

2 Rádio Cognitivo

O Rádio Cognitivo é um dos assuntos atuais de maior interesse na pesquisa, desenvolvimento de *hardware* e *software* e aspectos de regulamentação e padronização em comunicações sem fio, por ser um conjunto de tecnologias que permite um uso mais eficiente do espectro rádio elétrico, um bem finito e escasso cuja demanda aumenta de forma acelerada em função do crescimento exponencial das taxas de dados em sistemas rádio móveis. A tecnologia permitirá que novas aplicações sem fio sejam implantadas através de novas formas de acesso ao espectro não utilizado ou subutilizado.

O conceito de rádio cognitivo foi proposto por Joseph Mitola III em um seminário no KTH (*Royal Institute of Technology*, em Estocolmo) em 1998 e publicado em um artigo de Mitola e Gerald P. Maguire em 1999. Foi uma abordagem inovadora em comunicações sem fio, que Mitola descreveu como:

O ponto no qual assistentes digitais pessoais (PDAs - *Personal Digital Assistants*) sem fio e as redes relacionadas são computacionalmente suficientemente inteligentes sobre os recursos de rádio e comunicações entre computador a computador relacionados para detectar necessidades de comunicação do usuário como uma função do uso de contexto e fornecer recursos de rádio e serviços sem fio mais adequados a essas necessidades [9].

O Rádio Cognitivo é um sistema de comunicação sem fio inteligente que possui:

- 1) Conhecimento de seu ambiente circundante.
- 2) Entendimento através da construção (*understanding by building*). Capacidade de aprender do ambiente e adaptar seus estados internos às variações estatísticas dos estímulos de entrada RF, fazendo alterações correspondentes

em certos parâmetros operacionais (por exemplo, potência de transmissão, frequência portadora e estratégia de modulação) em tempo real [10].

São dois objetivos principais dos sistemas de rádio cognitivo:

- Comunicação altamente confiável quando e onde for necessária.
- Utilização eficiente do espectro de rádio.

Sete conceitos se destacam na definição:

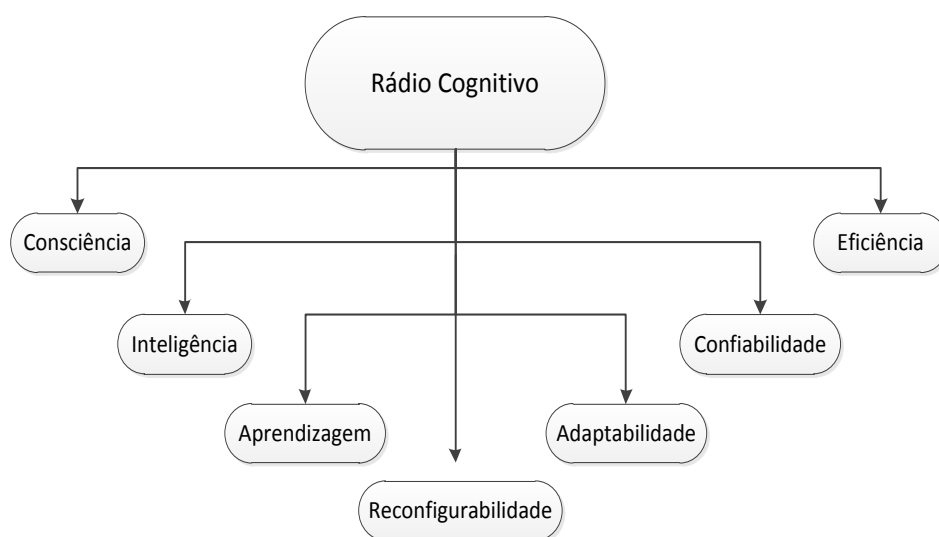


Figura 2.1: Propriedades do Rádio Cognitivo.

Um terminal móvel com recursos de rádio cognitivo pode sentir os ambientes de comunicação (por exemplo, espaços vazios no espectro, localização geográfica, sistemas de comunicação sem fio e serviços disponíveis), analisar e aprender as informações do ambiente, como as preferências e demandas dos usuários, e reconfigurar-se para ajustar os parâmetros do sistema em conformidade com certas políticas e regulamentos. Por exemplo, quando um rádio móvel do terminal cognitivo percebe que existem sistemas WiFi e móveis celulares nas proximidades, enquanto existem vazios de espectro na banda de frequência de TV digital, pode decidir fazer o *download* de arquivos a partir de um certo ponto de Acesso WiFi (AP - *Access Point*), fazer uma chamada telefônica através do sistema celular e se comunicar com outros usuários de rádio cognitivos utilizando os vazios de espectro [11].

