comunicação deverá utilizar. As informações de tráfego ajudam a evitar que uma fila de serviço para uma seção de comunicação fica saturada, causando perda de pacotes por falta de espaço em “buffer”.

2.2.3.

Controle de admissão

O objetivo do controle de admissão é preservar a qualidade das conexões em curso, enquanto novos usuários são admitidos. A alocação de taxa de transmissão pode ser vista como um caso mais geral de controle de admissão, onde cada enlace agora tem várias opções de SINR para escolher. Um tipo muito comum de problema para sistemas de múltiplas taxas é maximizar o total de bits transmitidos. Uma solução para esse problema é admitir toda conexão ao sistema enquanto for possível manter a qualidade e a potência.

2.2.4.

Controle de Congestionamento

Quando um sistema de comunicação fica altamente congestionado, ocorre uma situação na qual um subgrupo de usuários não pode ser mantido com uma taxa determinada. A maioria dos algoritmos de controle de potência reage a esta situação incrementando a potência transmitida. O resultado é um subsequente aumento da interferência e a degradação do desempenho global. Uma possível solução alternativa seria remover conexões, ou nos casos de sistema a taxa variável diminuir a taxa transmitida de alguns enlaces (as redes IP convencionais já fazem isso, basta notar que de vez em quando a Internet fica “lenta”). O tratamento dessa questão é de crucial importância nos sistemas de terceira geração e posteriores.

Assim como o controle de admissão, o controle de congestionamento permite aumentar a capacidade total do sistema. Um problema de difícil solução que leva em conta o problema econômico, é o da escolha do usuário a ter a taxa de transmissão reduzida. Isto porque usuários de perfis distintos podem estar remunerando a operadora de diferentes maneiras, por exemplo nos sistemas telefônicos celulares os usuários pré-pagos geram normalmente menos receita que os usuários pós-pagos. Outra importante questão é a capacidade de detectar

rapidamente as condições de congestionamento, para que seja possível tomar atitude em tempo hábil.

2.2.5.

Agendamento da Transmissão

O agendamento no tempo das transmissões (“scheduling”) pode ser usado para se criar uma diferenciação entre as classes de serviço ou condições de isonomia entre usuários. Em serviços que não requerem taxas instantâneas contínuas, mas sim uma taxa média, uma utilização mais flexível do espectro pode ser considerada. O agendamento da transmissão está intimamente ligado ao controle da taxa transmitida, e na verdade é um caso especial dele, pois quando se transmite alternando taxa zero (não transmissão) e alguma taxa, está sendo implementado o agendamento.

Os algoritmos para controle de agendamento são atualmente objetos de intensos estudos [26]. Vários sistemas em desenvolvimento, como o WCDMA [30], têm nesses algoritmos o diferencial competitivo entre os equipamentos de diferentes fabricantes (o algoritmo de agendamento não costuma ser especificado nos padrões de sistemas). Em grande parte, é o agendamento de transmissão que permite implementar os mecanismos de qualidade de serviço.

2.2.6.

Controle unificado

Todos os controles expostos anteriormente vão integrar na prática um único sistema de gerenciamento. Uma das grandes vantagens do sistema digital é a integração dos distintos serviços de comunicação em uma única rede. Não mais se lida com aplicações totalmente distintas como voz, televisão e dados trafegando em redes separadas, e desenvolvidas especificamente para trafegar algum dos serviços acima. O paradigma futuro é uma rede única convergida, onde todas as aplicações compartilham esta mesma rede, apenas requerendo parâmetros de “QoS” diferentes. Os nós da rede gerenciarão uma ou mais filas de serviço, regidas por alguma disciplina de fila, e permanentemente terão que monitorar as condições do canal rádio. Assim um agente gerenciador no transmissor tomará a cada unidade de tempo a decisão de qual pacote em qual fila de serviço será enviado numa certa taxa e potência. Esta decisão englobará todos os controles vistos acima.[54]

