



Universidade Federal de Pernambuco

Centro de Informática - Cin

Graduação em Engenharia da Computação

Uma Classificação e Análise Comparativa de Protocolos Multicanal de Controle de Acesso ao Meio para Redes *Ad Hoc*

Diogo Rodrigues da Silva

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Recife, Dezembro de 2016



Universidade Federal de Pernambuco

Centro de Informática - Cin

Graduação em Engenharia da Computação

Uma Classificação e Análise Comparativa de Protocolos Multicanal de Controle de Acesso ao Meio para Redes *Ad Hoc*

Trabalho apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação.

Aluno: Diogo Rodrigues da Silva

Orientador: Renato Mariz de Moraes

"Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele o fará."

Salmos 37:5

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por sempre ter me ajudado em tudo que eu preciso, mesmo eu não sendo merecedor de sua misericórdia. Agradeço a minha família por todo apoio, carinho e dedicação, pois sem eles eu nunca conseguiria completar minha graduação. Agradeço também a todos os colegas de turma que se tornaram meus amigos ao longo dessa jornada.

Um agradecimento especial a Glória e Gorete por todo o apoio durante a realização deste trabalho, que mesmo quando eu pensava em desistir elas me apoiaram e me levantaram; A João e Karen por me ajudarem nos momentos que eu mais precisei; Ao professor Renato por me dar a oportunidade de aprender cada vez mais com ele.

Resumo

A comunicação sem fio é algo presente em diversos segmentos e ambientes. Aliada à contínua miniaturização dos componentes de *hardware*, diminuição de seu custo e aumento na capacidade de processamento, vem sendo estimulado cada vez mais o desenvolvimento e o uso das redes *ad hoc* sem fio. Diferente das redes de comunicação tradicionais, as redes *ad hoc* sem fio não possuem uma infraestrutura de gerenciamento e controle centralizada, surgindo assim a necessidade de que isso seja feito de forma distribuída entre os nós que compõem a rede, levando sempre em consideração restrições de energia, limitação de memória e capacidade de processamento, o que traz grandes desafios ao projetar protocolos para tal tecnologia. Neste trabalho, será apresentado um levantamento dos protocolos multicanal da camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC, do inglês *Medium Access Control*) para redes *ad hoc* mais comumente citados e utilizados na literatura, uma classificação, uma avaliação comparativa e evolutiva dos protocolos e finalmente uma discussão sobre os desafios em aberto e possíveis trabalhos futuros.

Palavras-chaves: Camada MAC; Classificação de protocolos; Comparação de protocolos, Evolução dos protocolos MAC; Problema do terminal escondido; Protocolos MAC; Multicanal.

Abstract

Wireless communication is present in several segments and environments. Combined with the continuous miniaturization of hardware components, cost reduction and expansion in processing capacity, it has encouraged the development and use of Wireless Ad hoc Network. Unlike traditional communication networks, Wireless Ad hoc Network does not have a centralized infrastructure of management and control, thus resulting in the need of distributed management and control among the nodes of the network, considering energy constraints, memory limitation and processing capacity, which brings great challenges when designing protocols for such technology. This work will present a survey of multi-channel protocols from the medium access control layer - (MAC) to ad hoc networks most commonly cited in the literature, a classification, a comparative and evolutionary evaluation of protocols, and finally a discussion about the open challenges and possible future work.

Keywords: MAC layer; Protocols classification; Protocols comparison; Evolutionary evaluation of MAC protocols; Hidden terminal problem; MAC protocols; Multichannel.

Sumário

1	Introdução	8
1.1	Motivação	8
1.2	Objetivos	9
1.3	Estrutura do Documento	10
2	Contextualização	10
2.1	Redes <i>ad hoc</i>	10
2.1.1	Principais características	11
2.1.2	Redes de sensores sem fio	14
2.1.2.1	Arquitetura da rede de sensores sem fio	15
2.1.2.2	Topologia das redes de sensores sem fio	16
2.1.2.3	Planos de gerenciamento	17
2.1.2.4	Taxonomia de aplicações de redes de sensores sem fio	19
2.1.2.5	Atributos de um bom protocolo MAC para RFFS	20
2.1.3	Redes <i>ad hoc</i> móveis	21
2.1.3.1	Características das MANETs	21
2.1.3.2	Aplicações	22
2.1.3.3	Desafios tecnológicos	23
2.1.4	Redes <i>ad hoc</i> veiculares	25
2.1.4.1	Arquiteturas de comunicação	25
2.1.4.2	Restrições e requisitos	26
2.1.4.3	Desafio na concepção de protocolos para VANETs	27
2.2	Camada de Controle de acesso ao Meio (MAC)	29
2.3	Protocolos da camada MAC para Redes <i>ad hoc</i>	29
2.3.1	Restrições e Requisitos	29
2.3.1.1	Consumo energético	30
2.3.2	Problema do terminal escondido	33
2.3.3	Problema do terminal exposto	34
2.3.4	Problema do terminal mascarado	35

3	Classificação dos protocolos MAC	36
3.1	Acesso ao meio	37
3.1.1	Baseados em contenção	37
3.1.1.1	Síncronos	38
3.1.1.2	Assíncronos	40
3.1.2	Livres de contenção	42
3.1.3	Híbridos	44
3.2	Separação do canal	45
3.2.1	Monocanal	45
3.2.2	Multicanal	48
3.2.2.1	Separação generalizada	49
3.2.2.2	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo	51
3.2.2.3	Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência	52
3.2.2.4	Acesso Múltiplo por Divisão de código	52
3.2.2.5	Acesso Múltiplo por Divisão de Espaço	54
3.2.2.6	Protocolos híbridos	54
3.2.2.7	Benefícios das comunicações multicanais	56
4	Análise comparativa	58
5	Direcionamento de pesquisas futuras e desafios	66
6	Conclusão	70

1 Introdução

Nesta seção de introdução serão apresentados a motivação para o desenvolvimento deste trabalho de graduação, os objetivos propostos e por fim a estrutura do documento.

1.1 Motivação

A comunicação sem fio é cada vez mais comum no mundo atual, presente em diversos segmentos e ambientes, dando suporte ao desenvolvimento de aplicações ubíquas e pervasivas¹. Fatores como a miniaturização de componentes de *hardware*, aumento na sua capacidade de processamento, armazenamento, e transmissão de dados, estão estimulando a utilização e desenvolvimento de redes sem fio em diversos cenários. Diante disso, diversas tecnologias e padrões de rede sem fio vêm surgindo nos últimos anos, a fim de tornar o uso de tais tecnologias realizáveis.

Com o surgimento de novas aplicações que necessitam que dispositivos computacionais se comuniquem uns com os outros ao seu redor, onde a existência de uma infraestrutura de controle e gerenciamento centralizado muitas vezes não é factível, ou até mesmo foi comprometida após a ocorrência de um desastre, a proposta de redes *ad hoc* mostra-se uma tecnologia promissora [1].

O principal objetivo de redes *ad hoc* é permitir que um grupo de nós se auto-organizem e formem uma rede, utilizando a interface sem fio para trocar informações sem a necessidade de um controle infraestruturado ou o apoio de uma estação base, compartilhando o meio de forma eficiente e confiável. Cada nó pode se comunicar diretamente entre si, ou encaminhar seu tráfego através de saltos entre os nós intermediários, fazendo com que cada nó se comporte como um roteador. Além disso, o tempo de permanência na rede não é constante, fazendo com que alguns dos dispositivos da rede participem dela durante o tempo de vida da mesma ou do próprio dispositivo, ou até mesmo durante um curto intervalo de tempo em que esses dispositivos permaneçam a uma certa proximidade, já que muitos desses nós podem ser móveis. Mesmo com todo esse dinamismo de entrada e saída de nós, a rede deve se recuperar de eventuais falhas ou quebras de enlaces de comunicação.

As redes *ad hoc*, por possuírem uma natureza de controle e gerenciamento descentralizadas, tornam-se uma solução bastante interessante em diversas aplicações que exigem uma configuração rápida e mínima tal como: desastres naturais, monitoramento de ambientes hostis,

¹ **Pervasivo** é algo que está em todo lugar, porém, sem ser percebido.

rastreamento de alvo, sistemas de controle, monitoramento de saúde, conflitos militares e até aplicações envolvendo Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) [2]. Além disso, a capacidade de lidar com falhas nos nós e a reconfiguração de rotas de envio de pacotes de informação, caso ocorram quebras de enlaces (*links*) entre os nós, permitem uma maior mobilidade da rede, o que resulta em uma topologia dinâmica.

Devido aos requisitos estabelecidos para o funcionamento de redes *ad hoc*, os paradigmas clássicos nem sempre são eficientes para gerenciar tais redes, trazendo assim novos desafios no desenvolvimento de protocolos para atender tais necessidades. Como citados, a falta de controle centralizado, mobilidade, número grande de dispositivos, natureza dinâmica do ambiente e restrição de recursos são algumas das características destas redes [3] que não devem ser negligenciadas na hora da concepção dos protocolos.

A camada MAC é a camada entre a camada de transporte e a camada física, sendo responsável por enviar os dados de uma camada para a outra. Esta camada é responsável pelo gerenciamento e estabelecimento de enlaces de comunicação, o que faz com que a comunicação seja possível entre pares ou vários nós em conjunto através de um controle dinâmico. Esse controle dinâmico permite entradas e saídas de nós na rede, o que o torna essencial para que a comunicação ocorra com sucesso, sempre procurando evitar colisões (ou interferências) na transmissão de dados. Além das características citadas, um outro fator chave na concepção dos protocolos da camada MAC é a maneira que os nós acessam e utilizam o meio disponível. Abordagens iniciais consideravam o meio como um único canal de comunicação, entretanto, abordagens mais recentes têm utilizado múltiplos canais [4], inclusive técnicas de rádio cognitivo (do inglês *cognitive radio*) [5], o qual permite um maior número de usuários na rede. Diante do cenário apresentado, conhecer os principais aspectos que influenciam no funcionamento dos protocolos da camada MAC e entender quais problemas foram e ainda precisam ser solucionados, é de extrema importância no momento da concepção ou melhoria desses protocolos, pois estes nós possuem memória e processamento limitados.

1.2 Objetivos

Esse trabalho de graduação teve como objetivo geral a realização de um levantamento, classificação e análise de forma qualitativa e evolutiva dos principais protocolos multicanal de Controle de Acesso ao Meio para redes *ad hoc* encontrados na literatura e utilizados na academia e na indústria. Foram levados em consideração os principais problemas solucionados por esses

protocolos, suas limitações e serão disponibilizadas neste trabalho informações e análises úteis que darão suporte a futuras pesquisas e criações de novos protocolos. São objetivos específicos deste trabalho:

1. Classificação dos protocolos de acordo com a estratégia de acesso ao meio utilizada;
2. Elaboração de uma tabela comparativa que facilite a identificação e diferenciação dos principais protocolos investigados;
3. Identificação das principais limitações desses protocolos e a indicação das possíveis linhas de pesquisa futuras com potenciais soluções para os problemas em aberto.

1.3 Estrutura do Documento

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: na Seção 2 serão apresentados os principais conceitos de redes *ad hoc*, suas características e principais aplicações. Na Seção 3 será apresentada uma classificação de acordo com os métodos de acesso e separação do canal dos protocolos da camada MAC. Na Seção 4 será apresentada uma tabela comparativa dos protocolos analisados durante o trabalho. Na Seção 5 serão apresentados alguns desafios encontrados na literatura para a concepção de protocolos multicanal e possíveis direcionamentos de pesquisa. Por último na Seção 6 será apresentado a conclusão deste trabalho.

2 Contextualização

2.1 Redes *ad hoc*

O conceito de rede *ad hoc* surgiu do início da década de 1970, quando a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (DARPA)² iniciou pesquisas sobre a viabilidade de usar comunicações de rádio comutadas por pacotes para aumentar a confiabilidade, explorando a utilização dessas redes em ambientes tático militar [6]. O desenvolvimento deste projeto, conhecido como *DARPA Packet Radio Network*, foi motivado pela necessidade de fornecer acesso à rede de computadores pelos terminais móveis em ambientes onde não há infra-estrutura de cabos ou celular. Apesar das comunicações táticas militares surgirem como a principal aplicação

²<http://www.darpa.mil/>

das redes *ad hoc* na época, um crescente número de aplicações não militares surgiu, ajudando a estabelecer o conceito de rede sem fio *ad hoc*.

O principal objetivo das redes *ad hoc* é permitir que grupos de nós de comunicação possam se auto-configurar e manter uma rede através deles mesmo, sem a necessidade de uma estação base ou uma central de controle [2]. Tais redes são um fator chave na evolução das comunicações sem fio [7]. Essas redes herdam os tradicionais problemas das comunicações móveis e sem fio, como otimização de largura de banda, controle de energia e aprimoramento da qualidade da transmissão. Além disso, a natureza multi-saltos e a falta de uma infra-estrutura fixa em alguns casos, introduzem novos problemas de pesquisa, como configuração de rede, descoberta de dispositivos e manutenção de topologia, bem como endereçamento *ad hoc* e auto-roteamento. Várias abordagens e protocolos têm sido propostos para resolver problemas de redes *ad hoc*, bem como projetos de pesquisa acadêmica e industrial.

2.1.1 Principais características

Em [8] foram abordadas as principais características das redes *ad hoc*, onde algumas delas já foram citadas na Seção 1.1. Além das características apresentadas neste artigo, outras características citadas pelos autores em [9] e [10] serão abordadas nesta seção. Abaixo segue a lista com essas características e a descrição de cada uma:

- **Mobilidade:** A implantação dessas redes em áreas sem infra-estrutura implica na necessidade dos nós explorarem a região a fim de formarem grupos, de forma coordenada entre si, para realizar uma tarefa específica. Existem vários tipos de mobilidades como aleatória, mobilidade em grupo, ou até movimento ao longo de rotas planejadas. Em alguns cenários, a natureza dos nós por si só já é dinâmica, como no caso de redes *ad hoc* veiculares que serão abordadas na Seção 2.1.4. O modelo de mobilidade é um aspecto vital nas redes *ad hoc* [9] e pode ter um grande impacto no protocolo de roteamento utilizado pela rede, podendo assim ter bastante influência no desempenho.
- **Multi-saltos (*Multihopping*):** A natureza multi-saltos das redes *ad hoc* está relacionada com o caminho que os pacotes transmitidos irão passar da fonte até o destino. A utilização de múltiplos saltos está relacionada a fatores como economia energética, pois transmissão de curto alcance geralmente consome menos energia que a transmissão de longo alcance. Por isso, as operações secretas em campo de batalha utilizam dessa estratégia de pequenos saltos para tentar evitar a sua detecção pelo inimigo pelo nível de potência da transmissão.

- Conservação de energia: Em diversas aplicações de redes *ad hoc*, os nós tem uma fonte de alimentação limitada e nenhuma capacidade para gerar a sua energia primária (por exemplo, utilização de painéis solares). Por este motivo, o projeto de protocolos eficientes energeticamente, distribuídos entre as camadas da rede (por exemplo, MAC, roteamento, transporte, etc.), é crítico para a longevidade da aplicação.
- Auto-organização: É uma característica intrínseca das redes *ad hoc*, pois pela falta de um controle central, os nós devem determinar de forma conjunta e autônoma seus próprios parâmetros de configuração, incluindo: endereçamento, roteamento, agrupamento, identificação de posição, controle de potência, dentre outros, devido às mudanças que podem ocorrer na rede.
- Autocura, do inglês *Self-healing*: Devido à necessidade dos protocolos das redes *ad hoc* de procurar economizar energia para estender o tempo de vida dos nós e da rede, alguns protocolos utilizam-se do encaminhamento de pacotes através de nós que têm energia restante suficiente e evitam aqueles com baixo nível de energia. A autocura permite alcançar a equidade de roteamento, evitando as situações em que certos nós estão sendo usados em excesso enquanto outros nós estão ociosos, desviando o tráfego da área carregada, equilibrando a carga em todos os nós da rede [9]. Além deste aspecto apresentado, podemos citar as situações em que nós podem ser inutilizados, podem ter quebra de *link* ou se distanciarem da rede devido à mobilidade [10], exigindo assim que o protocolo seja robusto e descubra outras rotas para que o pacote chegue ao destino.
- Auto-otimização: Devido à restrição de recursos dos componentes das redes *ad hoc*, a necessidade da otimização do uso de tais recursos se torna essencial para otimização da própria rede [10].
- Autoproteção: é a propriedade de antecipar, detectar, identificar e proteger a rede a fim de conservar a integridade da mesma.
- Escalabilidade: Em diversas aplicações de redes *ad hoc* a quantidade de nós que as compõem pode crescer para vários milhares de nós. Para redes com infra-estrutura sem fio, a escalabilidade é simplesmente tratada por uma construção hierárquica. A mobilidade limitada das redes de infra-estrutura também pode ser facilmente manipulada utilizando IP Móvel ou técnicas de transferência local. Em contraste, devido à mobilidade mais

extensa e à falta de referências fixas, as redes *ad hoc* não toleram o IP móvel ou uma estrutura de hierarquia fixa. Assim, a mobilidade, juntamente com a grande escala, é um dos desafios mais críticos no planejamento *ad hoc*.