Os rádios cognitivos são considerados de menor prioridade ou usuários secundários do espectro atribuído a um usuário primário. Sua exigência fundamental é evitar a interferência de usuários potenciais primários em sua vizinhança. O sensoriamento do espectro tem sido identificado como uma funcionalidade chave para assegurar que os rádios cognitivos não interfiram com os usuários primários, através da detecção confiável dos sinais destes usuários. Por outro lado, a detecção confiável cria oportunidades de uso do espectro para aumentar a capacidade das redes cognitivas [12].

Um terminal de rádio cognitivo também pode negociar com outros sistemas ou usuários da rede para permitir utilização mais eficiente do espectro. O processo de negociação pode ser facilitado a partir do suporte de rede ou ocorrer de forma *ad hoc* (redes *ad hoc* são redes que não possuem um nó ou terminal especial que atua como coordenador do uso dos recursos da rede, ou seja, uma rede de computadores *ad hoc* é aquela na qual todos os terminais funcionam como roteadores encaminhando de forma conjunta as comunicações dos terminais vizinhos).

O uso ágil do espectro pelos rádios cognitivos é um novo paradigma em comunicações sem fio. O rádio cognitivo tira vantagem de plataformas de *hardware* programáveis, os chamados rádios definidos por *software*. O processamento de sinal e aprendizagem de máquina representam o núcleo de todo o rádio, chamado núcleo cognitivo (motor). Em sua natureza fundamental, rádio cognitivo é um rádio "matematicamente intensivo" [13].

2.1. Mobilidade espectral.

O rádio cognitivo realiza o *handoff* espectral e desloca sua operação para outra frequência disponível, quando um usuário principal é detectado. A duração do *handoff* deve ser conhecida pelos usuários secundários para evitar interferências. A heterogeneidade de CRNs (*cognitive radio networks*) torna o roteamento e a informação da topologia cada vez mais complexos. Boa mobilidade e gerenciamento de conexão podem ajudar a conhecer o ambiente circundante, detectar acessos disponíveis e apoiar *handoffs* verticais (nós de rede

que mudam o tipo de conexão que utilizam para acessar a infraestrutura de apoio) e permitir que os rádios cognitivos selecionem rotas e redes.

Quando ocorre o *handoff* espectral, o dispositivo de rádio cognitivo deve, entre outras configurações, adaptar seus parâmetros de operação e protocolos de redes, a fim de atender aos requisitos de acesso da banda do espectro. Este processo de mudança deve ocorrer da forma mais suave e rápida possível, visto que se deve minimizar a degradação no desempenho da aplicação que está sendo executada no rádio cognitivo quando o processo de *handoff* for realizado para atender aos requisitos de QoS da aplicação secundária.

O *handoff* de espectro é classificado em obrigatório ou voluntário. O *handoff* obrigatório é desencadeado pelo aparecimento do usuário licenciado na banda de espectro ocupada pelo usuário secundário, enquanto que o *handoff* voluntário é executado quando os requisitos de QoS da aplicação do usuário secundário não estão sendo satisfeitos na faixa ocupada no momento.

2.2. Identificação de Localização

Refere-se à capacidade de determinar sua localização e a localização de outros transmissores e, em seguida, selecionar os parâmetros de funcionamento adequados, tais como a potência e a frequência permitidas naquela localização. Para bandas como aquelas utilizadas em enlaces de descida de satélites, que somente recebem e não transmitem um sinal, a tecnologia de localização pode ser um método conveniente para evitar interferência já que, neste caso, as tecnologias de sensoriamento não são capazes de identificar as localizações de receptores nas proximidades.

2.3 Acesso dinâmico e Descoberta de Rede / Sistema

Outro requisito a ser atendido pelo dispositivo de rádio cognitivo é a capacidade de acessar diversas redes e sistemas. Dada a existência de múltiplos sistemas e redes, executando protocolos de acesso distintos, torna-se necessário que o usuário secundário tenha a capacidade de se autoconfigurar, identificando e ajustando o protocolo necessário.

Para um terminal de rádio cognitivo determinar a melhor maneira de comunicar, ele deve descobrir primeiro as redes disponíveis ao seu redor. Por exemplo, quando um terminal de rádio cognitivo tem que fazer uma chamada telefônica, deverá descobrir se há ERBs celulares ou APs WiFi nas proximidades. Se não houver um *link* de comunicação direta entre o terminal e o BTS / APs, a chamada poderá ser feita através de outros terminais de rádio cognitivos com acesso a estas redes.

2.4. Modulação / Codificação Adaptativa

A modulação e a codificação adaptativas podem modificar as características de transmissão e as formas de onda para fornecer mais oportunidades de acesso ao espectro e melhorar a sua utilização. Com este recurso, o usuário secundário pode selecionar o esquema mais apropriado de modulação a ser utilizado com um sistema de transmissão particular, permitindo a interoperabilidade entre os sistemas.