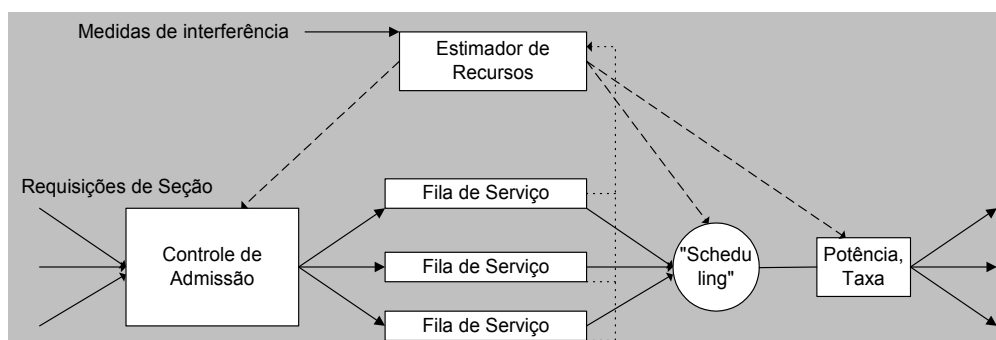


Figura 2-1 – Gerência de recursos de transmissão

A gerência da rede poderá ser tanto centralizada quanto distribuída, mas sempre será necessário contar com medidas executadas no receptor de cada unidade móvel. Algum canal de controle poderá ser usado para que essas medições cheguem ao controle central, ou às outras unidades móveis, no caso de controle distribuído.

2.3.

Acesso Múltiplo

Quando vários usuários tentam acessar um canal comum, alguma forma de separação das formas de onda deve existir para distinguí-los no receptor. A base de qualquer interface rádio é determinar como o meio comum será compartilhado entre os usuários. Diferentes técnicas podem ser especificadas.

- Múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA) – A separação é feita dividindo o espectro de rádio em canais ortogonais. Para cada usuário é designado um único canal de frequência, que não é usado por nenhum outro usuário, mesmo que ele esteja inativo. A ortogonalidade é garantida pela separação total das frequências desses canais, incluindo até uma pequena faixa não utilizada entre cada canal, que serve para minimizar a interferência oriunda de filtragem imperfeita.
- Múltiplo acesso por divisão do tempo (TDMA) – A separação é feita dividindo o espectro de rádio em intervalos de tempo. A cada intervalo apenas um usuário pode transmitir.
- Múltiplo acesso por divisão ortogonal de frequência (OFDMA) – Esta técnica se diferencia do FDMA pela maior aproximação dos sub canais de frequência, garantindo uma maior eficiência espectral. Neste caso canais adjacentes possuem intercessão de frequência, mas implementado de uma forma que permite que sejam separados na recepção pelo método de transformada rápida de Fourier.

Pelo reuso de frequências e intervalos de tempo em localizações geográficas suficientemente separadas, mais usuários podem ser acomodados. Em múltiplo acesso com espalhamento espectral, o sinal em uma banda mais estreita é espalhado sobre uma banda mais larga. Este tipo de técnica é ineficiente para um usuário, pois se está permitindo que este use uma banda maior do que a necessária para a transmissão, mas com o compartilhamento entre vários usuários se torna bastante eficiente.

- Acesso múltiplo por divisão de código (CDMA) – cada usuário recebe um código, que tanto pode ser uma seqüência pseudo-aleatória que espalhe o trem de bits (seqüência direta), ou uma regra de utilização de sub faixas de freqüências (salto de freqüência).

Outra técnica consiste no aproveitamento da separação espacial dos transmissores.

- Múltiplo acesso por divisão espacial (SDMA) – A separação é feita por conjuntos de antenas, que permitem vários feixes direcionais, que podem ser apontados para determinados transmissores.

Vários esquemas híbridos consistindo na mistura das tecnologias acima são possíveis. Normalmente as técnicas de FDMA são combinadas junto com TDMA ou CDMA, neste caso separa-se o espectro em fatias menores, e depois se aplica a cada uma destas, uma das duas técnicas anteriores.

Na prática todos esses esquemas envolvem alguma forma de ortogonalidade, tipo freqüência, tempo, ângulo de chegada, código. Outra possibilidade é compartilhar recursos sem conexão. Estes esquemas são usados em comunicações de dados por pacotes, oferecendo mais flexibilidade para a entrega de pacotes curtos, pagando o preço do risco da comunicação não ser bem sucedida devido a transmissões simultâneas (colisões), requerendo uma política de retransmissão. Vários esquemas existem, sendo classificados em aleatórios, agendados ou híbridos. Os métodos mais comuns são:

- ALOHA – Um usuário transmite um pacote com uma certa probabilidade, desde que tenha pacotes esperando na fila.
- CSMA – O usuário monitora o canal para ver se tem alguém se comunicando, caso o canal esteja livre o pacote é transmitido.