- **Segurança:** os desafios da segurança sem fio são bem conhecidos, como habilidade dos intrusos para espiar e congestionar o canal. Grande parte do trabalho realizado em redes de infra-estrutura sem fio geral se estende ao domínio *ad hoc*. As redes *ad hoc*, no entanto, são ainda mais vulneráveis aos ataques do que as infra-estruturadas. Ambos os ataques ativos e passivos são possíveis. Um atacante ativo tende a interromper as operações (digamos, um impostor posando como um nó legítimo intercepta os pacotes de controle e dados, reintroduz pacotes de controle falso, danifica as tabelas de roteamento). Devido à complexidade dos protocolos de rede *ad hoc*, esses ataques ativos são muito mais difíceis de detectar do que nas redes de infra-estrutura. O atacante ativo é eventualmente descoberto e eliminado. O invasor passivo nunca é descoberto pela rede. Ele monitora dados e controla os padrões de tráfego e, assim, infere, por exemplo, o movimento de equipes de resgate em um ambiente urbano. Defesa de ataques passivos exigem novas técnicas de criptografia poderosas juntamente com projetos de protocolo de rede cuidadosamente planejadas.
- **Conexão com a Internet:** Há mérito em estender as redes sem fio infra-estruturadas de forma oportunista com redes *ad hoc*. Por exemplo, o alcance de uma LAN sem fio doméstica pode ser estendido conforme necessário (para a garagem, o carro estacionado na rua, casa do vizinho, etc.) com roteadores móveis. Essas extensões oportunistas estão se tornando cada vez mais importantes e de fato são a via de evolução mais promissora para aplicações comerciais. A integração de protocolos *ad hoc* com padrões de infra-estrutura está se tornando um avanço desafiador.

Além das características apresentadas acima, podemos acrescentar como características secundárias as seguintes [10]:

- **Autoconsciente,** do inglês *self-aware*: Este atributo está relacionado ao conhecimento da rede do seu estado atual, incluindo seus componentes, recursos, relacionamento entre os nós e limitação da rede, de forma detalhada.
- **Auto-adaptável:** Este atributo nasce do conhecimento pela rede do ambiente ao redor,

gerando estratégias de como interagir com os sistemas vizinhos, adaptando seu comportamento com as mudanças do ambiente.

- Auto-evolutiva: Significa implementar novas estratégias e implementações de padrões abertos.

Devido à grande diversidade de redes *ad hoc* que são empregadas em uma variedade de cenários, podendo os dispositivos serem móveis ou o ambiente sofrer mudanças de forma dinâmica, surgem diversos requisitos em razão de restrições diferentes. Como podemos perceber, grande parte das características são auto-relacionadas. Nas próximas seções serão apresentadas as principais categorias de redes *ad hoc*, suas principais características, requisitos e aplicações.

2.1.2 Redes de sensores sem fio

As redes de sensores sem fio (RSSF), popularmente conhecidas do inglês como *Wireless Sensor Networks*, são um tipo especial de redes de comunicação sem fio compostas por um largo conjunto de dispositivos computacionais embarcados chamados de nós sensores, do inglês *sensor nodes*. Os nós sensores têm a pretensão de serem autônomos, possuem um baixo custo e trabalham espalhados em ambientes potencialmente hostis por um período de máxima duração sem intervenção humana [11]. O nó sensor é uma das partes principais de uma RSSF. Esses dispositivos possuem quatro partes: a unidade de processamento (*microcontroller*), a interface de comunicação sem fio (*transceiver*), bem como sensores e/ou atuadores (representada por *sensor*) e a bateria junto com o módulo de gerenciamento de consumo (*power and power management*) [12]. A Figura 1 ilustra a arquitetura de um nó sensor. O módulo de alimentação oferece a potência confiável necessária para o funcionamento do sistema. O sensor é responsável pela coleta e transformação dos sinais, tais como luz, vibração e sinais químicos, em sinais elétricos e, em seguida, deve transferi-los para o microcontrolador. O microcontrolador recebe os dados do sensor e executa o processamento verificando se há a necessidade de tomada de decisão. O transceptor sem fio é responsável por transferir os dados, captados pelo seu sensor ou recebidos de outros nós, e receber dados de outro nós. É importante que o projeto de todas as partes de um nó da RSSF considere características como o tamanho minúsculo e poder computacional limitado do nós [13].

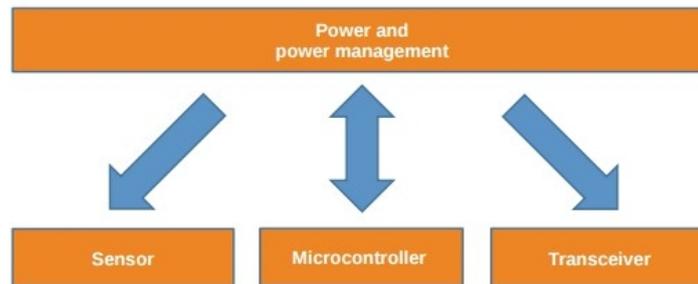


Figura 1: Arquitetura do nó sensor [14]

As redes de sensores sem fio são compostas por diversos nós espacialmente distribuídos, que têm a finalidade de realizarem um objetivo em comum, como sensorar, coletar e monitorar variáveis de interesse do ambiente. De forma genérica, uma RSSF é formada por nós sensores que são equipados com componentes de baixa capacidade de processamento e armazenamento, fonte de alimentação limitada, além de circuito de transmissão e recepção de sinal sem fio de curto alcance. Esses sensores transferem informações coletadas para uma entidade central chamada sorvedouro, do inglês *sink*, que geralmente é mais poderosa do que os outros nós, e onde essa informação pode ser analisada ou transmitida via Internet.

O acesso eficiente ao meio é um dos requisitos importantes para a operação contínua da rede. As abordagens mais antigas de acesso ao meio, como no IEEE 802.11 [15], não são viáveis para aplicações baseadas em RSSF, pois requerem detecção e verificação constantes do canal, o que é ineficiente para nós da rede de sensores sem fio, visto que este tipo de operação requer bastante consumo de energia o que tornaria o tempo de vida da bateria curta [16].

2.1.2.1 Arquitetura da rede de sensores sem fio

A rede de sensores normalmente é composta por nós sensores, nós atuadores, roteadores (*gateways*) e clientes [13]. A área de monitoramento, conhecida do inglês como *field sensor*, é onde um grande número de nós sensores são implantados aleatoriamente para formar redes através de auto-organização. Os nós sensores monitoram os dados coletados para transmitir ao longo de outros nós sensores, através de salto, para uma entidade central que é conhecida como *sink* que pode ser um *gateway*, que geralmente é mais poderosa que os outros nós da rede. É nessa entidade central que as informações podem ser analisadas ou transmitidas via internet [11]. A Figura 2 ilustra os principais componentes da rede de sensores sem fio.

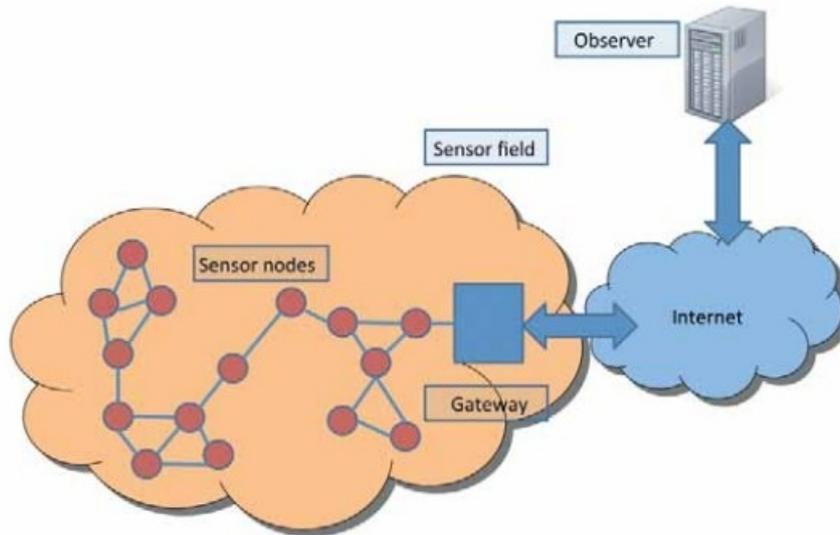


Figura 2: Redes de sensores sem fio [13]

2.1.2.2 Topologia das redes de sensores sem fio

Como foi citado na seção 2.1.2.1, as redes de sensores consistem de numerosos nós sensores e um nó *sink* que faz conexão da rede com a *Internet*. A Figura 3 representa o processo de implantação de uma rede de sensores.

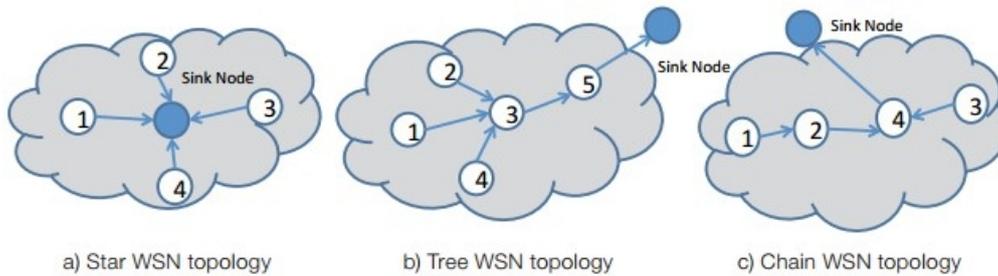


Figura 3: Tipos de topologias da RSSF: estrela (*star*), árvore (*tree*) e cadeia (*chain*) [13]

A primeira etapa do processo de implantação é a colocação dos sensores (*placing sensors*) na área de monitoramento. Em sequência, os nós sensores acordam e enviam seus *status* para os nós sensores que estejam ao redor, e recebem os *status* de outros para que cada um conheça sua vizinhança, representada pela etapa *waking up and detecting* mostrada na Figura 4. Na etapa seguinte, os nós são organizados em uma rede de acordo com uma determinada topologia, representada na Figura 4 por *connecting into a network*. Por último, são estabelecidas as rotas para que seja feita a troca de dados.

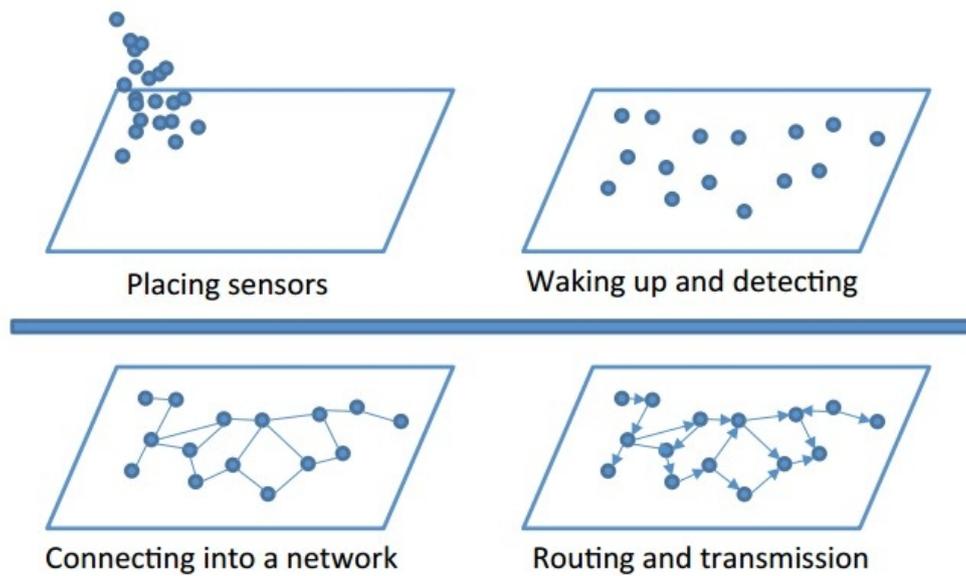


Figura 4: Processo de organização e transmissão das RSSFs [13]

2.1.2.3 Planos de gerenciamento

As redes de sensores sem fio são consideradas subclasse das redes *ad hoc*, caracterizadas pela descentralização do envio e recepção de dados entre os dispositivos, onde qualquer nó pode realizar enlace e roteamento de dados, agindo de forma cooperativa com as solicitações de envio e recepção de dados dos nós vizinhos. Diferente das redes tradicionais, as RSSFs possuem restrições devido a sua limitada capacidade de processamento, armazenamento e energia. De forma genérica estes sensores pode ser depositados em regiões remotas ou inóspitas, restringindo ainda mais seu acesso à manutenção, obrigando ao dispositivo terem um reduzido consumo energético, evitando exaurir sua bateria de forma prematura. Esta necessidade deve ser levada a todas as camadas da pilha de protocolos da rede. Outros dois fatores relevantes dizem respeito a mobilidade dos nós e ao gerenciamento de tarefas de cada nó. Diante disso, criou-se planos de gerenciamento para permitirem que os componentes da rede trabalhem de forma mais eficiente, consumindo menos energia, gerenciando a mobilidade dos nós e compartilhando os recursos da rede. Caso esses planos não existissem, os sensores trabalhariam de forma individual e não como uma rede [12]. A Figura 5 ilustra a pilha de protocolos das RFFS e mostra que os planos de gerenciamento fazem parte de todas as suas camadas.

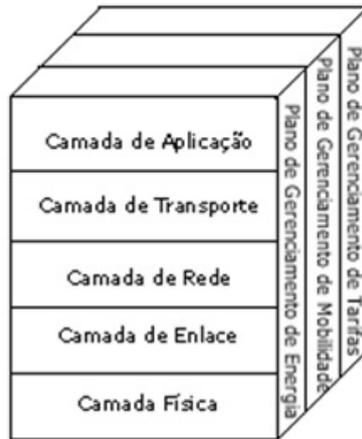


Figura 5: Pilha de protocolos das RSSF [17]

Como é mostrado na Figura 5, existem três planos de gerenciamento, que são explicados a seguir:

Plano de gerenciamento de energia - A energia consumida pelos sensores é um dos fatores primordiais que devem ser observados em uma rede de sensores, diante disso, este plano é responsável por controlar o uso de energia consumida por cada sensor. Por exemplo, os protocolos podem aproveitar as informações de nível de energia de um sensor para procurar rotas alternativas levando em consideração o fator de energia, evitando que a informação passe através deste sensor, com o nível de energia baixo, para alcançar o *sink*, podendo este nó continuar sensoreando e apenas trocar dados quando realmente necessário. Outra estratégia que pode ser utilizada, é desligar o nó no período que ele não irá receber dados para economizar energia.

Plano de gerenciamento de mobilidade - Pelo fato dos nós sensores poderem ser móveis, existe a necessidade de que os nós conheçam sua vizinhança e saibam qual a rota necessária para alcançar o nó destino. Por isso, o plano de gerenciamento de mobilidade é importante, pois ele é responsável por manter atualizada uma lista com os sensores vizinhos, resultando em consumo de energia mais balanceado e a auxilia na escolha de realização das tarefas possíveis.

Plano de gerenciamento de tarefas - Dependendo da aplicação, nem todos os nós sensores necessitam realizar o sensoriamento de forma simultânea. Diante disso, o plano de gerenciamento de tarefas é encarregado de escalonar a tarefa realizada por eles de acordo com regiões geográficas determinadas. Geralmente, os sensores que estão com maior nível de energia são escolhidos para realizar estas tarefas mais vezes do que aqueles com nível de energia mais baixo.

2.1.2.4 Taxonomia de aplicações de redes de sensores sem fio

A rede de sensores sem fio é uma tecnologia emergente que vem ganhando destaque dentre as demais tecnologias e padrões sem fio. Muitas aplicações estão surgindo dado a versatilidade desta tecnologia, dentre elas agricultura de precisão, monitoramento de ambientes inóspitos, detecção de intrusão, rastreamento de alvos, aplicações militares, edifícios inteligentes e monitoramentos diversos (ambiental, hospitalar, etc.).

Devido à grande variedade de aplicações em que as RFFS estão sendo empregadas, diversos requisitos vêm surgindo. Através de tais requisitos, [12] identificou alguns traços comuns em aplicações de RSSF e propôs uma taxonomia para classificar as RFFS levando em consideração suas aplicações. A Figura 6 apresenta a taxonomia proposta por [12].

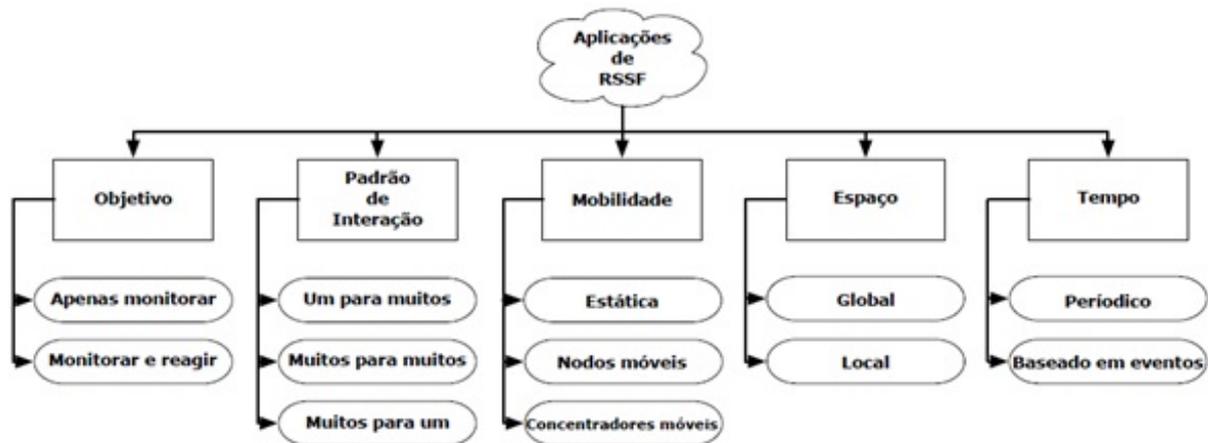


Figura 6: Uma taxonomia de aplicações RSSF [12]

De forma breve, podemos analisar cada característica apresentada na taxonomia.

Começando pelo lado esquerdo da Figura 6, **Objetivo** pode ser dividido em:

- **Apenas monitorar** - A finalidade da aplicação é apenas coletar dados ambientais para análise posterior, ou em tempo real. Um padrão conhecido como *sense-only*, ou do português apenas sensoriar.
- **Monitorar e reagir** - Os nós podem reagir a dados detectados, pelo fato de possuírem atuadores sem fio, fechando o *loop* de controle. Um padrão conhecido como *sense-and-react*, ou do português sensoriar e reagir.