2.5. Controle de Potência de Transmissão

O controle de potência permite ao rádio cognitivo selecionar, dinamicamente, o nível de potência a ser utilizado no processo de transmissão dos dados, com o intuito de atender objetivos, como evitar a interferência no usuário primário e permitir um maior compartilhamento do espectro com outros usuários secundários, quando não é necessária a utilização de potência elevada na comunicação.

2.6. Compartilhamento do Espectro

O rádio cognitivo poderia incorporar um mecanismo que permitisse a partilha de espectro sobre os termos de um acordo entre a concessionária e um terceiro. As partes poderiam, eventualmente, ser capazes de negociar o uso do espectro em uma base *ad hoc* em tempo real, sem a necessidade de acordos anteriores entre as partes.

O rádio cognitivo utilizará o conceito de compartilhamento do espectro, também chamado de *spectrum pooling*, para permitir acesso público a bandas de frequência já licenciadas. Basicamente, propõe-se a aglomeração de faixas do espectro eletromagnético de diferentes proprietários em uma faixa chamada *pool* comum. Desse *pool* de espectro, usuários não licenciados poderão utilizar, temporariamente, faixas de frequência durante períodos de inatividade de usuários licenciados. A principal vantagem da proposta é que o sistema dos usuários licenciados não precisa de nenhuma alteração. O equipamento existente deve poder operar como se não houvesse outro sistema presente na mesma faixa de frequência [14].

- **OFDM/OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Multiple Access*)**

A multiplexação por divisão de frequências ortogonais, ou OFDM, é uma técnica de modulação de dados que, por diversas características, é apropriada à tecnologia de rádios cognitivos. OFDM é uma técnica de transmissão de dados, que utiliza sua banda dividida em múltiplas portadoras ortogonais, chamadas subportadoras, para modulação.

O princípio básico da OFDM é a conversão de um fluxo de dados serial de taxa de transmissão elevada em múltiplos sub-fluxos paralelos de taxa de transmissão baixa. Por exemplo, um conjunto de símbolos seriais é transformado em um símbolo OFDM, representando dados em paralelo. Após a conversão serial-paralelo, cada sub-fluxo de dados é modulado em uma subportadora.

A principal vantagem do uso de OFDM em relação a técnicas que utilizam uma única portadora, é que ela pode obter a mesma taxa de transferência, devido ao paralelismo de subportadoras de taxas baixas, com maior resistência a condições ruins do meio, como atenuação de altas frequências, interferência inter-símbolo, interferência causada por múltiplos trajetos (comum em redes sem fio, devido à reflexão).

A ideia básica de compartilhamento de espectro baseado em OFDM é fazer com que a largura de uma sub-banda do sistema licenciado seja um múltiplo inteiro do espaço Δf usado por cada subportadora do sistema não licenciado. Dessa forma, se o sistema não licenciado utiliza somente as subportadoras em

sub-bandas que estão temporariamente sem uso pelo sistema licenciado, a coexistência espectral entre ambos sistemas é possível com uma interferência muito baixa. Também é mostrado que, para a realização da modulação em paralelo na OFDM, é necessária uma Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*). Essa operação também é necessária em um sistema de compartilhamento de espectro para analisar a atividade dos usuários licenciados, e portanto, não implicaria em maior custo ou complexidade de operação, já que essa operação seria realizada de qualquer maneira.

- **Vetor de Alocação**

Um vetor de alocação é um vetor de bits no qual cada um representa o estado de utilização por usuários licenciados de uma certa faixa de frequência (uma subportadora, no caso de OFDM). Por exemplo, se um bit correspondente a uma frequência tem valor 1, que está sendo utilizada no momento por um usuário licenciado (LU), e se o valor é 0, esta frequência pode ser utilizada pelo sistema não licenciado (US) [14].

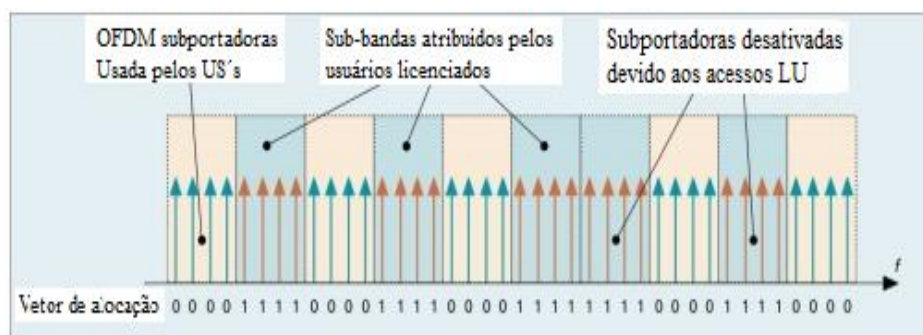


Figura 2.2: Vetor de alocação.