- Múltiplo acesso por reserva de pacote (PRMA) – é a combinação de ALOHA e TDMA, que permite usuários reservar blocos para transmissões sem perigo de colisão.

Para pequenas cargas de tráfego, essas técnicas de acesso funcionam bem com pacotes de dados. Com o aumento de carga o sistema pode entrar em colapso.

2.4.

Paradigmas de sistemas de comunicação

Os sistemas atuais de comunicação “wireless” terrestres, assim como aqueles previstos para um futuro próximo, podem ser classificados em três paradigmas básicos. Essencialmente, eles são diferenciados pela mobilidade, e pela existência ou não de infra-estrutura fixa.

Sistemas *AD HOC* ou *MANET* (Mobile Ad Hoc Networks) se caracterizam por não terem infra-estrutura fixa (rápida instalação), serem móveis, e em alguns casos por permitirem comunicações de rádio em vários passos, utilizando as unidades móveis (UM) intermediárias como retransmissores das mensagens. Estes sistemas podem se conectar ou não a serviços fixos, e não possuem uma “inteligência” central para o controle do fluxo de pacotes. Como exemplo pode-se citar “wireless lan” (IEEE 802.11), Bluetooth, Hiperlan, e outros. As aplicações mais prováveis são para cobertura de áreas pequenas, dentro de construções como plantas industriais, residências, escritórios.

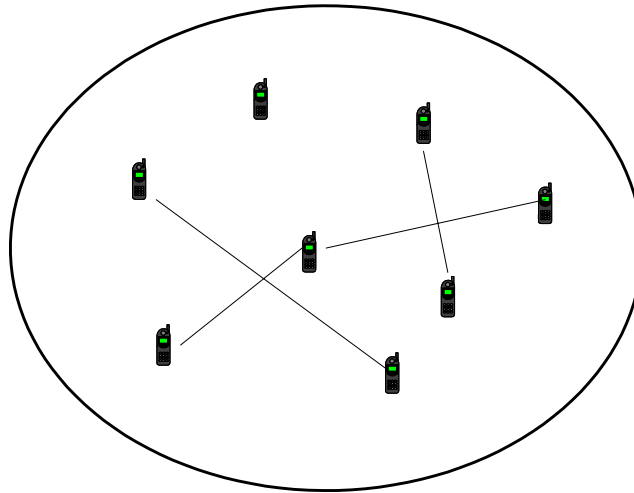


Figura 2-2 **Topologia de Rede AD HOC**

Sistemas *Móveis Celulares* apresentam uma infra-estrutura fixa, onde uma unidade móvel acessa uma estação rádio base, sempre por um enlace de rádio em um único passo. Esta estação base faz a conexão das unidades móveis, com a rede de comunicação fixa (tanto pode ser a “PSTN” no caso de voz, como a Internet no caso de dados). Estes sistemas exigem a coordenação por um agente operador, para o controle de potência, alocação de canais, controle de acesso. São exemplos as redes de telefonia celular, os sistemas “wireless lan” que têm um modo de comunicação com utilização de “Access Point”. As aplicações mais comuns envolvem áreas grandes, subdivididas em várias células.