Padrão de interação é a maneira como os nós interagem uns com os outros na rede, isso

se dá de acordo com o objetivo da aplicação. Podendo ser **um para muitos, muitos para muitos** ou **muitos para um**.

Mobilidade: A mobilidade pode (ou não) manifestar-se de maneiras diferentes, pelo fato das topologias serem altamente dinâmicas em redes de sensores.

- **Estática** - Existem aplicações em que os nós são estáticos. Geralmente é o caso mais comum em implantações atuais.
- **Nós móveis** - Algumas aplicações utilizam nós móveis ligados a entidades móveis (por exemplo, robôs ou animais) ou os mesmos são capazes de se moverem de forma autônoma.
- **Sorvedouros móveis** - Sorvedouros, ou do inglês *sink*, são nós geralmente mais poderosos que concentram a informação, que são capazes de se comunicar com o gerenciador de tarefas através da Internet ou de uma conexão por satélite. O aspecto-chave é que a coleta de dados é realizada oportunisticamente quando o *sink* se move na proximidade dos sensores.

Espaço - Pelo fato do processamento ser distribuído em redes de sensores, a aplicação pode compreender o espaço físico como um todo (**global**) ou diferentes partes do espaço físico (**regional**). A abordagem global é implantada quando o processamento e/ou o sensoriamento envolve toda a rede, muito provavelmente porque os fenômenos de interesse compreendem toda a área onde a RSSF foi implantada.

Tempo - Também determinado pelos fenômenos que estão sendo monitorados. O tempo é um aspecto que pode determinar quando os nós sensores irão realizar suas tarefas, podendo ser **periódico**, quando as aplicações são projetadas para processar continuamente dados detectados, ou **baseado em eventos** que podem ser divididos em duas fases (i) durante a detecção de eventos, o sistema é em grande parte quiescente, com cada nó monitorando os valores das amostras do ambiente com pouca ou nenhuma comunicação envolvida; (ii) se e quando a condição de evento é satisfeita (por exemplo, o valor de sensor sobe acima de um limiar), a RSSF inicia seu processamento distribuído.

2.1.2.5 Atributos de um bom protocolo MAC para RFFS

De forma resumida, podemos descrever alguns dos principais atributos para um bom protocolo MAC para rede de sensores sem fio. Em [18], os seguintes atributos foram apresentados:

- **Eficiência Energética:** A eficiência energética é importante, pois o nó é equipado com uma pequena bateria, e dependendo do ambiente em que a rede se situa, pode ser extremamente complicado trocar ou recarregar as baterias dos nós. Às vezes, é mais útil substituir o nó sensor em vez de recarregá-los.
- **Latência:** O requisito de latência depende basicamente da aplicação. Os eventos detectados devem ser relatados para o nó coletor em tempo real, de modo que a ação adequada possa ser tomada imediatamente.
- **Vazão, do inglês *Throughput*:** Algumas aplicações de redes de sensores sem fio exigem uma alta taxa de dados de transmissão e recebimento. E protocolos para a camada MAC devem ser robustos o suficiente para manterem essas taxas mesmo que o número de nós na rede aumente.
- **Justiça, do inglês *Fairness*:** Em algumas aplicações de rede de sensores quando a largura de banda é limitada, é obrigatório confirmar se o nó coletor recebe informações de todos os nós de sensores de forma justa. No entanto, como na maioria das aplicações em redes de sensores a tarefa é comum a todos os nós, a justiça na transmissão pode ser um aspecto relaxado.

2.1.3 Redes *ad hoc* móveis

Um outro conceito de redes *ad hoc* refere-se às redes *ad hoc* móveis, do inglês *Mobile Ad hoc Networks* (MANETs). Em uma MANET, os dispositivos móveis dos usuários formam a rede, e juntos eles provêm as funcionalidades usualmente fornecidas pela infraestrutura da rede (roteadores, *switches*, servidores, etc). Dessa forma, a presença de uma infraestrutura fixa não é vital, principal característica das redes *ad hoc*, para o funcionamento de uma MANET, uma vez que a troca de informação é executada entre os próprios dispositivos móveis. Além das características apresentadas na Seção 2.1.1, outra que é adicionada em MANETS são a heterogeneidade dos dispositivos, visto que uma grande variedade de dispositivos computacionais podem ser parte integrante da rede.

2.1.3.1 Características das MANETs

Em [19] foram abordadas várias características das redes MANETs, as quais foram citadas na Seção 2.1.1. Nos artigos [20] e [19] foram identificadas as seguintes características:

- Diferente das redes *wireless* comuns, onde o usuário se comunica diretamente com um ponto de acesso ou estação-base, uma MANET não conta com uma infraestrutura fixa para suas operações, como representado na Figura 7.
- Mesmo que dois dispositivos não estejam conectados diretamente, a comunicação entre ambos pode ser estabelecida através de dispositivos intermediários que serão responsáveis pelo roteamento dos dados.
- Devido à capacidade de um dispositivo entrar e sair da rede a qualquer momento e mover-se aleatoriamente, a topologia das MANETs pode sofrer alterações imprevisíveis.
- Os nós da rede geralmente são dispositivos de baixa capacidade energética com uma grande diversidade de funcionalidades.

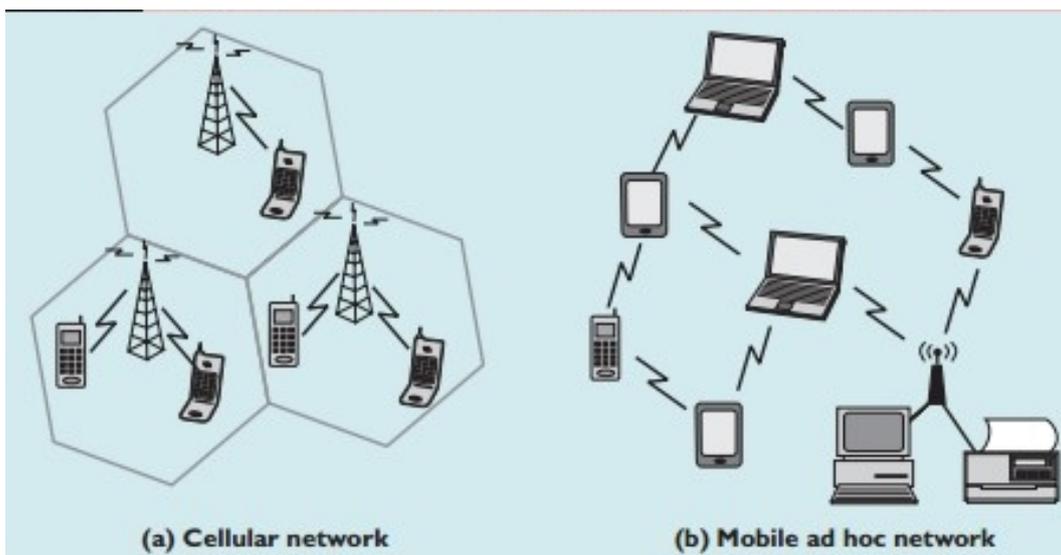


Figura 7: Rede celular *versus* MANETS [12]

2.1.3.2 Aplicações

Inicialmente as aplicações e implementações das MANETs foram orientadas para fins militares, porém com os avanços tecnológicos como o *Bluetooth* e o IEEE 802.11 e também aos avanços nas pesquisas, as aplicações não militares têm crescido substancialmente. Diante disso, novas aplicações de redes *ad hoc* apareceram em áreas especializadas em serviços de emergência, recuperação de desastre e monitoramento do ambiente. Além disso, devido a grande flexibilidade do MANET, essa tecnologia está presente em aplicações que requerem maior versatilidade como redes de área pessoal, redes domésticas, operações de aplicação da lei, operações

de salvamento, aplicações comerciais e educativas e redes de sensores. Podemos encontrar uma caracterização e serviços dos possíveis cenários atuais e futuros dessa rede em [20]:

- Redes Táticas: nas operações e comunicações militares e nos campos de batalha automatizados.
- Serviços de emergências: nas operações de pesquisa e resgate, recuperação de desastres, substituição das infraestruturas em caso de catástrofes ambientais, policiamento, no combate a incêndios e no assistencialismo de médicos e enfermeiros em hospitais.
- Ambientes comerciais e civis: nos estádios de esportes, feiras, centros comerciais, em redes de visitantes nos aeroportos, em serviços como pagamentos eletrônicos a qualquer hora e lugar, acesso dinâmico à base de dados e escritórios móveis e em serviços veiculares como orientação rodoviária ou acidental, transmissão de condições rodoviárias e meteorológicas, rede de táxis e redes intra-veiculares.
- Rede doméstica e empresarial: nas redes sem fio, nas conferências, salas de reuniões, em redes pessoais e em canteiros de obras.
- Educação: nas universidades e nos serviços de configurações do campus, em aulas virtuais e em comunicações *ad hoc* durante reuniões e palestras.
- Entretenimento: em jogos com multi-usuários, nas redes sem fio *peer to peer*, no acesso à Internet ao ar livre, nas redes robóticas e em parques temáticos.
- Redes de sensores: em aplicações domésticas como sensores inteligentes e atuadores incorporados em eletrônicos de consumo. Assim como em serviços de acompanhamento de dados das condições ambientais, movimento de animais e detecção química ou biológica.
- Serviços de percepção de contexto: como encaminhamento de chamadas, serviços dependentes de localização e do tempo e nos centros de informações turísticas.
- Extensão de cobertura: em serviços de extensão do acesso à rede celular, de ligação com a Internet, intranets, etc.

2.1.3.3 Desafios tecnológicos

As especificidades das MANETs trazem consigo desafios para o desenvolvimento de protocolos em todas as camadas de rede. Alguns desses desafios afetam, por exemplo, roteamento,

descoberta de serviços (*service discovery*) e camada MAC. Um apanhado sobre o assunto é feito em [20] e resumido a seguir:

- Roteamento: Devido a natureza volátil da topologia das redes MANETs, protocolos eficientes de roteamento são necessários para se estabelecer rotas de comunicação entre os nós sem causar um *overhead* excessivo no controle de tráfego ou uma exaustão computacional nos dispositivos com limitação energética. Dois exemplos de protocolos propostos são os roteamentos proativo e reativo. No primeiro tipo, os nós compartilham informações de controle periodicamente, ou quando há mudanças na topologia, o que leva a uma atualização constante das rotas para os demais nós presentes na rede. No roteamento reativo, os protocolos estabelecem rotas apenas entre os nós com os quais se comunica, e tais rotas são mantidas enquanto forem necessárias. Existem também os chamados protocolos híbridos, que incorporam os roteamentos proativo e reativo para uma melhor performance.
- Descoberta de serviços (*service discovery*): Devido às características das redes MANETS, os nós que o constituem não possuem o conhecimento exato dos serviços que cada uma oferece. Diante disso, existem algumas soluções para tratar esse problema. Uma das abordagens é a chamada Serviço sem Diretório (*Directory-less service*), na qual cada nó faz uma solicitação quando necessário e também cada um anuncia seus serviços a outros proativamente. A outra solução é o Serviço Baseado em Diretório (*directory-based service*), em que existe um diretório onde os serviços são armazenados e as solicitações são tratadas. Atualmente, esses mecanismos não são capazes de lidar com o dinamismo das redes *ad hoc* de forma eficiente.
- Controle de Acesso ao Meio (MAC): Numa MANET, a camada MAC precisa permitir um acesso de canal justo a todos os nós, minimizar colisão de pacotes e lidar com o problema do terminal escondido, descrito na Seção 2.3.2.
- Segurança: As redes *ad hoc* estão profundamente expostas a ataques de segurança devido a sua natureza de precisar da cooperação dos nós para a sua funcionalidade e de ser uma rede sem fio. Algumas soluções incluem a autenticação das fontes de mensagens, a integridade dos dados, proteção do sequenciamento das mensagens. Esses mecanismos precisam ser realizados através de técnicas de detecção que podem ser descobrir tentativas de infiltração e ataques na rede.

2.1.4 Redes *ad hoc* veiculares

Um das áreas de pesquisa e aplicação de redes *ad hoc* que vem emergindo há alguns anos são as redes *ad hoc* veiculares, do inglês *Vehicular Ad hoc Networks (VANETs)*. Surgiu com a necessidade de melhorar a eficiência do trânsito e a segurança dos motorista e passageiros, evitando assim acidentes e outros problemas relacionados. A rede *ad hoc* veicular permite que veículos formem uma rede auto-organizada sem a necessidade de uma infraestrutura permanente na estrada [21].

O surgimento dessas redes também se deve ao fato de cada vez mais os veículos estarem sendo equipados com sensores (ex.: para monitorar condições do tempo e da estrada, condições dos veículos, dentre outros), unidades de processamento, capacidade de comunicação sem fio e sistemas de navegação (ex.: GPS³) [22]. Em uma situação prática podemos citar o caso de um veículo sofrer um acidente, ele irá gerar uma mensagem de segurança que será transmitida através de um mecanismo de *broadcast* para os veículos que vêm em seguida. Esta mensagem conterá informações em tempo real da situação, alertando os motoristas para evitarem a zona perigosa do ocorrido [23].

Prover informações sobre engarrafamento, acidentes, perigos das condições das estradas, possíveis desvios e condições do tempo, possibilitam que o controle e gerenciamento das estradas seja feita de forma mais eficiente. Todos esses objetivos resultam na realização de sistemas de transporte inteligente, do inglês *Intelligent Transportation System (ITS)* [22].

2.1.4.1 Arquiteturas de comunicação

O principal objetivo das arquiteturas apresentadas para VANETs é possibilitar a comunicação entre veículos próximos e entre veículos e equipamentos fixos ao longo da estrada. As principais arquiteturas apresentadas na literatura para VANETs [24, 25, 26, 27] podem ser reunidas da seguinte forma:

- Interveículo, do inglês *Inter-Vehicle*, está relacionado ao domínio do veículo e é uma área de pesquisa bastante importante relacionada a VANETs. Possibilitando tanto o motorista como o próprio veículo estarem cientes do *status* do veículo, implicando assim diretamente no aumento da segurança do motorista e passageiros. Por exemplo, detectar sonolência do motorista e alertá-lo pode evitar acidentes.

³Sistema de posicionamento global, mais conhecido pela sigla GPS (do inglês, *global positioning system*).

- Veículo para veículo, do inglês *Vehicle-to-Vehicle (V2V)*, esta arquitetura permite que veículos possam se comunicar diretamente entre eles, comumente empregados em aplicações de segurança.
- Veículo para infraestrutura, do inglês *Vehicle-to-Infrastructure (V2I)*, esta arquitetura permite que veículos possam se comunicar com a infraestrutura na estrada, geralmente empregado em aplicações de coletas de dados.
- Arquitetura híbrida, do inglês *hybrid architecture*, combina as arquiteturas V2V e V2I. Essa arquitetura reúne as vantagens de ambas, fazendo com que os veículos possam se comunicar através de saltos diretos ou múltiplos, ou comunicação entre veículos distantes, sendo possível por conta da infraestrutura na estrada.
- Veículo para banda larga, do inglês *Vehicle-to-broadband cloud (V2B)* significa que o veículo pode se comunicar com a rede de banda larga celular. Podendo capturar informações de aplicações de coletas, tais como informações sobre as condições das estradas.

2.1.4.2 Restrições e requisitos

Apesar de ser considerado um caso especial de uma rede *ad hoc* móvel e apresentar características similares, as VANETs possuem peculiaridades, como a alta mobilidade dos veículos, a heterogeneidade dos componentes da rede, a forma como cada nó se locomove, o que traz novos desafios para comunicação de dados em VANETS. Isto é devido ao alto dinamismo e a topologia intermitente conectada e diferentes requisitos de qualidade de serviço. Além disso, por se tratar de aplicação de tempo real, terá a necessidade de alta acurácia no posicionamento do veículo. Em [22, 28] são descritos alguns dos principais aspectos que caracterizam as redes *ad hoc* veiculares:

- Topologia altamente dinâmica - Este aspecto é devido principalmente à velocidade em que os veículos se movem, podendo também se deslocar em diferentes direções, fazendo com que eles possam rapidamente se juntar e deixar a rede em um curto intervalo de tempo.
- Frequentemente desconectado - Resultado do alto dinamismo da topologia, citada no item anterior, a quebra de *link* entre os componentes da rede é frequente enquanto eles estão transmitindo informação.

- Comunicação geográfica - De modo geral, algumas informações são interessantes apenas para veículos que estão próximos no momento ou estão se dirigindo para determinada região geográfica. Diante disso, os veículos nessa rede podem ser localizados através de sua posição.
- Restrições de mobilidade e previsões - Apesar de apresentarem um alto dinamismo, as VANETs usualmente seguem um certo padrão de mobilidade devido às restrições das estradas, ruas, sinais de trânsito, velocidade limite, condições do tráfego e até mesmo a forma que o motorista dirige. Devido a isto, prever a próxima posição de um veículo é facilitada por esse aspecto.
- Modelo de propagação - Devido à grande variedade de ambientes que as VANETs podem atuar, a comunicação pode ser afetada de diferentes maneiras. Por exemplo, em auto-estrada o modelo de propagação normalmente adotado é o espaço livre, do inglês *free space*, por conter poucos obstáculos que atrapalham a comunicação. Já em um ambiente como as ruas de uma cidade, existem prédios, árvores, outros veículos, dentre outros objetos que podem causar interferência na comunicação, por esse motivo um modelo diferente do espaço livre deve ser adotado.