2.7. Sensoriamento do Espectro

O rádio cognitivo pode sensoriar o espectro e detectar "vazios de espectro", que são faixas de frequência não utilizadas pelos usuários licenciados ou cujo uso compartilhado vá causar interferência limitada com eles.

O presente trabalho está orientado ao estudo dos algoritmos de detecção que são parte do sensoriamento de espectro. Por essa razão, esta secção será detalhada no capítulo 3.

2.8. Arquitetura da Rede de Rádio Cognitivo

Além do sensoriamento espectral efetivo para melhorar a eficiência de utilização do espectro, um rádio cognitivo em uma Rede de Rádio Cognitivo (CRN) pode sensoriar redes disponíveis e sistemas de comunicação ao redor do espectro. O CRN não é apenas, portanto, mais uma rede para interligar os rádios cognitivos. Os CRNs são compostos de vários tipos de sistemas de comunicação e de redes e podem ser vistos como uma espécie de redes heterogêneas. A heterogeneidade existe em tecnologias de acesso sem fio, redes, terminais de usuários, aplicativos e provedores de serviços [15]. O projeto de arquitetura de rede de rádio cognitivo tem o objetivo de melhorar a utilização da rede inteira e não apenas a eficiência espectral de um enlace. Do ponto de vista dos usuários, a utilização da rede significa que eles sempre podem atender suas demandas a qualquer hora e em qualquer lugar através do acesso CRN. Do ponto de vista dos operadores, eles podem prestar melhores serviços aos usuários móveis e alocar os recursos de rádio e de rede para oferecer mais pacotes, por unidade de largura de banda, de uma forma mais eficiente.

2.8.1. Arquitetura de Rede

Os componentes básicos de CRNs são: estação móvel (*MS - mobile station*), a estação base ou ponto de acesso (*BSS/APs - base station/access point*) e a rede de transporte / núcleo de rede (*backbone/core networks*). Estes três componentes básicos compõem três tipos de arquiteturas de rede nas CRNs: arquiteturas infraestruturadas, arquiteturas *ad-hoc* e arquiteturas de malha, as quais serão discutidas a seguir.

- **Arquitetura Infraestruturada**

Na arquitetura infraestruturada a MS só pode acessar um BS/AP no modo *one-hop* (percurso simples do sinal da fonte ao receptor). As MS operando na faixa de transmissão do mesmo BS/AP devem comunicar-se umas com os outros através da BS/AP. As comunicações entre diferentes células são encaminhadas através de redes de transporte e o núcleo da rede. A BS/AP pode ser capaz de executar uma ou várias normas e protocolos de comunicação para atender diferentes demandas do MSS (*mobile switching centre server*). Um terminal de rádio cognitivo também pode acessar diferentes tipos de sistemas de comunicação por meio de sua BS ou AP.