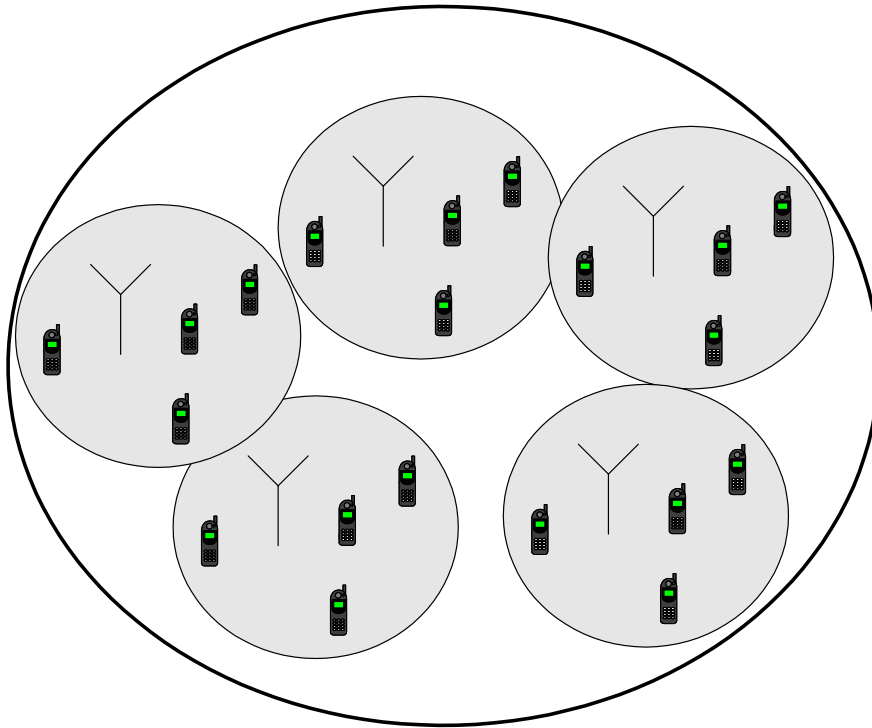


Figura 2-3 **Topologia de Rede Celular**

Sistemas *Ponto-Multiponto* são híbridos de sistemas celulares com AD HOC. A principal característica é que os usuários são fixos, normalmente uma antena de maior diretividade é colocada no topo de uma construção, servindo comunicação de alta taxa. Estes sistemas se constituem por células, mas é possível que para a comunicação entre uma estação central e terminal sejam usados vários passos intermediários, com outros terminais servindo de roteadores. Como exemplo tem-se o LMDS e a nova especificação da IEEE 802.16.