2.1.4.3 Desafio na concepção de protocolos para VANETs

A concepção de protocolos para VANETs deve observar todas essas características apresentadas na seção anterior. Em particular, o projeto de protocolos para a camada MAC em VANETs é relativamente desafiador devido principalmente às frequentes mudanças na topologia. Nesse contexto, o método de controle de acesso ao meio desta camada é responsável por compartilhar o meio através de vários nós homogêneos e heterogêneos de forma eficiente e confiável. Atender aos diversos requisitos das VANETs requer que tais protocolos superem certos desafios. Em [23] podemos encontrar alguns desses desafios:

- Topologia dinâmica: A alta velocidade em que os veículos se movem faz com que a topologia mude constantemente. Veículos podem se juntar e deixar um grupo a qualquer momento. Por isso, os protocolos MAC devem facilmente se adaptar a essas mudanças de cenário.
- Falta de coordenação central: Nem sempre existe um controle centralizado devido a falta de infraestrutura, com isso, os protocolos da camada MAC devem garantir que o controle

seja distribuído e gerenciado por cada nó. Para garantir de forma adequada a transmissão e a utilização do canal de forma justa com transmissões livres de colisões de pacotes, os nós vizinhos têm que trocar mensagens de controle periodicamente, o que resulta em sobrecarga.

- Suporte a escalabilidade: O protocolo MAC deve ser capaz de transmitir e prover a utilização do canal de forma efetiva durante condições de tráfego denso ou esparso.
- Efeitos do nó exposto e escondido: O problema do terminal exposto e escondido serão abordados nas Seções 2.3.2 e 2.3.3, respectivamente. De forma geral, o problema dos nós expostos aparece quando um veículo não pode transmitir devido a outro veículo próximo tentando transmitir. O problema dos nós escondidos aparece quando dois veículos não estão dentro de um alcance de transmissão um do outro, mas transmitem para um outro nó que está a um salto de distância de ambos.
- Requisitos de qualidade de serviço: Protocolos MAC devem satisfazer os requisitos de qualidade de serviço durante a transmissão e tem um tempo limitado para transmitir mensagens de alta prioridade em aplicações de segurança. Alta prioridade de acesso deve ser dada a mensagens de segurança quando comparadas a outras mensagens.
- Sincronização de tempo e localização: Para que as transmissões sejam sincronizadas os veículos usam o sinal de GPS, apesar que o sinal do GPS pode ser bloqueado ou interrompido com alguns obstáculos comuns em rodovias como túneis, prédios, florestas, entre outros. Surgindo assim a necessidade de um método de localização com acurácia para se determinar o exato posicionamento do veículo [29].
- Operações multicanal: Como a densidade de nós aumenta, o número de colisões aumenta. Para diminuir as colisões, os nós próximos podem transmitir em diferentes canais de forma simultânea. Conseqüentemente, um protocolo MAC deve aderir a uma operação de multicanal dinâmica, que irá fazer os nós trocarem de canais e aumentar a vazão da rede sem um controlador central presente.
- Interferência no canal - Operações adjacentes ao canal traz interferência a VANETs. Isto é resultado do uso paralelo dos canais de controle e serviço, que é feito na tentativa de aumentar a taxa de transmissão e diminuir a perda de pacotes.

2.2 Camada de Controle de acesso ao Meio (MAC)

A camada de Controle de Acesso ao Meio, do inglês *Medium access control (MAC)* é um dos principais objetos de pesquisa para Redes *ad hoc* sem fio. Como em todas as redes que compartilham o meio sem fio, o controle de acesso ao meio é uma técnica importante que permite que a rede opere de forma bem sucedida [30]. Protocolos da camada MAC devem definir de maneira eficiente a forma de compartilhar a largura de banda utilizada pelos elementos da rede e controlar o acesso ao canais sem fio. Uma tarefa importante do protocolo para esta camada, é reduzir colisões entre nós que possam causar interferência, de modo que dois nós não transmitam ao mesmo tempo no mesmo canal. Outra tarefa fundamental desta camada está relacionada ao consumo energético. O processo de comunicação entre nós sensores é o maior fator de consumo energético, e a estratégia utilizada para essa camada deve estar ciente de todos os fatores que possam causar desperdício de energia e tentar evitá-los [31].

2.3 Protocolos da camada MAC para Redes *ad hoc*

Em [32], um protocolo MAC é definido como um conjunto de regras que os nós seguem ao acessar o meio. A concepção de um protocolo MAC deve equilibrar a necessidade de alta taxa de transferência, consumo energético e baixa média de atraso de acesso com justiça entre os diferentes nós dependendo da aplicação.

2.3.1 Restrições e Requisitos

Para conseguir uma utilização eficiente e justa do canal, torna-se essencial a escolha de um bom protocolo de acesso ao meio que utilize algum mecanismo bem elaborado para tal finalidade. Segundo [33], as características essenciais de um protocolo ideal são quando elas permitem que uma estação, que não está atualmente participando de uma comunicação e deseje transmitir um dado, transmita se e só se (i) esta transmissão não atrapalhar qualquer transmissão em curso, e (ii) o nó destino do novo pacote seja capaz de recebê-lo livre de interferências das transmissões em andamento. Seguindo este raciocínio, tal protocolo é ideal para utilizar o meio sem fio, pois proporciona uma comunicação livre de colisões e permite que quaisquer transmissões com potencial para ser bem-sucedidas aconteçam, evitando assim retransmissões. Além dessa importante característica, um aspecto importante que deve ser considerado na concepção de protocolos para redes *ad hoc* é o consumo de energia, tanto do nós individualmente

quanto da rede como um todo [16, 30]. Nas redes sem infraestruturas, como é o caso das redes *ad hoc*, funções como controle de acesso, alocação do canal, localização dos nós, transmissão e recepção são todas executadas nos nós, fazendo com que o consumo energético seja maior nelas e limitando o uso da bateria. Por se tratar de redes que não disponibilizam de um controle central, elas tornam-as mais susceptíveis a colisões e conflitos na atribuição de canais, caso não façam uso de uma estratégia eficiente para evitá-las. Com isso, levar em consideração a conservação de energia é de fundamental importância para o tempo de vida da aplicação.

Mecanismos que visam o consumo energético vem sendo desenvolvidos e utilizados, podendo classificar os protocolos de acordo com eles. Em [2], um levantamento e classificação de protocolos de acordo com tais mecanismos é proposto, estratégias como controle de potência de transmissão, modo de sono, do inglês *sleep mode*), consciência de nível de bateria, entre outras, estão sendo adotadas por protocolos da camada MAC para evitar tais desperdícios, evidenciando a relevância da camada MAC para o bom funcionamento da rede. Assim, ao projetar protocolos MAC eficientes, podemos reduzir o consumo de energia e, naturalmente, aumentar a vida útil das redes. Além disso, nós sem fio podem morrer ao longo do tempo, novos nós podem se juntar, e mais nós podem mudar de posição. Um bom protocolo MAC deve apropriadamente acomodar tais alterações de rede [31].

2.3.1.1 Consumo energético

Para diversas aplicações de redes *ad hoc* o consumo energético é de extrema importância. Como exemplo, podemos citar a utilização de redes de sensores em áreas de difícil acesso, onde a manutenção e troca de fonte energética é igualmente difícil ou até mesmo inviável, necessitando que a fonte de energia dure o maior tempo possível ou o tempo que a aplicação necessitar. Por esse motivo, um eficiente protocolo MAC para redes *ad hoc* pode minimizar o consumo de bateria e aumentar o tempo de vida da rede [16].

Para que o protocolo da camada MAC seja eficiente energeticamente, ele deve ser adaptável às mudanças. Diversas situações podem ocorrer na rede como: as baterias dos nós podem descarregar, novos nós podem se juntar ou sair devido a sua mobilidade, requisitando que o protocolo MAC se adapte às alterações de rede de forma eficiente em termos energéticos, procurando sempre reduzir as potenciais causas de desperdício.

Existem vários fatores que podem causar desperdício energético em protocolos MAC para redes *ad hoc*. Em [31] foram reunidos quatro desses fatores, e em [16] foi acrescentado mais

um, que serão apresentados abaixo:

- *Colisão*: a colisão ocorre quando dois ou mais nós tentam usar o canal ao mesmo tempo. Quando isso ocorre os pacotes de dados que causam a colisão são descartados, surgindo assim a necessidade de retransmissão, o que aumenta o consumo energético e latência.
- *Overhearing*: ocorre quando um nó coleta pacotes de dados que não são destinados a ele, resultando em um significativo desperdício de energia, principalmente quando a densidade dos nós é alta e a carga de tráfego está muito grande.
- *Sobrecarga de pacotes de controle*: existem protocolos que utilizam vários pacotes de controle antes de inicializar a troca de dados entre os nós, e essa grande quantidade pode levar a desperdício de energia dos nós.
- *Escuta ociosa*: do inglês *Idle listening*, é considerada como a principal fonte de ineficiência energética, devido ao sensor necessitar manter seu rádio no modo de recepção em todos os momentos para ouvir o meio de comunicação. Segundo [34], o modo ocioso consome entre 50 e 100% da energia para receber pacotes.
- *Complexidade*: é uma medida da quantidade de energia gasto na execução de algoritmos complexos em protocolos MAC. Ou seja, quanto mais simples o protocolo menos energia será necessária no seu processamento [16].

Para minimizar o consumo de energia durante o modo de escuta ociosa, vários protocolos MAC usam a abordagem de agendar o momento que o nó irá ligar o rádio com ciclo de serviço fixo, do inglês *duty cycle*. Esses protocolos configuram os nós para dormir em períodos de escuta ociosa. Segundo [35], desativar o rádio do nó enquanto os nós estiverem desligados pode reduzir o consumo de energia desnecessário em até 50%. Podemos ver na Figura 8 o consumo de energia do *mote*⁴ MICA2 em diferentes modos do rádio como: transmitir (*transmit*), recebe (*receive*), ocioso (*idle*) e dormir (*sleep*).

⁴<https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2.pdf>

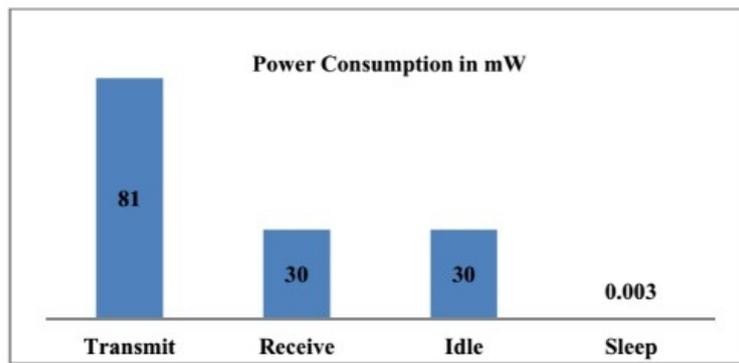


Figura 8: Consumo de energia do MICA2 mote em mW [36]

Dentre os fatores apontados acima como principais causas de consumo energético nos nós, são apresentados em [37, 38] mecanismos para combater estes fatores:

- Redução da Colisão: para reduzir colisões as técnicas comumente utilizadas são CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Colission Avoidance*) [35] e MACA (*Multiple Access Colission Avoidance*) [39]. No CSMA/CA é utilizado o mecanismo de *handshake* RTS/CTS quando dois nós de sensores querem transmitir os dados, eles devem estabelecer uma conexão primeiro com cada um deles por RST (*Request to send*) e CST (*Clear to send*) antes da transmissão dos dados. MACA melhora a técnica CSMA/CA usando o tempo *backoff* arbitrário antes de transmitir os dados, a fim de evitar a colisão.
- Reduzir *Overhearing*: pode ser reduzido utilizando o PAMAS (*Power Aware Multi-Access with Sinalization*) [40] baseado no protocolo MACA, mas usando canais diferentes para transmitir pacotes de controle como o RST/CTS, com isso, quando o dado não é relevante para o nó, ele troca de canal afim de evitar o problema de *overhearing*.
- Redução de *Overhead*: pode ser reduzido por CSMA/ARC (*Adaptive Rate Control*) [41]. O CSMA/ARC é um protocolo MAC que evita usar RTS / CTS completamente para reduzir a sobrecarga, garantindo a equidade entre o tráfego encaminhado e o tráfego gerado. O CSMA/ARC modifica o protocolo CSMA/CA básico omitido a troca RTS/CTS e aplicando um *backoff* que é deslocado de acordo com a periodicidade da aplicação, o que reduz o tempo de *backoff* e as colisões. O CSMA/ARC reduz ainda mais a sobrecarga evitando a utilização explícita de pacotes ACK: um pacote de dados é considerado recebido com êxito quando o nó envia para outro nó o montante.

- Reduzir a escuta ociosa: neste mecanismo um nó sensor é colocado no modo de dormir, tanto quanto possível. Uma abordagem IEEE 802.11 PSM (modo de economia de energia) [15] é usada neste mecanismo. É adotada a abordagem de acordar de vez em quando para receber ou ouvir o canal e se alguém não está enviando os dados que foi para o modo de sono, para salvar a energia.

De forma geral, economizar energia é um critério fundamental no desenvolvimento de protocolos MAC para redes *ad hoc*, a fim de prolongar o tempo de vida da rede.

2.3.2 Problema do terminal escondido

O problema do terminal escondido, do inglês *Hidden Terminal Problem* ou também conhecido como *Hidden Node Problem*, pode ser ilustrado na Figura 9. A área limitada pelo círculo ao redor dos nós representa o alcance de transmissão entre eles. Como é mostrado na Figura 9, o nó B pode se comunicar com ambos os nós A e C, mas A e C não estão no mesmo alcance de transmissão, ou seja, não podem se comunicar um com o outro diretamente. Levando em consideração a abordagem de sensoriamento do meio, caso A inicie ao mesmo tempo que C a transmissão, ocorrerá colisão em B. Neste cenário, A é um terminal escondido para C e vice-versa.

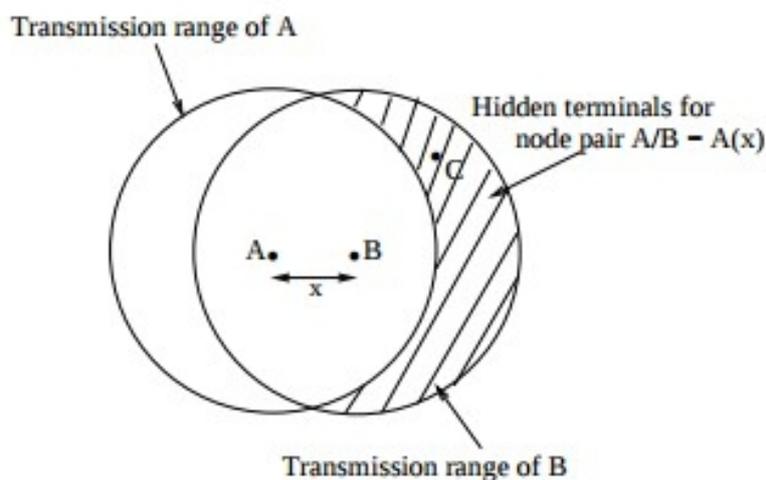


Figura 9: Problema do terminal escondido [42]

O primeiro artigo que descreve o problema do terminal escondido foi escrito em 1975 por [43]. Os autores relatam a existência de terminais ocultos e o quanto eles degradam o desempenho do protocolo CSMA [44]. Além disso, no artigo é introduzida e analisada a técnica conhecida como

modo de acesso múltiplo de tons de ocupado, do inglês *Busy Tone Multiple Access* (BTMA), como uma extensão natural do protocolo CSMA, que tem como objetivo eliminar o problema do terminal oculto. Depois disso, tal problema tem sido apresentado como um importante obstáculo para redes sem fio e conseqüentemente, assim como a citada anteriormente, diversas soluções vêm sendo sugeridas na literatura. Segundo [45], tais soluções podem ser classificadas pelos métodos utilizados para separar e acessar o canal. A classificação sugerida por este artigo é: baseada em contenção pura, baseado em múltiplos canais, baseado em tons de ocupado, consciente da potência - do inglês *power-aware*, e antenas direcionais. Neste artigo é feito um levantamento de todos os principais protocolos descritos na literatura do ano de 1987 até 2011, onde tratar o problema do terminal escondido é o objetivo primário ou secundário de tais protocolos, além de uma análise entre as vantagens e desvantagens de cada abordagem.

De forma geral, terminais escondidos aumentam a necessidade de retransmissão de dados na rede causadas por colisões, com isso, o desempenho da rede tende a decrementar, como por exemplo, a vazão de dados. Para minimizar os efeitos negativos causados por tal problema, um mecanismo de *handshake* através de trocas de mensagens de controle RTS (do inglês, *Request to Send*)/CTS (do inglês, *Clear to Send*) [39]. O handshake com RTS/CTS remove o problema do terminal escondido de forma efetiva, mas outros problemas surgem [46], como o problema do terminal exposto e o problema do nó mascarado.

2.3.3 Problema do terminal exposto

Protocolos que utilizam do método *handshake* com RTS/CTS ou variações desse mecanismo [47], minimizam o número de colisões causados pelo problema do terminal escondido.

Esse mecanismo pode ser ilustrado quando um nó quer enviar um dado para outro, ele primeiro envia uma mensagem RTS para o destino. Em resposta, o receptor envia uma mensagem CTS confirmando a reserva do canal de comunicação entre eles. Assim que o transmissor recebe o CTS, é inicializada a transmissão de dados. O problema do terminal exposto, do inglês *exposed terminal problem* ou *exposed node problem*, ocorre quando um nó que está no mesmo alcance de transmissão (exposto) do transmissor, mas não participando da transmissão em andamento, é impossibilitado de se comunicar com outro nó que está fora do alcance dos nós comunicantes. Tal situação pode ser ilustrada na Figura 10, onde C é um nós exposto entre a transmissão de A e B. Ao enviar um RTS para B, A espera que B responda com um CTS. Supondo que D que está fora do alcance de comunicação entre A e B, e queira transmitir dados

para C. O nós D transmite um RTS para C um pouco antes de A enviar o RTS para B. Depois de receber o RTS de D, C transmite o CTS. Este CTS é escutado por B fazendo com que B entre em um estado de espera, consequentemente o nós B não pode enviar o CTS para A. Mesmo que a comunicação entre A e B não atrapalhe em nada a comunicação entre C e D, por estarem em áreas distintas. O resultado de tal problema também é a diminuição de transmissões com sucesso, visto que A ficará tentando iniciar a comunicação com B, o que significa desperdício de recurso.