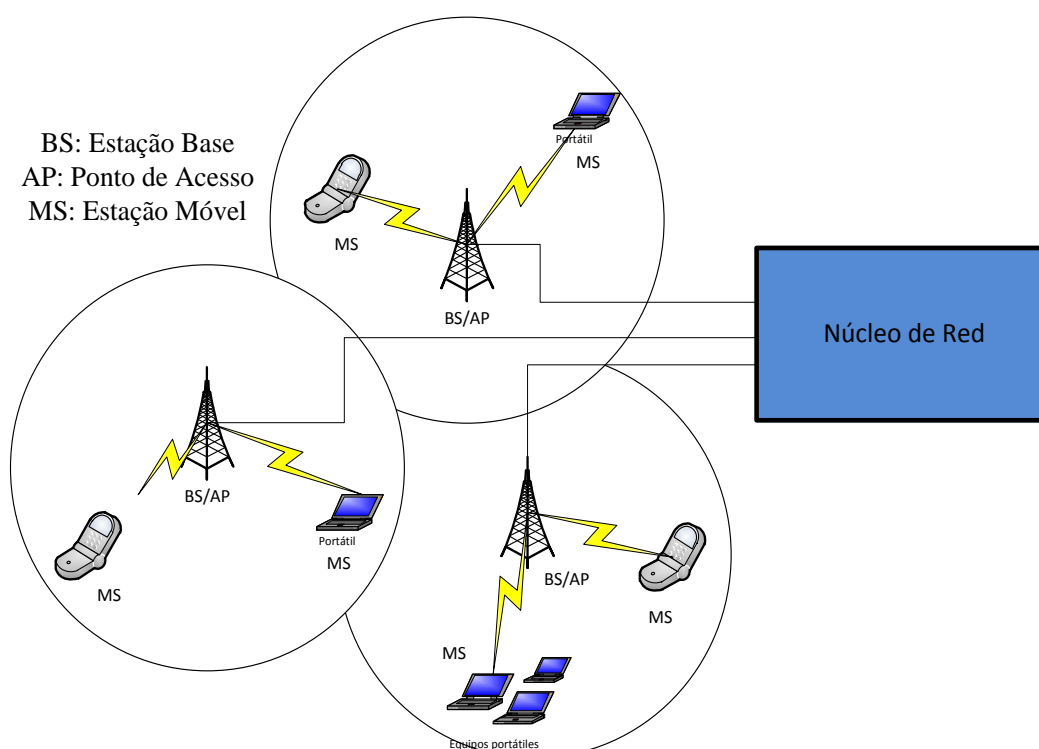


Figura 2.3: Rede Infraestruturada.

- **Arquitetura Ad-hoc**

Não há uma infraestrutura pré-definida na arquitetura *ad-hoc*. Se o MS reconhece que há algum outro MS nas proximidades e eles são conectáveis através de certas normas e protocolos de comunicação, podem criar um *link* e assim formar uma rede *ad hoc*. Note-se que as ligações entre os nós podem ser configuradas por tecnologias de comunicação diferentes. Dois terminais de rádio

cognitivos podem se comunicar um com o outro usando protocolos de comunicação existentes (por exemplo, Wi-Fi, *Bluetooth*) ou, dinamicamente, utilizando vazios de espectro.

MS: Estação Móvel

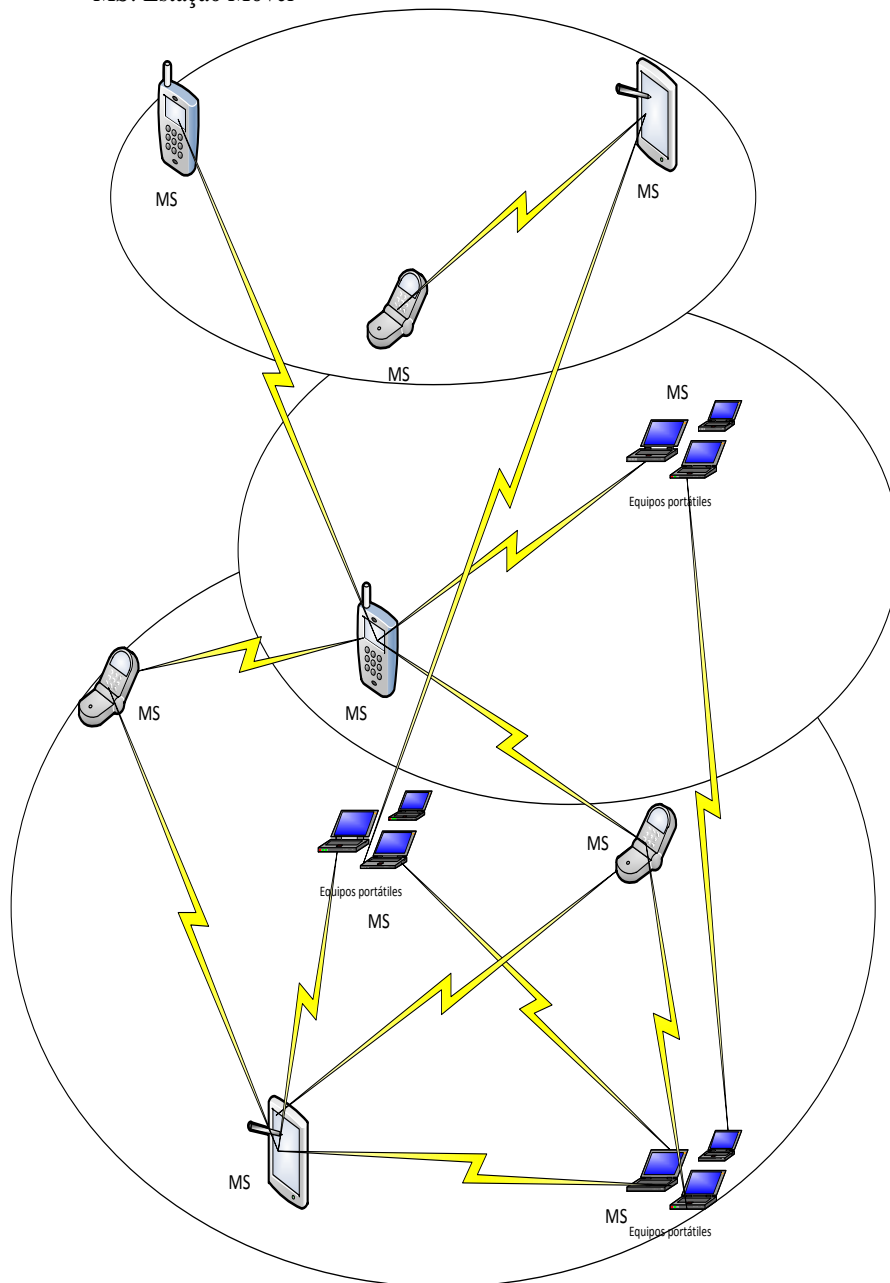


Figura 2.4: Arquitetura Ad-hoc.