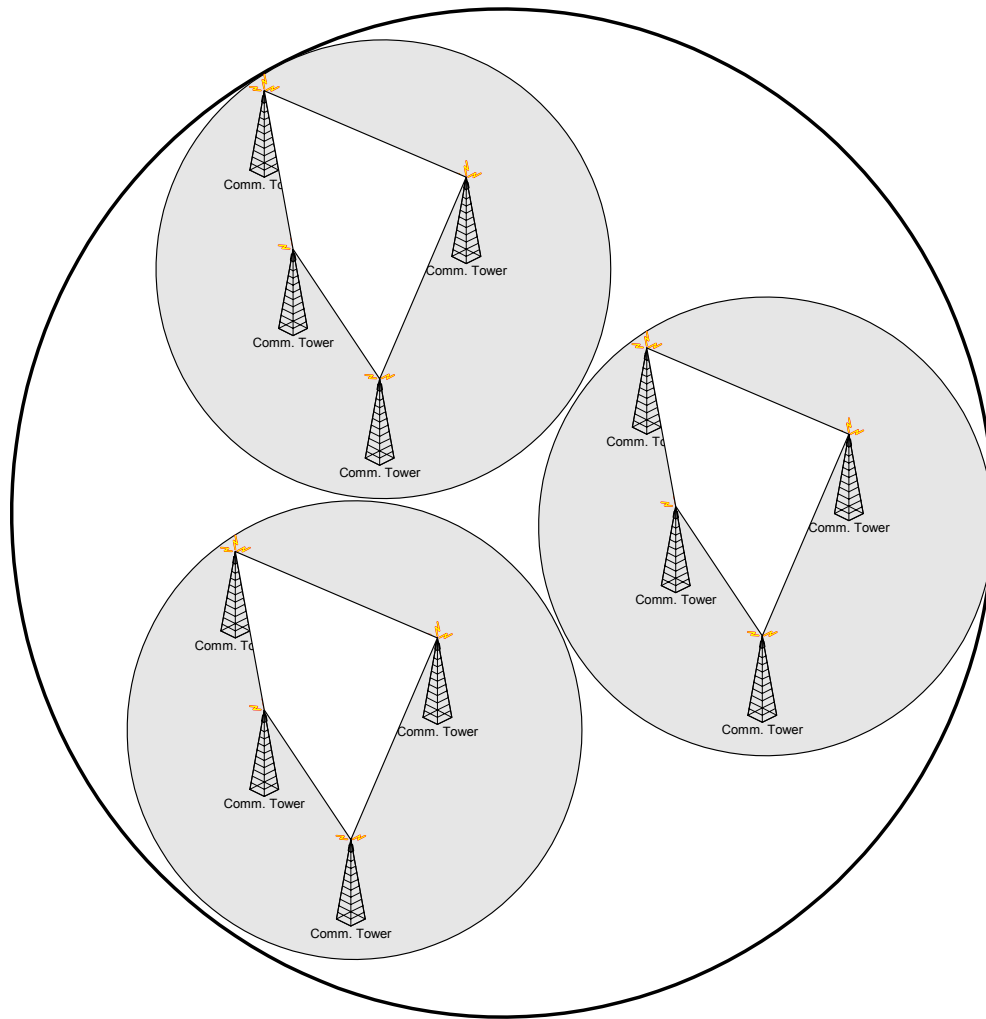


Figura 2-4 Topologia de rede LMDS

Em um alto nível de abstração, todos estes sistemas podem ser modelados da mesma maneira, considerando a rede uma coleção de enlaces de rádio interferentes utilizando o mesmo canal. Na prática, existe mais de um canal ortogonal (não interferente), nos quais as demandas de comunicação podem ser acomodadas. Dentro deste conceito abstrato, a rede telefônica celular, e todos os outros modelos citados anteriormente, são casos especiais de uma rede ad hoc genérica, apenas com parâmetros e limitações específicos.

A definição de rede Ad Hoc é bastante ampla, descrevendo qualquer rede em que a instalação é sem coordenação. Ou seja um nó da rede pode ser criado, ou extinto, a qualquer momento e em qualquer lugar, apenas colocando um equipamento de rede e ligando. O termo Ad Hoc acaba sendo usado para vários tipos distintos de rede.

2.5. Trabalhos anteriores

Um dos primeiros trabalhos em controle de potência para combater a interferência cocanal foi realizado por Bock e Ebstein [24] em 1964, foi mostrado que era possível formular o problema de alocação de potência como um problema de programação linear. Aein [3] investigou o uso de controle de potência para mitigar a interferência cocanal em sistemas de satélite com e sem ruído. Foi provado que o problema de balancear a “SIR” em sistemas sem ruído, ou seja obter a mesma qualidade em todos os enlaces, pode ser reduzido a um problema de autovalores de matrizes não negativas. A existência e unicidade de uma solução possível associada a matriz de ganhos foi obtida como consequência do teorema de Perron-Frobenius. Nettleton e Alavi [5,78] estenderam o conceito de balanceamento de SIR para sistemas de banda larga sem ruído de fundo. Melhorias de capacidade foram observadas em simulações feitas por Nagatsu [76]. Estes conceitos foram aprimorados quando Zander os aplicou para sistemas de banda estreita [114]. Isto permitiu a derivação da alocação ótima de potência que minimiza a probabilidade de indisponibilidade, em termos da máxima SIR que os enlaces podem simultaneamente alcançar. Se for possível admitir a reciprocidade nos ganhos de enlace, deduz-se que a SIR máxima alcançável é a mesma nos enlaces de subida e descida [5,117]. Grandhi mostrou que para sistemas sem ruído, existe apenas uma única SIR balanceada, e um único autovetor de potência positiva, que leva a máxima SIR alcançável [38]. Wu investigou o balanceamento para requisitos de SIR diferentes [105]. Diferentemente do caso ruidoso, estes requisitos não podem ser escolhidos individualmente, mas são dependentes do mínimo valor requerido. Zander [116] estendeu para o caso de existir ruído de fundo, e mostrou que pode ser alcançada a mesma SIR se não houver limite de potência. Grandhi [40] introduziu o limite máximo de potência de transmissão que no caso com ruído, existe sempre pelo menos um usuário usando potência máxima.

O foco dos trabalhos também abordava o desenvolvimento de algoritmos práticos para a resolução dos problemas mencionados acima, sem ter que recorrer ao excessivo esforço de coletar as informações necessárias para um controle

centralizado. Com respeito a isso, alguns esquemas simples e distribuídos chamaram a atenção. Meyerhoff [73] sugeriu um procedimento iterativo para achar o vetor de potência. Além do mais foi mostrado que equalizar SIR é equivalente a maximizar o mínimo da SIR. Zander [115] desenvolveu um algoritmo de balanceamento distribuído que apenas requer medidas locais de interferência. Simulações realizadas por Grandhi [39] indicam uma rápida convergência de algoritmos distribuídos de controle de potência.