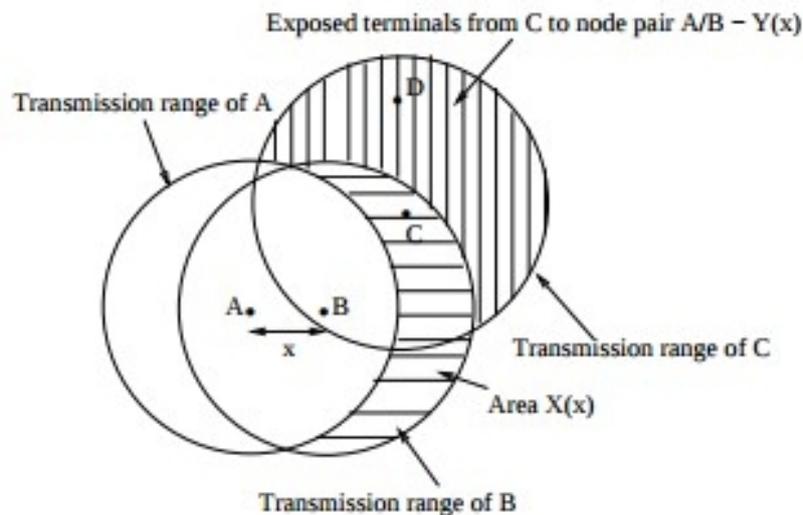


Figura 10: Problema do terminal exposto [42]

Este problema algumas vezes aparece na literatura como problema do falso bloqueio, do inglês *False Blocking Problem* [48, 49], ou também como problema do terminal silenciado, do inglês *Gagged Terminal Problem* [33], onde nós que não interfeririam em transmissões em andamento serem impedidos de transmitir ou receber por estarem no mesmo alcance de um dos nós que estão trocando informação. Em [33] cita algumas das técnicas que tentam mitigar os efeitos deste problema.

2.3.4 Problema do terminal mascarado

Da mesma maneira que o mecanismo de *handshake* com RTS/CTS e suas variações, minimizam o número de colisões causados pelo problema do terminal escondido, e resultam em problemas como o terminal exposto, os terminais previamente silenciados podem vir a interferir com transmissões vizinhas e fazer com que pacotes de dados entrem em colisão. A razão para estas colisões é que um CTS enviado por uma estação nem sempre pode ser ouvido por

todos os seus vizinhos, uma vez que este último já pode ser interferido por uma transmissão em curso na sua vizinhança [33]. Este problema foi identificado pela primeira vez em [50], onde é conhecido como o problema do nó mascarado, do inglês *Masked Node Problem*.

Segundo [33], o problema do nó mascarado só ocorre em topologias com cinco ou mais estações, podendo ser verificada na figura 11. Partindo da situação apresentada neste artigo, podemos supor que o nós D inicia uma transmissão para o nós E. Ocorrendo a troca RTS/CTS de forma bem-sucedida, a transmissão é iniciada e a estação C fica bloqueada pelo RTS por estar no mesmo alcance de transmissão do nós D. Suponha também que durante esta comunicação em andamento, é iniciada uma nova transmissão do nó A para B. A troca RTS/CTS entre A e B é bem sucedida e a transmissão começa. Nesta situação o nó C está silenciado pelo fato de ter ouvido a troca de pacotes de controle entre D e E, ficando assim mascarada para A e B. Assim que a estação D completa a sua transmissão, a estação C fica desbloqueada e podem ocorrer dois tipos de eventos de colisão: (1) a estação C inicia uma transmissão para a estação B ou D, e isto destrói a transmissão em curso de A para B, ou (2) a estação D envia um pacote RTS para iniciar uma transmissão para C, e mesmo responde com o RTS que destrói a transmissão em curso entre A e B. Adicionalmente, apesar da transmissão ter sido interrompida pelo CTS de C, no segundo caso, B não ouviu o CTS de C e, desta forma, as estações vizinhas podem ficar tornar-se mascaradas e dar origem a longas sequências de colisões de dados e pacotes.

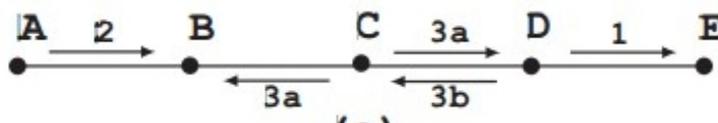


Figura 11: Problema do terminal mascarado [51]

3 Classificação dos protocolos MAC

Muitos protocolos da camada MAC para redes *ad hoc* vem sendo propostos, junto com isso diversas classificações vem sendo apresentadas na literatura. A classificação apresentada por [2] ressalta duas das principais características dos protocolos da camada MAC comumente citadas. Essas características são a forma como esses protocolos realizam o controle de acesso ao meio de transmissão e a forma como é feita a atribuição dos canais aos nós por eles. Segundo este artigo, estas características são fatores chaves para o funcionamento dos protocolos da camada

MAC que são empregados nas redes *ad hoc*.

A primeira característica apresentada deve ser observada para o bom desempenho em muitas aplicações em redes *ad hoc*. A forma como esse acesso é feito traz implicações diretas na confiabilidade na entrega das informações, como exemplo, podemos citar aplicações de tempo real, como VANETs, que possuem a topologia bastante dinâmica e alta mobilidade dos nós, devido a velocidade dos veículos. Isso implica em curto tempo para que ocorra a troca de informação, necessitando assim que o método de acesso ao meio seja feito de forma confiável e eficiente, para que os nós transmitam suas informações de forma garantida, mesmo que a carga de tráfego aumente [23].

A segunda característica está diretamente relacionada com a forma que os nós enxergam o meio de transmissão disponível. Muitas abordagens anteriores assumem um canal comum para todos os nós que participam da rede, enquanto outras abordagens mais recentes utilizam múltiplos canais para a troca de informação e controle. A primeira abordagem é conhecida como monocanal, do inglês *single channel*, já a segunda é conhecida como multicanal, do inglês *multi channel*, esta última apresenta uma utilização mais eficiente da rede, pelo fato de que problemas como interferência, *jamming* e congestionamento serem tratados [11].

3.1 Acesso ao meio

Nesta seção será feita uma classificação de acordo com as categorizações tradicionais encontradas na literatura relacionadas com o mecanismo de acesso do canal.

3.1.1 Baseados em contenção

O mecanismo de acesso ao meio baseado em contenção permite que muitos nós da rede possam usar o mesmo canal sem a necessidade de uma pré-coordenação entre eles. Com isso, os requisitos de sincronização de tempo são relaxados, podendo assim facilmente ajustar-se às alterações de topologia [31]. Na tentativa de atenuar a quantidade de colisões, os protocolos que utilizam de tal mecanismo sentem o meio compartilhado antes de iniciar uma transmissão, para verificar se alguém mais está transmitindo. Caso o meio esteja livre, ele transmite, caso contrário espera um período de *back-off* aleatório antes de tentar transmitir novamente. Esta verificação é conhecida como *carrier sense*. Apesar da utilização desta estratégia, ainda existe a possibilidade de dois nós perceberem o meio como livre e como consequência tentarem transmitir os dados ao mesmo tempo, resultando assim em colisão.

3.1.1.1 Síncronos

S-MAC (2002) - O protocolo *Sensor-MAC* [35] é um protocolo baseado em contenção que depende da sincronização agendada de períodos de suspensão e atividade. O período de suspensão, conhecido do inglês como *sleep mode* é o estado em que os nós desligam o transceptor e reduzem seu processamento ou o mínimo possível; já o período de atividade, do inglês *awake*, é quando o nó está escutando o canal e pode transmitir. O S-MAC utiliza o esquema CSMA/CA para sentir o meio, com isso ele executa ciclos periódicos de dormir e acordar, conhecido como *duty cycles*, a fim de reduzir o *idle listening*. A ideia principal de S-MAC é que todos os nós durmam e acordem quando necessário para que eles possam conservar a energia.

T-MAC (2003) - O *Timeout-MAC* [52] elimina a desvantagem dos protocolos S-MAC propondo a operação do ciclo de trabalho de forma adaptativa. No protocolo T-MAC, um nó sensor verifica o canal durante certo tempo, mas passa para o modo de suspensão quando não há movimento no canal nesse instante de tempo específico.

No T-MAC, os nós comunicam-se uns com os outros utilizando mensagens de controle para iniciar a transmissão como *Request to Send* (RTS) e *Clear To Send* (CTS). Depois da troca de dados é enviado um *Acknowledge* (Ack) para que o receptor confirme ao transmissor que a transmissão ocorreu com sucesso. Neste esquema, o nó irá ouvir e transferir apenas quando estiver em período ativo.

SCP-MAC (2004) - O *Schedule Channel Polling MAC* [30] tem como objetivo principal diminuir o consumo de energia por técnica de agendamento e *polling* de canais. O SCP-MAC segue os métodos de *polling* do canal a partir da abordagem de escuta de baixa potência, do inglês *low power listening* (LPL). Em SCP-MAC, o LPL sincroniza o tempo de *polling* (agendamento) de todos os seus nós vizinhos. Em SCP-MAC a sincronização pode ser feita da seguinte forma: (i) através de uma fase de sincronização inicial e (ii) através de trocas oportunas de pacotes de sincronização. No SCP-MAC, o *polling* de canal adaptativo melhora o protocolo adicionando *slots* para aumentar a vazão. Quando o nó tenta juntar-se à rede, em primeiro lugar ele tem de descobrir o horário agendado de despertar dessa rede. Usando o ciclo de serviço de escuta de baixa potência, envia uma mensagem de preâmbulo que é suficientemente longa para sincronizar o cronograma de despertar do nó. Em SCP-MAC, o *polling* de canal adaptativo melhora o protocolo adicionando *slots* para aumentar a vazão.

DW-MAC (2008) - O protocolo *Demand-Wakeup MAC* [53] introduz um novo algoritmo de agendamento de baixo *overhead* que permite que os nós acordem sob demanda durante o

período de sono (*sleep mode*) de um ciclo operacional para transmitir ou receber um pacote. Esta solicitação de alerta aumenta de forma adaptativa a capacidade de canal efetiva durante um ciclo operacional à medida que a carga de tráfego aumenta, permitindo que o DW-MAC obtenha baixa latência de entrega sob uma ampla faixa de cargas de tráfego incluindo tráfego *unicast* e *broadcast*.

No DW-MAC, o controle de acesso ao meio e o agendamento é completamente integrado. Ele substitui os pacotes RTS/CTS por um quadro especial chamado quadro de programação (*scheduling frame* (SCH)). Desta forma, o DW-MAC minimiza a sobrecarga de pacotes de controle. Como em um RTS, um SCH contém o endereço de destino, então este SCH acorda apenas o receptor pretendido, minimizando o consumo de energia devido a despertares desnecessários.

Além dos campos incluídos em um pacote RTS/CTS, como endereços de remetente e receptor, e duração da transmissão, um SCH também inclui algumas informações de camadas cruzadas (*cross-layer*). O SCH também inclui o endereço da camada de rede da sua fonte e o seu número de sequência. Esta informação ajuda um nó a decidir se o pacote de difusão de entrada foi recebido antes ou não, para evitar despertar para receber cópias do mesmo pacote várias vezes.

D-MAC (2004) - O D-MAC [54] é um protocolo MAC síncrono que atinge baixa latência, mas sem comprometer a energia. Nos *slots* D-MAC atribuídos para transferir e receber os dados para os conjuntos de nós que estão próximos uns dos outros e nessa base é feita uma árvore de recolha de dados que é mostrada na Figura 12, de modo que durante o período de recepção de um nó, todos os nós filhos devem ter períodos de transmissão. A transmissão de dados na árvore é unidirecional, isto é, do nó filho para o nó pai. A transmissão de dados é dividida em duas partes, isto é, enviar e receber. O D-MAC é projetado para um único canal, não suportando assim abordagens multi-canal.

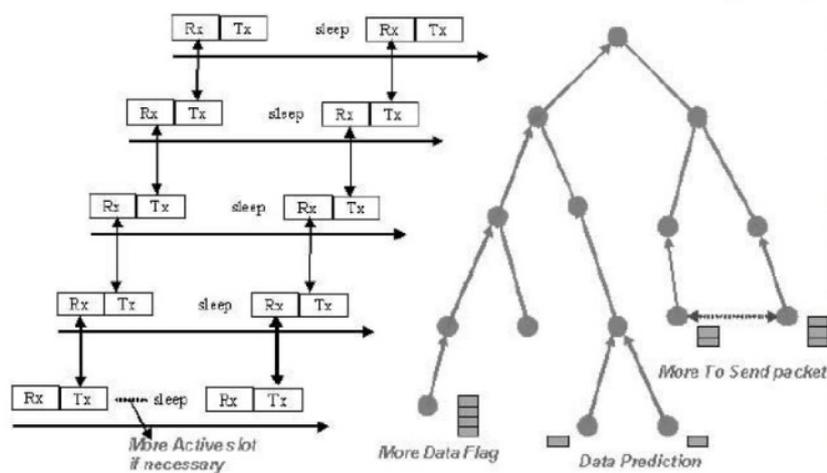


Figura 12: Árvore de coleta de dados do protocolo D-MAC [54]

3.1.1.2 Assíncronos

WISE MAC (2004) - *Wise-MAC* [55] é outro protocolo assíncrono que baseia-se na técnica de amostragem do preâmbulo [56]. Esta técnica consiste em amostrar regularmente o meio para verificar a existência de atividade. Por amostrar o meio, entende-se em escutar o canal de rádio por um curto intervalo de tempo. Além disso, este protocolo é baseado em protocolo CSMA não persistente.

A ideia inovadora introduzida pelo Wise-MAC consiste em deixar o nó aprender o cronograma de amostragem de todos os nós. Conhecendo a programação de amostragem do destino, o nó inicia a transmissão apenas no momento certo, evitando assim ficar acordado desnecessariamente. A desvantagem desse protocolo é ter que armazenar o tempo de escuta do canal de nós vizinhos, que consome o valioso espaço de armazenamento de cada nó e leva a aumentar a complexidade da implementação do protocolo [37].

X-MAC (2006) - O protocolo X-MAC [57] tem como principal objetivo economizar energia, diminuir *overhead*, alta vazão e baixa latência de dados. Os protocolos assíncronos não possuem informação de agendamento comparado com os protocolos síncronos e eles têm que ficar acordados ouvindo o meio exceto quando estão recebendo ou transmitindo o dado, devido a essa razão, o período de acordado deve ser um período curto de tempo. Como a duração de acordado é curta, o protocolo X-MAC assíncrono tem que acordar mais frequentemente enquanto mantém um curto ciclo de trabalho.

O X-MAC conseguiu reduzir a latência e aumentar a vazão utilizando uma sequência de pacotes de preâmbulo curtos em vez de um preâmbulo longo. Este pacote de preâmbulo curto

carrega o endereço do nó de destino depois de escutá-lo, o nó não destino deve ir para o modo de *sleep* imediatamente assim que ouvirem o primeiro bit do preâmbulo curto [37].

PW-MAC (2011) - No protocolo *Predictive-Wakeup MAC* [58], um nó sensor transmissor acorda e liga o seu canal de rádio imediatamente antes do receptor acordar. PW-MAC usa mecanismo de transmissão baseado em previsão usando *pseudo-random wakeup-schedule*. PW-MAC usa a abordagem da transmissão sendo iniciada pelo receptor, com isso diminui o esforço do *duty cycle* para ambos os receptores e também para os transmissores. Além disso, o PW-MAC introduz mecanismos de correção de erro de previsão a fim de evitar que o emissor perca o tempo que os receptores despertam devido a fatores tais como a defasagem de sincronismo de relógio.

RI-MAC (2008) - No protocolo *Receiver Initiated MAC* [59] a comunicação é iniciada pelo nó receptor de dados. Neste protocolo, cada nó periodicamente acorda com base em sua própria agenda para verificar se há quaisquer quadros de dados destinados a ele. Depois de ligar o seu rádio, se o meio está ocioso, o nó transmite imediatamente um *beacon*, anunciando que está acordado e pronto para receber dados. Um nó com dados pendentes para enviar, nó S na Figura 13, permanece ativo enquanto aguarda o *beacon* de resposta do receptor R. Ao receber o *beacon* de R, o nó S inicia imediatamente a sua transmissão de dados, a qual será reconhecida por R com outro *beacon*. Observe que a função deste *beacon* ACK são duas: primeiro, ele reconhece a recepção correta do quadro de dados enviado e, em segundo lugar, ele convida para uma nova transmissão de quadro de dados para o mesmo receptor. Se não houver dados de entrada após a emissão de um *beacon*, o nó irá dormir, como S faz mais tarde na Figura 13.

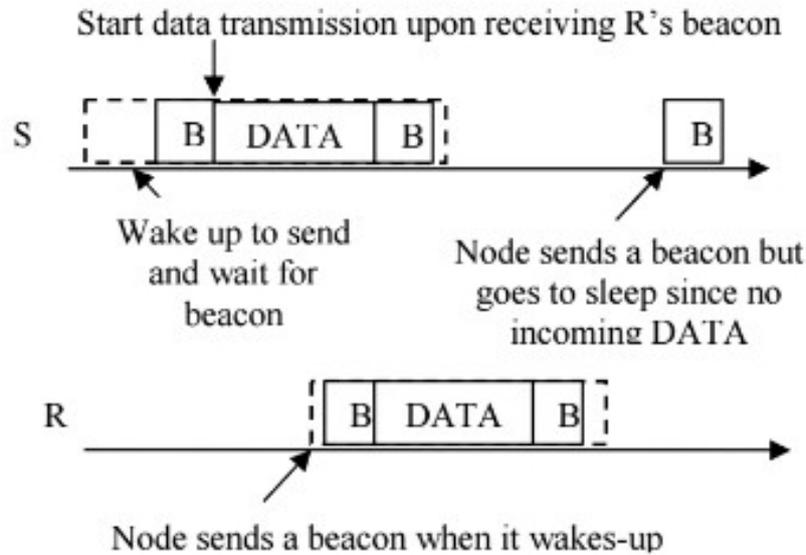


Figura 13: Agendamento de transmissão RI-MAC [59]

MPCD-MAC (2010) - O protocolo *Multi-channel power-controlled directional MAC* [60] foi projetado para redes de malha sem fio, onde os nós usam múltiplos canais, antenas direcionais e controle de potência. Sua principal característica inovadora é que a transmissão dos pacotes RTS e CTS ocorre em todas as direções com a máxima potência de transmissão em um canal de controle separado, enquanto que os pacotes de dados e ACK são transmitidos apenas direcionalmente em um canal de dados disponível com a potência mínima requerida. Além disso, uma nova ligação é estabelecida entre dois nós apenas se a interferência produzida através de ligações já ativas é suficientemente baixa para permitir transmissões simultâneas.