- **Arquitetura de malha**

Esta arquitetura é uma combinação da Arquitetura Infraestrutura com a Arquitetura *Ad Hoc*, permitindo conexões sem fio entre BSs/APs, de forma semelhante às redes *mesh* sem fio híbrido [16]. As BSs/APs funcionam como

roteadores sem fio e formam redes de transporte sem fio. As MSs pode acessar o BSs/APs diretamente ou usar outro MSs como nós *multi-hop*. Alguns BSs/APs podem se conectar às redes de *backbone/core* e funcionarem como *gateways*.

As BSs/APs com capacidade de rádio cognitivo podem usar vazios de espectro para se comunicarem. A capacidade de transmissão de dados entre os rádios cognitivos BSs/APs pode ser suficiente para que suas conexões sirvam como rede de transporte.

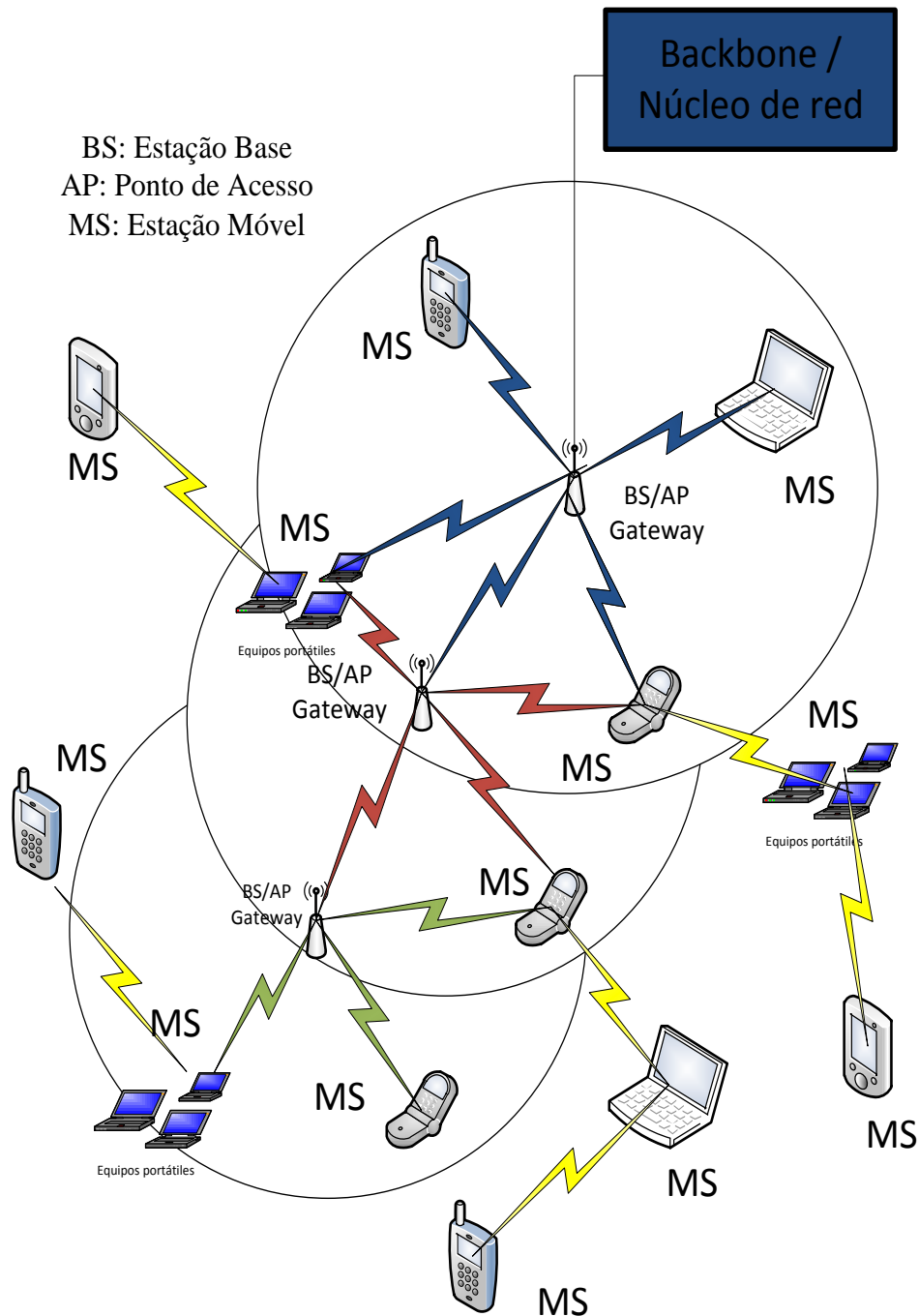


Figura 2.5: Arquitetura de malha.