O problema de controle de potência foi estendido para incluir requisitos de SINR mínima por Foschini e Miljanic [33]. Foi mostrado que um algoritmo distribuído de alocação de potências converge para valores pré-determinados. Uma versão assíncrona do algoritmo citado acima, desenvolvida por Mitra [74], onde os usuários atualizam suas potências de maneira não coordenada e com medidas desatualizadas, converge para valores fixos que suportam os requisitos de SINR em enlaces com ganhos estacionários.

Aplicando métodos iterativos de álgebra linear, um algoritmo geral de controle de potência foi sugerido por Janti e Kim [49]. A idéia de incluir mais informações sobre o ganho de enlace permitiu a melhora da taxa de convergência. Vários outros algoritmos foram deduzidos a partir deste trabalho. Kim também considerou a alocação do canal de descida do CDMA em [58].

Os trabalhos acima consideram um domínio de potência contínuo, mas em geral os sistemas reais trabalham com níveis discretos no controle de potência. Andersin [10] investigou o algoritmo DCPC em domínio discreto e obteve uma convergência que em alguns casos oscilava. Herdtner e Chong [45] analisaram o caso de um algoritmo de subida ou descida em passos de uma unidade, caracterizando sua convergência. Controle de potência com passos de tamanho variáveis foi investigado por Lee [66].

Uma outra direção em controle de potência, particularmente em CDMA, são esquemas que oferecem potência recebida constante na estação rádio base [103]. Pode ser mostrado não geram um impacto significativo na interferência cocanal [34,97].

Em sistemas congestionados, é possível tentar reduzir a probabilidade ocorrer uma situação de controle de potência inviável reduzindo os objetivos de SINR, como proposto por Almgren [6] e Yates [109]. Outra opção é retirar usuários do canal saturado como proposto por Zander [114]. Quando novos usuários tentam entrar no sistema, é necessário utilizar o controle de admissão para evitar novos congestionamentos. Bambos [14] sugeriu o conceito de proteção do enlace ativo.

A maioria dos trabalhos considera modelos invariantes no tempo, o que pode ser interpretado como se as ações relativas ao controle de potência fossem executadas muito mais rapidamente que as alterações das condições de propagação e tráfego. Porém Andersin e Rosberg [7] verificaram que esse procedimento subestimava a probabilidade de indisponibilidade, e conseqüentemente seriam necessárias margens substancialmente maiores para obter os requisitos de SINR. Rosberg [87] também estendeu o estudo para incluir desvanecimento rápido de distribuição Rayleigh. Margens adaptativas de SIR foram estudadas por Rosberg utilizando como parâmetro a duração de indisponibilidade. Um método distribuído que levava em conta a taxa média de cruzamentos de níveis foi sugerido. O trabalho de Mitra e Morrison [75] leva em conta a variância e a média da interferência devido a aleatoriedade das transmissões, mas pode também levar em conta as variações do ganho de enlace. Um método de controle de potência baseado em medidas de taxa de erro foi sugerido por Kumar [63]. A perfeita estimativa de SINR, potência recebida ou taxa de erro pode ser de difícil obtenção, assim Ulukus [99] considerou a utilização de medidas estocásticas, e estudou sua convergência.

O trabalho apresentado nesta tese segue uma abordagem diferente de outros estudos. Em primeiro lugar está se considerando um controle central de alocação de potência, com informações de todos os enlaces atualizadas constantemente. A dificuldade de se obter estas informações (no mínimo acarretaria uma intensa troca de informações entre as unidades), fez com que muitas técnicas desenvolvidas fossem de controle distribuído. Porém a maior novidade neste trabalho, é apresentar uma nova maneira de se verificar a viabilidade de enlaces

ocuparem o mesmo canal através da utilização de cálculo de determinantes para a matriz de ganho. São apresentados alguns algoritmos heurísticos, como é muito comum na literatura, mas a ênfase é na formulação de uma solução exata e mais rápida do método corrente na literatura. As referências estudadas nunca se preocuparam com o problema matemático de determinar a viabilidade das soluções de potência, ficando satisfeitos em quando necessário calcular raios espectrais de matrizes.