3.1.2 Livres de contenção

Os mecanismos de acesso ao meio livres de contenção baseiam-se em requisitos de sincronização de horário estritos. Eles agendam períodos de escuta e transmissão, evitando colisões, *overhearing* e *idle listening*.

BMA-MAC (2004) - O principal objetivo do protocolo *Bit-Map-Assisted MAC* [61] é reduzir o gasto energético devido ao *idle listening* e colisões enquanto mantém uma baixa latência. As operações neste protocolo são divididas em *rounds*. Onde cada *round* consiste na fase de configuração e fase de estado estacionário. A Figura 14 representa um *round* simples completo.

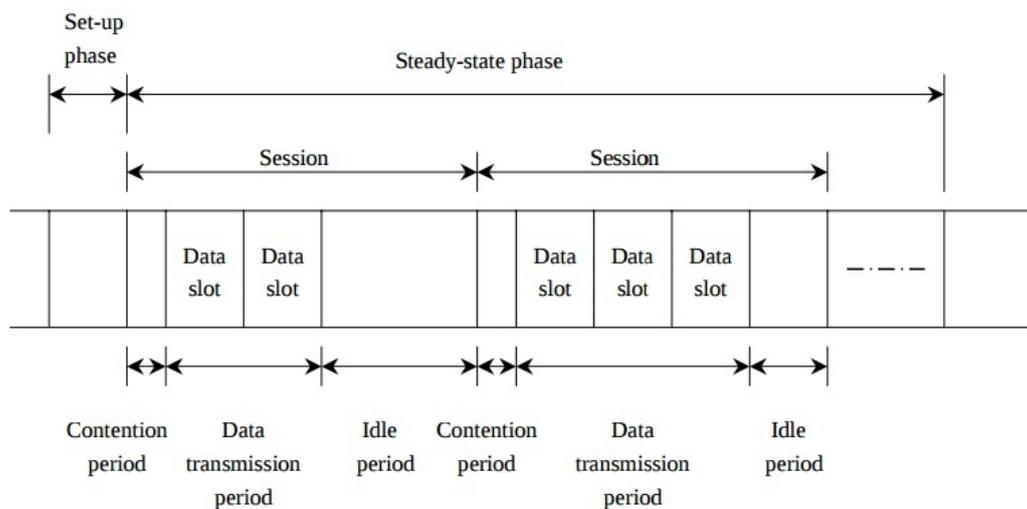


Figura 14: *Round* simples no BMA MAC [61]

Assume-se um algoritmo de formação de *cluster*. Durante a fase de configuração, cada nó deve decidir se pode se tornar um *cluster head* com base em seu nível de energia. Os *clusters heads* eleitos transmitem uma mensagem de *broadcast* para todos os outros nós afirmando ser os novos *cluster head* usando o CSMA não persistente. Uma vez que os *clusters* são formados, o sistema entra na fase de estado estacionário. Já na fase de estado estacionário é dividida em k sessões. A duração de cada sessão é fixa. Cada sessão consiste em um período de contenção, um período de transmissão de dados e um período de inatividade.

PMAC (2005) - O *Pattern MAC* [62] é um protocolo de "tempo fixo" como SMAC [35]. No SMAC, um nó pode permanecer acordado por uma determinada duração de um *time slot* e dormir no tempo restante. Enquanto que no PMAC, um nó pode estar acordado ou adormecido durante um *time slot*.

TRAMA (1994) - O protocolo *Tree-search RAMA* [63] é um protocolo baseado no protocolo RAMA [64], onde é essencialmente um protocolo de atribuição por demanda. O TRAMA usa um leilão determinístico para identificar quais assinantes estão buscando acesso aos recursos de comunicação. O leilão ocorre em um canal de controle dedicado, que pode ser um canal de frequência dedicado ou talvez apenas *time slots* específicos em um canal de frequência particular. Ele é baseado em um algoritmo de busca em árvore que pesquisa eficientemente os ID'S de assinantes participantes do leilão. Os recursos de comunicação são atribuídos a um ou mais vencedores de cada leilão.

TRAMA oferece o potencial para um maior número de atribuições por segundo, e como

RAMA, é um algoritmo determinístico com operação livre de colisão (barrando erros devido ao desvanecimento e ruído).

3.1.3 Híbridos

Para conseguir uma melhoria conjunta, os protocolos MAC híbridos combinam os pontos fortes de dois ou mais esquemas MAC diferentes. Geralmente, os protocolos MAC híbridos combinam um esquema sincronizado com um esquema assíncrono a fim de melhorar o desempenho quando a carga de tráfego aumenta. Embora os protocolos híbridos combinem as vantagens de múltiplos esquemas, eles também podem carregar problemas de complexidade na manutenção de dois ou mais modos de trabalho diferentes. [65]

Z-MAC (2008) - O protocolo Z-MAC [66] possui uma fase de configuração na qual executa as seguintes operações em sequência: descoberta de vizinho, atribuição de *slots*, troca de quadros local e sincronização de tempo global. Estas operações são executadas apenas uma vez durante a fase de configuração e não funcionam até que ocorra uma alteração significativa na topologia da rede (tal como o deslocamento físico de sensores). A ideia é que os custos iniciais para a execução dessas operações sejam compensadas pela melhora no rendimento e na eficiência energética durante a transmissão de dados.

O Z-MAC foi projetado para redes de sensores, onde ele pode ajustar seu comportamento dinamicamente entre CSMA e TDMA dependendo do nível de contenção na rede. O protocolo usa o conhecimento de topologia e sincronização de relógio como dicas para melhorar o desempenho do MAC sob alta contenção. Sob baixa contenção e quando essas dicas não são confiáveis, o protocolo comporta-se como CSMA. Z-MAC é útil para aplicações em que as taxas de dados esperadas e contenção de dois saltos são médias a altas.

IEEE 802.15.4 (2003) - O protocolo [67] possui basicamente dois modos de operação: *beacon* habilitado e *beacon* não habilitado. No modo *beacon* habilitado, o protocolo é essencialmente um protocolo CSMA-CA simples.

No modo *beacon* habilitado, o IEEE 802.15.4 usa uma estrutura de *super-frame*. Um *super-frame* começa com um quadro de *beacon* enviado periodicamente pelo coordenador em um intervalo de tempo que varia de 15 ms a 245 segundos [?]. Existem intervalos de atividade e inatividade no *super-frame*. Os dispositivos se comunicam apenas no período de ativo e entram em modo de baixa potência durante o período de inatividade.

A porção ativa de cada *super-frame* é dividida em 16 *time slots* iguais que consistem em três

partes: o *beacon*, o período de acesso a contenção (*Contention Access Period* - CAP) e o período livre de contenção (*Collision Free Period* - CFP) (que está presente apenas se o *guaranteed time slots* (GTS) for alocado pelo coordenador da PAN para algum dos dispositivos). Cada GTS consiste em algum múltiplo inteiro do CFP e até 7 são permitidos.

3.2 Separação do canal

Nesta seção será feita uma classificação de acordo com o mecanismo de separação do canal. Na Seção 3.2.2 a classificação será baseada na forma com que os protocolos separam os canais. Para cada estratégia de separação será descrita de acordo com protocolos em particular.

3.2.1 Monocanal

Considerar o meio como um canal simples, foi a mais proeminente abordagem nos anos anteriores no projeto de protocolos para a camada MAC. Primeiramente por conta dos mecanismos de separação do canal não haviam sido desenvolvidos. Em um protocolo MAC que possui um canal comum, todos os nós na rede compartilham o meio para transmitir informações de controle e trocar dados. Colisões são um dos atributos inerentes de tais protocolos. Quando dois ou mais nós transmitem simultaneamente a transmissão, ela irá falhar, e um mecanismo de *backoff*⁵ é necessário para ambos os nós.

CSMA - O *Carrir Sense Multiple Access* (CSMA) [44] foi o primeiro protocolo monocanal para a camada MAC proposto. No CSMA os nós percebem o canal comum antes de começar uma transmissão. Se o canal estiver livre, ele inicializa a transmissão. Caso o canal não esteja livre, é setado um tempo randômico (*backoff*) antes de tentar transmitir novamente. CSMA não aborda o tratamento de colisões no canal [2].

CSMA/CD - Um melhoramento do CSMA é o CSMA/CD [68] (CSMA com detecção de colisão). Em CSMA/CD, se duas ou mais transmissões colidirem, o nós transmissores serão notificados e cada um irá escolher um tempo randômico antes de retransmitir. Se um nó detecta uma colisão pela segunda vez, seu *back off* terá duas vezes o tempo do anterior. Este mecanismo é conhecido como *Binary Exponential Backoff* (BEB) [69]. O desempenho dos protocolos CDMA degradam rapidamente com alta carga na rede, devido ao aumento de colisões e o aumento da latência das transmissões [2].

Quando aplicado o CSMA em redes onde nós não estão no alcance dos outros, dois ou mais

⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Exponential_backoff

nós podem ter um vizinho comum enquanto eles estão fora dos seus alcances. Se ambos os nós sentem o canal e tentam transmitir para esse vizinho em comum, então a colisão ocorre, resultado do problema do terminal escondido discutido na Seção 2.3.2.

MACA - O protocolo MACA (*Multiple Access with Collision Avoidance*) [39] foi proposto para redes de pacotes de radio como uma melhoria sobre o CSMA para eliminar o problema do terminal escondido [2]. Este protocolo introduziu a abordagem de utilizar dois pacotes de controle antes de inicializar a transmissão. Quando um nó quer transmitir dados para outro, ele primeiro envia um pacote chamado RTS (*Request to Send*) para o nó destino, com isso os nós na vizinhança do transmissor são notificados de que uma transmissão está vindo através desta mensagem. Esta mensagem contém informações da duração do tempo planejado da transmissão, assim os nós vizinhos ao transmissor não iniciarão qualquer transmissão. Logo após receber o RTS, o receptor responde com outra chamada CTS (*Clear to Send*) indicando que está pronto para recepção. Nós que estão na vizinhança do receptor também serão notificados sobre a transmissão através desta mensagem, que também contém informações sobre a transmissão que está por vir, assim os vizinhos do receptor deverão se comportar da mesma maneira que os vizinhos do transmissor. Uma vez que o *handshake* está completo, a transmissão procede sem nenhum risco de colisão entre pacotes de dados. Mesmo assim, há a possibilidade de existir colisão entre duas mensagens RTS, apesar da probabilidade ser menor devido ao tamanho dos pacotes de controle serem menores que os pacotes de dados. Se ocorrer a colisão então ambos nós entram em *backoff* por algum tempo. Por reduzir a possibilidade de colisão e eliminar o problema do terminal escondido da transmissão de dados, MACA oferece uma melhora sobre o CSMA.

Uma das grandes desvantagens do protocolo MACA é a falta de confirmação de fim da transmissão de dados com sucesso na camada MAC. Caso exista a necessidade de retransmissão resultado da transmissão sem sucesso, ela deverá ser executada na camada de transporte, o que aumenta o atraso da transmissão.

MACAW - MACA *Wireless* é um protocolo baseado no MACA. Cujas modificações são na utilização de quatro pacotes de controle antes de iniciar a transmissão, a fim de contornar a falta de confiabilidade do meio sem fio. Além dos pacotes de RTS e CTS utilizados no MACA, é adicionado o pacote de *Data Sending* (DS) que é usado para informar que a troca de RTS e CTS foi realizada com sucesso e o tamanho do pacote de dados que subsequente [45], e também o pacote de *Acknowledgment* (ACK) que é enviado pelo receptor a fim de confirmar a recepção

bem sucedida dos dados, oferecendo uma entrega garantida o que é crucial na rede sem fio.

MACA-BI - O MACA *By invitation* [47] é outro mecanismo que se baseia no MACA, mas tem uma abordagem diferente onde o receptor inicializa a comunicação. Ao invés de utilizar os tradicionais RTS/CTS o receptor inicializa a comunicação através de uma mensagem de *broadcasting* com a indicação de prontidão dele para receber chamada RTR (*Ready to Receive*). Os vizinhos que escutam o RTR que possuem dados para enviar, podem então enviar o dado para o nó que enviou o RTR ou outro nó o qual ele tenha dado para enviar.

FAMA - O grupo de protocolos *Floor Acquisition Multiple Access* (FAMA) [70] utilizam da abordagem de inicialização de transmissão pelo receptor assim como o MACA-BI. Estão inclusos nesta categoria o FAMA-NCS (FAMA *with Non-persistent Packet Sensing*) e o FAMA-NPS (FAMA *with Non-persistent Packet Sensing*). Além de o transmissor iniciar a transmissão, o protocolo precisa obter o controle do meio antes do início da transmissão, através de mecanismos como o *carrier sense* (como no CSMA) pelo FAMA-NCS, e *packet sense* (como o MACA) pelo FAMA-NPS, a fim de evitar colisões de pacotes de controle apresentando assim uma melhora em relação ao MACAW.

RIMA-SP - O protocolo *Receiver Initiated Multiple Access with Simple Polling* (RIMA-SP)[71] também é uma abordagem onde o receptor inicia a comunicação. Este protocolo possui uma melhora comparado com o MACA-BI por permitir que vizinhos enviem apenas para o nó desejado. Evitando assim colisões de dados entre nós vizinhos, causados pelo problema do terminal oculto. RIMA-SP também permite que ambos os nós enviem dados depois do *handshake* é finalizado, o que aumenta a vazão da rede.

MARCH - O protocolo *Multiple Access with Reduced Handshake* [72] utiliza o RTS e CTS, mas de forma a tenta reduzir a sinalização de controle. Como citado em [2], podemos representar a forma com que esta redução é alcançada através da Figura 15. Supondo que o nós A tem um dado para enviar para o nós Z, mas através da limitação da distância o caminho que será utilizado é A, B, C, D e Z. A envia RTS_a para o próximo salto que é B. Enquanto B responde para A com o CTS_b, C escuta tal mensagem. C agora sabe que B irá enviar esse dado de A, então ele irá responder com CTS_c para B. O mesmo processo é repetido até o nós D e Z. Desta forma, apenas um RTS é necessário no primeiro salto do caminho, enquanto apenas um CTS é necessário para todo subsequente salto.

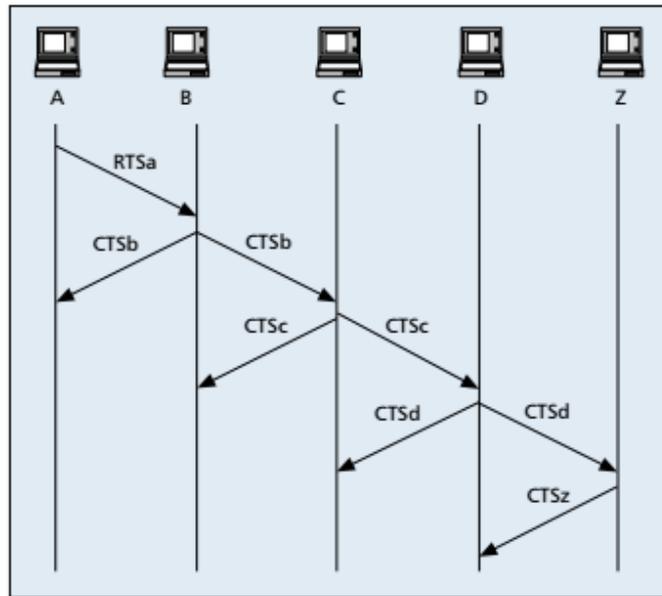


Figura 15: Troca de pacotes de controle reduzidos em MARCH [2]

DPC/ALP (2002)- *Distributed Power Control with Active Link Protection/Adaptive Probing* [73] também utiliza os pacotes de controle RTS/CTS. Neste protocolo, o transmissor envia o pacote RTS em um nível de potência que parece ruído, e mantém um aumento de potência progressivo até que o receptor responda com o CTS. Se a potência que está sendo utilizada aumentar até ultrapassar um determinado limiar e não houver resposta do receptor, o transmissor entra em *backoff* para tentar novamente depois. Desta forma, a interferência é mínima em outras transmissões em andamento, desde que o sinal mal exceda a potencia do ruído [2].

PS-DCC (1999)- *Power Save with Distributed Contention Control* [74] é projetado com um mecanismo probabilístico de *backoff* para cada canal em redes IEEE 802.11 [75]. Nesta abordagem os nós medem constantemente a utilização do canal e calculam de forma adaptativa a capacidade de envio baseada na carga de rede atual, desta forma o nós irá dormir. Oferecendo um melhor desempenho do que um esquema de *backoff* estático, garantindo um consumo energético ideal para protocolos da camada MAC de acesso randômico.

3.2.2 Multicanal

Abordagem mais recentes dividem meio de transmissão em múltiplos canais fazendo o uso do meio de forma mais eficiente a fim de reduzir o números de colisões na rede, resultando em um aumento na vazão de dados e diminuição do atraso de transmissão [45]. Além disso, geralmente permitem que a rede suporte o número de nós maior que a abordagem monocanal

[2].

3.2.2.1 Separação generalizada

Alguns protocolos para redes *ad hoc* apresentados na literatura funcionam separando o canal de controle e o canal de dados, atribuindo um canal para controle e um ou mais para dados. Mas alguns desses protocolos descrevem um esquema de separação de canal de forma generalizada, onde eles se baseiam em um esquema de acesso de múltiplos canais, mas não especificado a forma como é separado o canal [2].