2.8.2. Sistema Primário e Sistema de Rádio Cognitivo

Existem dois tipos de sistemas de comunicação sem fio em CRNs: o sistema primário (PS - *Primary System*) e sistema de rádio cognitivo (CR – *Cognitive Radio*), que são classificados por suas prioridades em bandas de frequência. Um sistema primário é um sistema já existente, que opera em uma ou mais bandas de frequência fixa. Vários tipos de sistemas primários trabalham tanto em bandas licenciadas ou não licenciadas e são explicados como segue.

- **Sistema Primário em bandas licenciadas**

Um sistema primário operado na banda licenciada tem a maior prioridade para usar essa faixa de frequência (por exemplo, 2G/3G transmissão de TV celular, digital). Outros usuários/sistemas não autorizados não podem interferir com o sistema primário de maneira intolerável nem ocupar a banda licenciada.

- **Sistema Primário em bandas não licenciadas**

São sistemas primários operando exclusivamente em uma banda não licenciada (por exemplo, banda ISM). Vários sistemas primários devem utilizar a faixa de forma compatível. Especificamente, os sistemas primários que operam na mesma banda não licenciada deverão conviver uns com os outros considerando a interferência entre si. Estes sistemas primários podem ter diferentes níveis de prioridades que podem depender de alguns regulamentos.

Já um sistema de rádio cognitivo não tem uma banda frequência de operação fixa nem privilégio para acessar essa banda. Estes sistemas conseguem se comunicar com cada um dos outros usando, dinamicamente, vazios de espectro. Há dois componentes em sistemas de Rádio Cognitivo:

- **Estação Base de Rádio Cognitivo (CR-BS)**

Um CR-BS é uma componente fixo do sistema de rádio cognitivo e tem capacidades de rádio cognitivo. Ela representa o lado infraestruturado do sistema CR e fornece suporte (por exemplo, gestão de vazios de espectro, gestão da mobilidade, gestão de segurança) para as CR-MS (Estação Móvel de Rádio Cognitivo). Fornece uma porta de entrada para as CR-MS acessarem as redes de transporte (por exemplo, *Internet*). A CR-BS também pode formar uma rede *mesh* de transporte, permitindo comunicações sem fio entre elas, e algumas delas atuam

como roteadores de *gateway* se estão conectados com as redes de transporte com fio.

- **Estação Móvel de Rádio Cognitivo (CR-MS)**

Três tipos de dispositivos de comunicação estão envolvidos nos procedimentos de partilha de espectro: estação primária móvel (PR-MS *Primary Mobile Station*), estação móvel de rádio cognitivo (CR-MS *Cognitive Rádio Mobile Station*), e agente de espectro (SA) [17].

Um CR-MS é um dispositivo portátil com recursos de rádio cognitivo. Pode reconfigurar-se a fim de conectar diferentes sistemas de comunicação. Ele pode sentir vazios de espectro e utilizá-los de forma dinâmica para se comunicar com CR-MS ou CR-BS.

O CR-MS é um transmissor ou receptor sem licença (CR-MS-Tx e CR-MS-Rx) com capacidade de cognição para obter informação sobre o espectro para uma decisão de acesso ao espectro.

Uma SA atua como um gerente de espectro e fornece informações sobre o espectro. Ela reúne requisição de acesso ao espectro da PR-MSs e valida a transmissão de pacotes de PR-MS. Realiza, ainda, transmissões de informações sobre o espectro e os parâmetros do sistema necessários para as CR-MS (estratégias de partilha do espectro).

2.8.3. Links em CRNs

Para que o Sistema de Rádio Cognitivo possa oferecer interoperabilidade entre diferentes sistemas de comunicação, algumas conexões inter-sistema devem ser ativadas. Listamos todas as possibilidades na Tabela 2.1:

Rx/Tx	CR-MS	CR-BS	PR-MS	PR-BS
CR-MS	•	•	•	•
CR-BS	•	•	•	
PR-MS	•	•	•	•
PR-BS	•		•	•

Tabela 2.1: Possível Uni-direcional Link no CRN

Na Figura 2.6 apresentam-se, graficamente, as conexões inter-sistema.