BTMA (1975)- O protocolo *Busy Tone Multiple Access* [43] usa a abordagem em que um canal é separado para controle e é utilizado tons de ocupado, do inglês *Busy Tone*, para resolver o problema do terminal escondido apresentado no CSMA. O BTMA foi projetado para redes infraestruturadas, e quando estação base sente um canal de dados ocupado, ela coloca uma onda senoidal no canal de tom ocupado para impedir que qualquer nó possa transmitir.

RI-BTMA (1987) - O protocolo *Receiver-Initiated Busy Tone Multiple Access* [76] divide a banda total em dois canais, onde um é para dados e outro para transmissão do sinal de tom ocupado. Basicamente o protocolo funciona da seguinte forma, quando um nó deseja enviar dados para outro nó, ele envia um preâmbulo no canal de dados com a indicação do destino. O preâmbulo pode ser enviado apenas se o canal de tom de ocupado estiver ocioso. Quando o receptor recebe o preâmbulo com sucesso, ele envia o um sinal de tom ocupado no canal destinado a isto, indicando que o preâmbulo foi recebido com sucesso e o canal de dados está reservado para troca de dados. O transmissor envia seu dados enquanto o canal de tom de ocupado está sendo mantido ocupado pelo destinatário e os outros nós estão aguardando o fim da transmissão.

DBTMA (1988) - O protocolo *Dual Busy Tone Multiple Access* [77] foi baseado em dois protocolos: o BTMA [43] e o RI-BTMA [76]. O protocolo DBTMA divide o canal em dois sub-canais onde um é para dado e outro para controle. No canal de controle são enviados o RTS e o CTS, como a adição de dois novos sinais de controle: o BTr (*Receive-Busy Tone*) e o BTt (*Transmit-Busy Tone*). Ambos são dois sinais com diferentes frequências com apropriada separação espectral [45]. De forma resumida, podemos descrever o funcionamento do protocolo da seguinte maneira: quando um nós quer enviar dados para um nós destino, ele enviar o RTS pelo canal de controle, o envio do RTS apenas é possível se o nó não ouvir o sinal BTr no canal. Além de enviar o RTS, o nós transmissor aciona o sensoramento do sinal BTr. Assim que o

sinal RTS é recebido pelo receptor, ele aciona o sinal de BTr e envia o CTS. Por consequência, quando transmissor recebe o CTS, ele aciona o sinal BTt pelo tempo de duração do dado e envia o dado para o transmissor.

O autor mostra que a utilização da rede neste protocolo é duas vezes maior que as abordagens tradicionais que utilizam RTS/CTS. A sua principal desvantagem é que não possui mensagens de ACKs e não é retrocompatível com o padrão IEEE 802.11 [75]. Além de necessitar de transceptores adicionais.

PAMAS (1998) - *Power Aware Multiple Access with Signaling* [40] é um protocolo que combina o MACA [39] com a ideia de ter um canal separado de controle e de dados. No canal de controle ocorre a troca de RTS/CTS e no outro para dados. Quando o receptor recebe o RTS, ele deve manter ativo o sinal de tom ocupado, para que os outros nós saibam o período em que devem deixar seus transceptores desligados, ou seja, entrar no *sleep mode* pela duração da transmissão, assim reduz a probabilidade de colisão e reduz o consumo energético.

DCA-PC (2001) - *Dynamic Channel Assignment with Power Control* [78] é outro protocolo de separação de canal generalizado que tem um canal de controle e outro N canais de dados. No DCA-PC quando o transmissor tem dados para enviar ele checa se algum canal de dado está livre, se estiver ele então escolhe um dos canais disponíveis e envia o sinal RTS para o destino no canal comum de controle com a potencia máxima. Se o destino concorda com a escolha do canal do transmissor, ele responde com o CTS em um nível de potência apropriado para alcançar o transmissor, e o transmissor consequentemente reservar o canal. Se o receptor tem um conflito com a escolha do canal pelo transmissor, o destino envia uma lista de canais livres para o transmissor para que o mesmo possa escolher o canal mais apropriado.

Grid-B (2002) - *Grid with Channel Borrowing* [79] propõe inicializar a atribuição de canais de dados para cada célula em uma determinada área geográfica. Neste protocolo, células altamente carregadas pegam emprestado canais de células vizinhas que não estão sobrecarregadas, caso eles precisem. Negociação pra empréstimos de canais ocorrem em um canal comum. GRID-B propõe o uso de *Code Division Multiple Access* (CDMA) ou *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) para alocação do canal. No caso do CDMA, a largura de banda do canal é fixa e, portanto, o aumento do número de canais até um certo limite é benéfico. Em FDMA, a largura de banda total é fixa, e, portanto, ter usuários adicionais reduz a largura de banda por usuário.

3.2.2.2 Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo

Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo, do inglês *Time Division Multiple Access* (TDMA), é uma abordagem que segmenta o meio fatiando ele em diversos quadros (*frames*) de tamanho fixo que são subdivididos em *slots*. Para garantir que os nós mantenham controle dos quadros e *slots*, os protocolos TDMA devem manter algum tipo de sincronização entre os nós da rede. Nesses protocolos, apenas uma estação pode transmitir durante um *time slot* particular.

FPRP (1998) - O protocolo *Five Phase Reservation Protocol* [80] foi o primeiro TDMA proposto para redes *ad hoc*, em que cada *slot* é dividido em *slot* de informação e *slot* de reserva. O transmissor que quer reservar um *slot* de informação deve disputar por isso durante seu *slot* de reserva. O *slot* de reserva consiste de cinco fases que resolvem conflitos entre todos os nós que estão também disputando pelo *slot* de informação em um raio de dois saltos. O nó que reserva um *slot* de informação pode transmitir com uma baixa chance de colisão durante tal *slot*. No FPRP, nós mantêm uma perfeita sincronização através do GPS.

Markowski (1999) - Em [81] é proposto um protocolo de divisão de janela baseado em TDMA. Este protocolo classifica nós de acordo com sua classe de tráfego: *Hard Real Time* (HRT), *Soft Real Time* (SRT), e *Non Real Time* (NRT). Cada classe de nó pode antecipar nós que são de classes menores. Além disso, nós são apenas permitidos transmitir no começo do *slot*, enquanto todos os nós mantêm perfeita sincronização. Dentro de cada classe, colisões são resolvidas através de um mecanismo de divisão de janela. Se a colisão ocorre para dois nós da mesma classe, então a metade dos nós de tal classe são colocados em uma janela ativa para o *slot* atual, enquanto a outra metade é colocada em uma janela inativa. Nós em uma janela ativa disputam pelo próximo *slot*. Se a colisão ocorrer novamente, a janela ativa é dividida em uma janela ativa e inativa. Não há nenhuma especificação de como lidar com a sincronização neste protocolo, nem há qualquer referência ao problema do nó oculto.

SRMA/PA (2000) - O protocolo *Soft Reservation Multiple Access with Priority Assignment* [82] também se assemelha ao FPRP [80], compartilhando a mesma noção de ter vários *mini-slots* para reservar um *slot* de dados. A diferença é que ele classifica os nós em alta-prioridade e baixa-prioridade, onde nós de alta-prioridade podem roubar *slots* reservados por nós de baixa-prioridade. Em aplicações que um tipo de dados tem prioridades sobre outro, a utilização dessa abordagem é ideal.

ADAPT (1999) - *A Dynamically Adaptive Protocol for Transmission* [83] propõe atribuir *slots* para os nós a fim de lidar com alta carga e alta densidade da rede. Ele também sugere usar

contenção para a fim de fazer um melhor uso dos *slots* não utilizados. Cada nó ativo possui seu próprio *slot*, cuja prioridade para o envio do RTS é sua em seu *slot*, enquanto outros nós ouvem a transmissão do proprietário. Se o proprietário não envia um RTS durante seu próprio *slot*, outro nó irá disputar por este *slot* enviando seu próprio RTS. Neste ponto, o nós que recebem a mensagem CTS podem usar este *slot* apenas no quadro atual.

D-PRMA (2002) - Em *Distributed Packet Reservation Multiple Access* [84], que é uma adaptação do PRMA, os nós são definidos como terminal de voz ou dados. Apenas terminais de voz podem reservar o mesmo *slot* por quadros subsequentes. Isso se assemelha a propriedade de possuir *slot* no ADAPT, com a diferença de que apenas os terminais de voz podem temporariamente possuir *slots*. Um *slot* é dividido em m *mini-slots*, e contenção no primeiro *mini-slot* determina o vencedor do *slot*. Se houver colisões no primeiro *mini-slot*, os nós disputarão novamente para o *slot* durante o segundo *mini-slot* e assim sucessivamente. Os terminais de voz recebem prioridade sobre os terminais de dados, lutando sempre pelos primeiros *mini-slots*. A sincronização no D-PRMA é realizada através do GPS.

3.2.2.3 Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência

Acesso Múltiplo por Divisão de frequência, do inglês *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), é uma abordagem que segmenta o meio disponível em vários canais de frequência que permite que múltiplos nós transmitam simultaneamente.

MCSMA (1999) - *Multichannel CSMA* [85] é um protocolo que usa CSMA para cada canal de frequência. Cada nós mantém uma lista de canais disponíveis, e quando ele tem um dado para transmitir, ele tenta usar o canal que foi utilizado por ele durante a última transmissão. Se este canal está ocupado, ele seleciona um dos outros canais livres. Apesar do MCSMA reduzir de forma geral a colisão quando comparado ao CSMA original, colisão e o problema do terminal escondido ainda permanecem presentes em cada canal.

3.2.2.4 Acesso Múltiplo por Divisão de código

Acesso Múltiplo por Divisão de código, do inglês *Code Division Multiple Access*, utiliza um de vários códigos ortogonais para espalhar o sinal de cada transmissor. Através do seu uso de códigos ortogonais, o CDMA permite múltiplas transmissões simultâneas usando todo o espectro disponível.

MC MAC (2002) - O protocolo *Multicode MAC* [86] utiliza CDMA atribuindo N códigos

para transmissão de dados e um código comum para sinalização de controle. Um nó transmissor no MC MAC, emite um RTS para outro nó no canal de controle comum indicando os códigos que serão utilizados para transmissão. Se ele recebe um CTS, ele assume que não há conflito de código com o receptor e posteriormente envia dados, após isso ele espera um ACK. Se o receptor detecta conflitos de código, troca seus códigos utilizáveis com o receptor, de modo que o remetente escolhe a partir deles quais códigos são apropriados para transmissão.

IEEE 802.11 *Distributed Coordination Function* (1996) - Este protocolo [67] é a especificação para o modo sem infra-estrutura de redes sem fio *Ethernet* e refere-se de fato a um padrão IEEE. Ele é quase idêntico ao MACAW em cada um dos seus canais, exceto que ele combina um mecanismo CSMA com MACAW para diminuir a probabilidade de colisões de RTS. O IEEE 802.11 divide o meio usando uma das duas formas de CDMA, ou *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) ou *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Na FHSS, é permitido a utilização de até 79 canais de salto diferentes na América do Norte e Europa, apoiando assim até 26 redes co-localizadas. No DSSS, o IEEE 802.11b usa 12 códigos para permitir transmissões simultâneas de nós. No IEEE 802.11, os nós que ouvem RTS ou CTS definem seu vetor de alocação de rede (NAV), que indica o tempo restante até que um canal atual se torne disponível. O padrão também fornece um canal ocupado que os nós podem utilizar para detectar se o meio está ocioso. Para promover a justiça entre os nós e evitar grandes latências de transmissão, o IEEE 802.11 introduz uma janela de contenção a partir da qual os nós esperem para transmitir através da escolha de um tempo aleatório de *backoff*. O tamanho da janela de contenção se adapta ao número de colisões que ocorrem. Um nó pode transmitir quando o seu temporizador de *backoff* termina. Sempre que um nó é forçado a aguardar através de outro quadro, ele continua contando a partir de onde parou, ao invés de escolher um novo tempo de espera aleatório. Isso garante que os nós que esperaram mais tempo recebem prioridade para acessar o meio.

RICH-DP (2000) - *Receiver Initiated Channel Hopping with Dual Polling* [87] combina o aspecto de *slow frequency hopping*¹ do HRMA [88] e o aspecto de iniciação do receptor de RIMA-SP [71] para permitir que os nós reservem saltos e para enviar dados em ambos os sentidos uma vez que um salto é reservado. Um receptor que está pronto para receber dados envia uma mensagem RTR para seus vizinhos. Se algum vizinho tem dados para enviar, ele responde com um RTS para reservar o salto para troca de dados entre o eles. Ambos os nós

¹<http://www.rfwireless-world.com/Terminology/GSM-slow-frequency-hopping-vs-fast-frequency-hopping.html>

podem enviar dados depois de concluírem esta reserva do meio.

3.2.2.5 Acesso Múltiplo por Divisão de Espaço

Acesso Múltiplo por Divisão de Espaço, do inglês **Space Division Multiple Access** (SDMA), da mesma forma que o CDMA, o SDMA tem como objetivo usar o todo o espectro durante todo o tempo até um certo grau. No SDMA, nós usamos antenas direcionais, assim permitem que o nós comecem a transmissão a qualquer tempo enquanto a direção da transmissão não interfira com a transmissão em andamento.

Lal (2002) - No protocolo SDMA de Lal [89], um nó quando está disponível para receber dados pesquisa vizinhos com uma mensagem RTS omnidirecional¹ que contém a sequência de treinamento do nó. Uma sequência de treinamento indica as direções nas quais um nó aceita transmissões. Nós que têm dados para enviar respondem para o nó questionador (*polling node*) usando um RTS direcional (DRTS) que contém cada sequência de treinamento do próprio nó. O nó questionador responde então aos remetentes com um Direcional CTS (DCTS) para completar o *handshake*. O uso de antenas direcionais pode, portanto, acomodar múltiplos remetentes concorrentes para o nó questionador.

MMAC (2002) - [90] propõe uma técnica de usar antenas inteligentes para estabelecer um *link* multi-saltos através do *handshake* RTS/CTS. No MMAC, os nós mantêm perfis das direções dos transceptores vizinhos. Sempre que uma nova solicitação de dados chega à camada MAC, esta camada inicia o *carrier sense* na direção do receptor pretendido. Se o canal estiver disponível nessa direção, o MAC emite um RTS direcional para o próximo salto no caminho para o destino. Nós no caminho para o destino encaminham essa mensagem RTS direcionalmente até que o RTS chegar no seu destino. O receptor então responde com CTS direcionado ao remetente, e os dois estabelecem comunicação de dados. Os nós vizinhos que estão dentro do intervalo deste novo *link* direcionado estabelecem seu vetor direcional de alocação de rede (DNAV) durante a duração da transmissão.

3.2.2.6 Protocolos híbridos

Os protocolos híbridos combinam duas ou mais das abordagens acima.

PRMA (1988) - O protocolo *Packet Reservation Multiple Access* [91], que foi concebido para uma rede com infra-estrutura a fim de permitir que os nós de voz possam se comunicar

¹Omnidirecional significa em todas as direções

ao lado de nós de dados, usando ambos TDMA e FDMA. PRMA divide o tempo em quadros que são ainda segmentados em *slots*, e cada *slot* pode ser reservado ou não reservado. Existem também canais de frequência para *upstream* e *downstream*. O transmissor tem que ouvir um *slot* sem reservas, disputar por ele através de ALOHA [92], e aguardar a decisão de uma estação base sobre o vencedor para tal *slot*. O PRMA também classifica os nós como nós de tráfego periódicos e não periódicos. Se um nó de tráfego periódico reserva um *slot*, esse nó pode usar o mesmo *slot* em quadros subsequentes.

HRMA (1999) - *Hop Reservation Multiple Access* [88] é outro protocolo híbrido que combina TDMA e FDMA. Na HRMA, os nós estão todos sincronizados e saltam para uma sequência comum (em cada *slot*, todos os nós ouvem a mesma frequência e alternam para outra frequência durante o próximo *slot*). Se um nó tem dados para enviar, ele envia uma mensagem de reserva de saltos (HR) usando o salto de frequência atual, e segue-se que com uma mensagem RTS para o receptor pretendido. Se o receptor responde com CTS, então o salto de frequência atual foi reservado com sucesso e eles podem enviar qualquer quantidade de dados usando essa frequência, enquanto todos os outros nós ainda estão seguindo a sequência de saltos comum.

Jin (2000) - Em [93] é proposto um protocolo CDMA/TDMA híbrido, no qual os nós elegem dinamicamente uma pseudo estação base (PBS) com base em considerações de potência. O PBS mantém a sincronização e atribui códigos aos nós que ele gerencia, usando quadros com três *mini-slots* para sincronização, reserva e agendamento, e um *slot* para dados.

SOFTMAC (2009) - O protocolo *Space-Orthogonal Frequency-Time Medium Access Control* [94] foi projetado para VANETs. Ele combina as técnicas CSMA, SDMA, OFDMA e TDMA. Neste protocolo a banda de frequência e os *slots* de tempo são pré-atribuídos baseado na localização dos veículos. Este protocolo divide a estrada em célula e atribuem sub-portadoras para cada células, e cada veículo tem um mapa pré-instalados que ajuda na sua identificação, onde de acordo com a sua posição ele sabe qual sub-portadora esta alocada pra ele. As portadoras são compartilhadas entre o veículo que estão na mesma célula onde ocorre a troca de informações,

HERMAC (2014) - O protocolo *Hybrid Efficient and Reliable MAC* [95] é um protocolo multicanal livre de contenção que realiza *broadcast* adaptativo. Ele assume que um transceptor *half-duplex* está presente em cada veículo. Neste protocolo os veículos enviam mensagem de controle e alerta sem colidir com outros nós no canal de controle (CCH) em um *time slot* reservado, e utiliza o canal de serviço (SCH) durante o intervalo de canal de controle (CCHI)

para mensagem que não são de segurança.