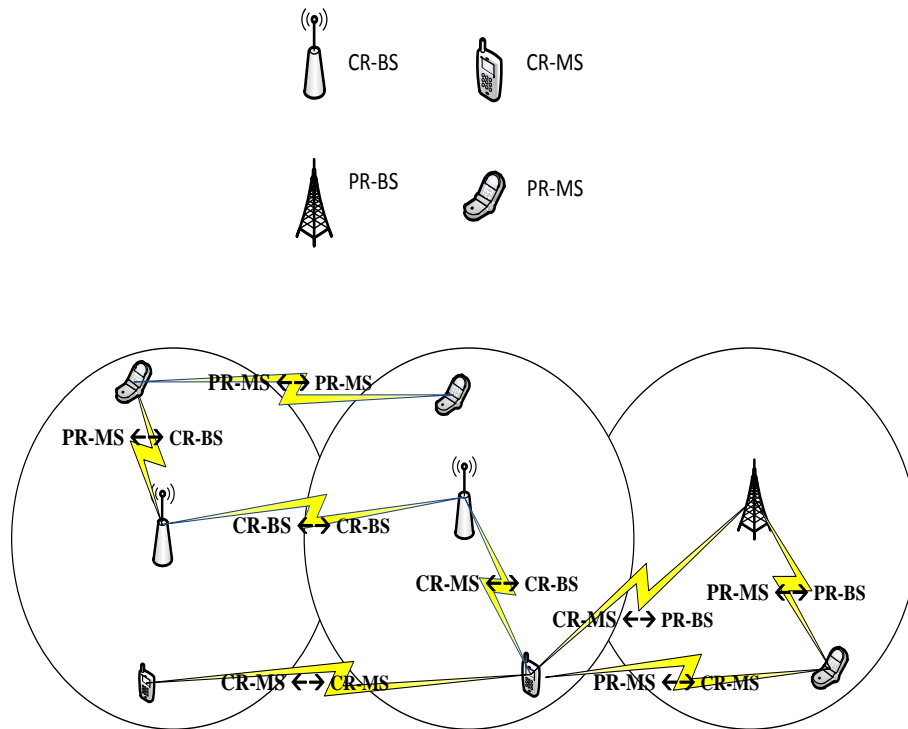


Figura 2.6: Links em CRNs.

- **CR-MS → CR-MS**

Um CR-MS pode se comunicar com outro CR-MSs em *links* diretos. Eles podem sentir, cooperativamente, vazios de espectro nas faixas de frequências diferentes, que podem ser licenciados ou não licenciados e utilizá-los como sua banda de frequência de operação. Pode ser necessário um canal de controle comum para que eles troquem informações sobre vazios de espectro.

- **CR-MS → CR-BS**

Um CR-BS pode sentir, dinamicamente, uma faixa de frequência disponível em torno dele e reunir os resultados de detecção de outros MSS e fornecer acesso *one-hop* para CR-MSs sob sua área de cobertura. Esta pode precisar de técnica de sensoriamento cooperativa. Sob a coordenação do CR-BS, o CR-MS pode acessar as redes de *backbone* ou se comunicar com outros sistemas de comunicação.

- **CR-MS → PR-BS**

Se existe a necessidade de um CR-MS se conectar a um PR-BS, ele irá reconfigurar-se e tornar-se uma parte do sistema primário (isto é, PR-MS). Neste caso, ele se tornará um usuário primário nessa faixa.

- **CR-BS → CR-BS**

Permitindo, simultaneamente, ligações sem fios diretos entre CR-BS, eles podem formar uma rede *backbone wireless mesh*. Devido à sua capacidade de rádio cognitivo, eles podem escolher, dinamicamente, a banda frequência de funcionamento e se comunicarem um com o outro. Uma vez que os CR-BS podem ter muito mais interfaces aéreas, a capacidade de ligação entre o CR-BS pode ser maior.

- **PR-MS → PR-BS**

É a conexão típica *one-hop* entre estações móveis e estações de base. A PR-BS é responsável pela coordenação de comunicação em sua cobertura e proporcionar o acesso à rede *backbone* para a PR-MS.

- **PR-MS → CR-MS**

A fim de oferecer interoperabilidade entre diferentes sistemas de comunicação, este tipo de ligação pode ser necessário, neste caso, o CR-MS deverá se reconfigurar para ser uma parte do sistema primário.

- **PR-MS → CR-BS**

A fim de oferecer interoperabilidade entre diferentes sistemas de comunicação, este tipo de ligação pode ser necessária, se o CR-BS puder executar o protocolo do sistema primário, que pode fornecer o serviço de acesso à PR-MS.

- **PR-MS → PR-MS**

Incluindo este *link*, permite-se a possibilidade de conexões *ad hoc* entre PR-MSs.