CS-TDMA (2014) - O protocolo *CS-TDMA* [96] é conhecido como *CDMA and Self-Organizing TDMA MAC*. Este protocolo é uma combinação do CSMA com TDMA a eficiência da comunicação *broadcast* em VANETs é melhorada. É observado que de acordo com a quantidade de tráfego presente, a taxa entre CCH (*control channel*) e SCH (*service channel*) muda variavelmente. Isto resulta na melhoria do uso dos recursos.

O CS-TDMA possui um canal de controle e seis canais de serviço. O canal de controle é usado para enviar mensagens de controle e segurança, enquanto os de serviços são usados para transmitir mensagens de dados.

FD-MMAC (2014) - O FD-MMAC [97] é um protocolo *time-slotted* baseado no CSMA/CA. Para melhorar a eficiência espectral, o FD-MMAC elimina a sobrecarga de mensagem associada à detecção de portadora virtual. Além disso, para atenuar os ataques de interferência no canal de controle, a descoberta do destinatário e a atribuição de canal são executadas independentemente por remetentes e destinatários, sem convergir para um canal comum. A ideia chave por trás do FDMMAC é que os destinatários mudem para um canal ocioso logo após perceber que o canal atual que ela está se tornar ocupado. Isso os torna disponíveis para receber transmissões de remetentes durante a distribuição de tráfego em todos os canais. Ele elimina o uso de canais dedicados de controle dentro e fora da banda para resolver conflitos, descobrir o canal dos destinatários e executar o balanceamento de carga. A eliminação do canal de controle melhora a eficiência espectral e atenua os ataques de *denial-of-service* que miram na troca de informações de controle.

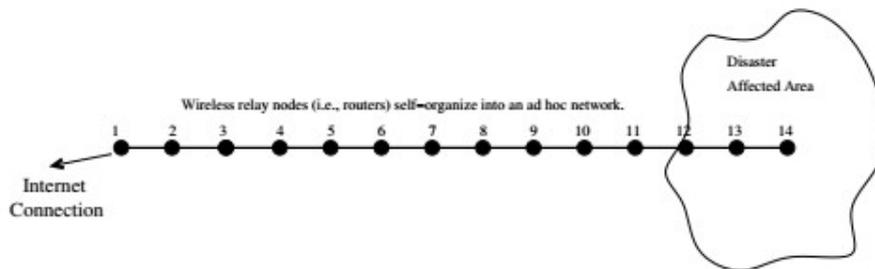
H-MMAC (2015) - O protocolo H-MMAC [98] proposto adota o IEEE 802.11 PSM. Durante a janela ATIM, os nós lidam com a troca de pacotes ATIM para negociar o canal de dados. Depois disso, os nós mudam para o canal de dados acordado para as transmissões de dados. De acordo com os resultados analíticos e as simulações executadas por [98], esse protocolo melhora significativamente o desempenho da rede em termos de vazão, atraso médio, imparcialidade e eficiência energética.

3.2.2.7 Benefícios das comunicações multicanais

Em redes *ad hoc*, os efeitos de se ter um meio compartilhado tem grande influência sobre o desempenho da rede. Considerando a abordagem mono-canal discutida anteriormente, enquanto um nós estiver transmitindo o seu vizinhos não podem transmitir através desse canal

para evitar colisões. Na tentativa de contornar este problema, abordagem multicanais surgiram. No exemplo abordado em [32], apesar de considerar uma situação simples, exemplifica bem o problemas derivados da abordagem mono-canal relacionado a vazão da rede. Nesse exemplo, ilustrado pela figura 16, os nós são dispostos em uma topologia em cadeia, para que os dados possam ser roteados do nós que tem conexão com a internet, até o nós que está localizado em uma região afetada sem acesso a mesma. Considerando o alcance de comunicação em 1 salto e a abordagem mono-canal, para que um nós receba o pacote corretamente, os nós vizinhos de até 2 saltos não podem transmitir para que não haja interferência. O que faz como que a fração de nós que transmitem ao mesmo tempo seja de $1/4$. Considerando a abordagem de múltiplos canais, por exemplo, enquanto 1 estiver transmitindo para 2, 3 pode está transmitindo para 4 utilizando outro canal, e 5 pode está transmitindo para 6 utilizando outro, e assim sucessivamente, o que fazer como que a fração de nós transmitindo ao mesmo tempo aumente, consequentemente a vazão de transmissão da rede aumenta.

Figura 16: Roteadores temporários com o nó mais à esquerda possuindo uma conexão direta de alta velocidade com a Internet.



Fonte: So, Hoi-Sheung Wilson, and Jean Walrand. Design of a Multi-Channel MAC Protocol for Ad-Hoc Wireless Networks. Technical Report UCB/EECS-2006-17, EECS Department, University of California, Berkeley, 2006.

O exemplo citado a cima exemplifica a situação da existência de uma só rede. Em casos em que existam diversas redes no mesmo ambiente, é de suma importância a utilização de múltiplos canais para que diferentes redes possam co-existir. Os protocolos MAC mais atuais abordam este tipo de problema simplesmente dividindo o espectro em vários canais independentes de modo que as redes próximas possam funcionar sem interferências[32].

Em [11] os benefícios trazidos na utilização de comunicação multicanal foram reunidos da seguinte maneira:

1. Atribuir diferentes canais aos nós vizinhos, *aumenta as transmissões simultâneas*. Como isso, a taxa de transferência da rede pode ter um acréscimo substancial. Devido ao surg-

imento de tecnologias utilizando múltiplas antenas [99], podendo ser antenas direcionais, protocolos MAC pode tirar vantagem e aumentar ainda mais as transmissões paralelas.

2. *Aumento da capacidade da rede* resultante da utilização da abordagem multi-canal é importante, pois os recursos de algumas aplicações como redes de sensores é limitado, necessitando assim do compartilhamento eficiente do meio.
3. *Taxa de entrega aumentada para dados de alta prioridade.* Situações em que uma das variáveis de interesse que estão sendo monitoradas ultrapassam um determinado limiar que pode causar algum tipo de dado, esta informação deve ter alta prioridade na entrega até o destino.
4. *Diminuição do atraso do recolhimento de dados,* o que resulta em um monitoramento mais preciso, possibilitando respostas mais rápidas a eventos.
5. *Aumento da taxa de dados,* mesmo que não necessária permanentemente, em condições de crise. Principalmente quando a informação que precisar ser transmitida tem alta prioridade.
6. *Maior robustez na presença de interferências e ruídos.* Pelo fato de os protocolos multi-canais utilizarem múltiplos canais possibilitando evitar canais que possam atrapalhar a comunicação. Como exemplo, podemos citar o *bluetooth* que usa uma técnica conhecida como *frequency-hopping spread spectrum* que são repetidas mudanças de frequências durante a transmissão para reduzir interferência e evitar interceptação.

4 Análise comparativa

Na Tabela 1 encontre-se a análise dos vários protocolos discutidos neste trabalho. A análise é baseada em diversas características até o momento analisadas. Aqui é apresentada a comparação através de diferentes aspectos, tais como: método de acesso ao canal, método de separação do canal, eficiência energética, vantagens e desvantagens apresentadas pelos protocolos, por último de qual forma foi feita a validação do protocolo.

Tabela 1: Análise comparativa entre os protocolos da camada MAC para redes *ad hoc*

Protocolo / Referência	Ano	Separação / Acesso ao canal	Eficiência energética	Vantagens	Desvantagens	Validação	Aplicações
CSMA [44]	1975	Baseado em contenção / Monocanal	Não	Para redes de baixa densidade, possui bom desempenho	Não trata o problema do terminal escondido. Não possui detecção de colisão de pacotes	N.I.	MANETs, RSSF
BTMA [43]	1975	Baseado em contenção / Multicanal (separação generalizada)	Não	O objetivo principal é resolver o problema do terminal escondido.	Inibe muitos nós de transmitir o que resulta em baixa eficiência	Modelagem matemática	Redes de pacotes de rádio
CSMA/CD* [68]	1985	Baseado em contenção / Monocanal	Não	Detecta colisões de pacotes	Não trata o problema do terminal escondido. Degradação do desempenho com aumento da densidade da rede. Colisões degradam o desempenho da rede. As prioridades não podem ser atribuídas a determinados nós.	Modelo probabilístico [100]	MANETs, RSSF
RI-BTMA [76]	1987	Baseado em contenção / Multicanal (separação generalizada)	Não	Evita colisões pela inibição dos nós através do canal de tom ocupado	O nó destino demorar muito para perceber que é o destino da transmissão atual tornando esse período vulnerável a colisões. Não elimina o terminal oculto	Modelagem matemática	Redes de pacotes de rádio

DBTMA [101]	1988	Híbrido / Multicanal (separação generalizada)	Não	Tons de ocupado são reconhecidos mais facilmente e, portanto, podem ser mais curtos. Uso de RTS/CTS aumenta eficiência da rede.	Não possui mensagens de ACKs e não é retro-compatível com o padrão IEEE 802.11 [75]. Necessita de transceptores e canais adicionais.	Simulação	MANETs
PRMA [91]	1988	Baseado em contenção / Multicanal (TDMA/FDMA)	Não	Exige controle central mínimo. Ele pode ser usado em combinação com sistemas CDMA ou TDMA existentes.	Durante o congestionamento, a taxa de queda do pacote de voz e o atraso do pacote de dados aumentam. As informações de <i>feedback</i> podem causar desperdício de largura de banda.	Simulação em C	Redes de transmissão de voz e dados
MACA* [102]	1990	Baseado em contenção / Monocanal	Não	Mitigação do problema do terminal escondido. Interoperabilidade com IEEE 802.11 (uso do padrão RTS e CTS)	Grande latência na taxa de transmissão devido a falta de ACKs.	Não possui	Redes de pacotes de rádio
TRAMA [63]	1994	Livre de contenção / Multicanal (separação generalizada)	Não	Maior número de atribuições por segundo comparado ao RAMA	<i>Overhead</i> na etapa de troca de sinalização, levando a um alto consumo energético. Algoritmo e estrutura de dados complexos. Maior atraso na fila.	Simulações utilizando <i>Qualnet network simulator</i> .	RSSF
MACAW [103]	1994	Baseado em contenção / Monocanal	Não	Semelhança com o protocolo MACA, mas com uso de mensagens de ACK, diminuindo a latência de transmissão.	Ainda não resolve problema do terminal exposto.	Simulações utilizando o OPNET 2.4c do MIL3, Inc.	MANETs

FAMA [104]	1995	Baseado em contenção / Monocanal	Não	Melhor desempenho em relação ao MACAW.	Falhas nas trocas de RTS/CTS ou transmissão curta de dados geram grande perda de desempenho.	Modelo Matemático e Simulações	Redes de sensores subaquáticas
MACA-BI [2]	1997	Baseado em contenção / Monocanal	Não	Eficiente em redes com tráfego previsível.	Performance degradada em cenários com longo período de inatividade. Recuperação de colisões dificultada por ausência de ACKs.	Simulação	Redes <i>ad hoc</i>
PAMAS [105]	1998	Multicanal (separação generalizada)	Sim	Modificação do MACA mostrando melhor desempenho energético	Desempenho afetado, pois tempo de inversão de transdutores não é considerado [45]. Ausência de ACKs.	Modelo matemático e Simulações	Redes <i>ad hoc</i>
HRMA [88]	1999	Baseado em contenção/Multicanal (TDMA/FDMA)	Sim	Oferece <i>QoS</i> em redes <i>ad hoc</i>	Necessita de sincronização de todos os nós	Modelo matemático e simulações.	RSSF
MCSMA [85]	1999	Multicanal	Sim	Aumento da vazão de dados. Utiliza informações da portadora para selecionar canais ociosos.	Um grande número de canais pode tornar o tempo de transmissão de pacotes inaceitavelmente alto. Isso afeta a taxa de transferência para usuários com receptores únicos e os atrasos médios para os receptores de um ou de vários usuários.	Simulações	Redes <i>ad hoc</i>

RIMA-SP [71]	1999	Monocanal	Não	Tratamento de colisões entre pacotes de dados nos terminais escondidos. Técnica de evitar colisão que não depende da portadora.	A performance degrada com o aumento do número de vizinhos que o nó possui.	Modelo matemático e Simulações.	Redes sem fio
Jin [93]	2000	Livre de contenção/Multicanal (CDMA/TDMA)	Sim	Alta eficiência energética em tráfego intenso	Sensível à mudanças na topologia	NI	RSSF
MARCH [72]	2000	Baseado em contenção / Monocanal	Sim	Diminuição da sinalização de controle.	Alcance extremamente baixo (uso em <i>Body Area Networks</i>)	Simulação usando OPNet	MANETs
RICH-DP [87]	2000	Multicanal (CDMA)	Não	Aquisição do canal correto sem a necessidade de detecção de portadora ou a atribuição de códigos exclusivos para nós de rede. Oferece técnicas como a divisão de janelas e reserva de <i>hop</i> para fazer melhor uso do meio comum.	É adequado para redes de tráfego periódico e previsível.	Modelo matemático e simulações	Redes <i>ad hoc</i>
SRMA/PA [106]	2000	Multicanal (TDMA)	Não	Boa performance em rede com muitos terminais de voz.	Só o transmissor da reserva é capaz de notificar os nós vizinhos sobre a reserva.	Simulações	Redes <i>ad hoc</i>
DCA-PC [107]	2001	Multicanal com separação generalizada	Sim	Maior vazão que o DCA.	Quando o número de canais aumenta de um limite, o efeito do controle de energia é menos significativo devido à sobrecarga de controle dos canais.	Simulações	MANETs

S-MAC [35]	2002	Monocanal/Baseado em contenção	Sim	Baixo consumo de energia quando o tráfego é pequeno	Ciclos de trabalho são fixos aumentando o consumo energético devido à variação de carga	NI	RSSF
DPC/ALP [73]	2002	Baseado em contenção/Monocanal	Sim	Grande eficiência energética.	Maior latência em redes com alta taxa de transmissão se comparado com IEEE 802.11b.	NI	Redes de sensores sem fio
MC MAC [86]	2002	Multicanal (CDMA)	Não	Cobertura de rádio menor resultando em maior reutilização de recursos.	Aumenta o atraso de acesso ao meio por causa da redução da chance de se encontrar com os vizinhos.	Modelo matemático e simulações	Redes <i>ad hoc</i>
MMAC [90]	2002	Multicanal (SDMA)/ Livre de contenção	Sim	<i>Hardware</i> simples pois necessita de um transceptor. Elimina o problema de nós ocultos	Não é adequado para redes com multi-saltos devido a sua total sincronização entre os nós. Falta de um algoritmo eficiente de seleção de canal. Gera muitos nós expostos	Qualnet	Redes de sensores
D-PRMA [108]	2002	Multicanal (TDMA)	Não	Melhor que o IEEE 802.11 para aplicações de voz.	NI	Modelo matemático e simulações	MANETs
T-MAC [52]	2003	Baseado em contenção	Sim	Reduz colisão por <i>time out</i> adaptativo	Problema de <i>over-hearing</i>	Nós sensores sem fio EYES	Redes de sensores

DW-MAC [53]	2008	Baseado em contenção	sim	Consumo de energia baixo	As durações do período acordado e período de sono são fixas, o que resulta que o sistema não pode dinamicamente adaptar-se a diferentes cargas de tráfego.	NS-2	Redes de sensores
Z-MAC [66]	2008	Monocanal Híbrido	Sim	Apresenta adaptabilidade a diferentes cargas de tráfego. Robusto a falhas de atribuição de slots e alterações de topologia	Atribuição de <i>slots</i> e sincronização pode levar a alto custo principalmente se a rede sofrer frequentes mudança	NS-2 e Mica2 / TinyOS	Redes de sensores
SAM-MAC [109]	2008	Multiplos canais baseado em contenção	Não	Separação de dados e tráfego de controle para reduzir as colisões, possibilidade de balanceamento de carga, transmissões simultâneas na mesma região sem interferência	Necessidade de hardware complexo	NS-2	MANETs
Slotted MACA-BI [110]	2009	Monocanal baseado em contenção pura		Interoperabilidade com IEEE 802.11	Média/grande sobrecarga de troca de sinalização, reserva de canal lento.	modelo analítico	Redes <i>ad hoc</i> móveis
PW-MAC [58]	2011	Monocanal baseado em contenção	Sim	O nó dorme até que o receptor esteja acordado, reduzindo o ciclo de trabalho no remetente. Uso de pouca memória	<i>Overhead</i> criado por <i>beacons</i> e <i>idle listening</i> ,	MICAz <i>motest</i>	Redes de sensores

MPCD-MAC [60]	2011	Multicanal baseado em contenção	Não	Reduz interferência, possibilidade de transmissões paralelas, aumentando a reutilização espacial de recursos de rádio	Problema de <i>deafness</i>	NS	Redes sem fio <i>Mesh</i>
SOFT-MAC [94]	2009	Multicanal (SDMA /OFDMA /TDMA)	Não	Alta vazão e <i>QoS</i>	Necessita que o carro venha equipado com mapa digital da estrada	NI	VANETs
HER-MAC [95]	2014	Livre de contenção / Multicanal híbrido	sim	Curto tempo necessário para que os veículos garantam acesso ao canal de controle	alto nível de coordenação e explícito gerenciamento de <i>overhead</i>	MATLAB	VANETs
CS-TDMA [96]	2014	Multicanal (CSMA/TDMA)	Sim	Taxa de colisão de pacotes reduzida e alta taxa de dados	Diminui o desempenho em alta densidade de veículos	MATLAB	VANETs

H-MMAC [98]	2015	Multicanal híbrido	Sim	Permite que alguns nós transmitam pacotes de dados durante a janela ATIM em alta carga de rede. Os nós escolhem o modo de transmissão de modo adaptativo (modo de transmissão normal ou estendido), de acordo com a condição da rede afim de alcançar um maior desempenho da rede.	Quando um nó tem um pacote de <i>broadcast</i> para transmitir, ele define um canal <i>default</i> para transmitir esse pacote. Com base no NIL, o nó sabe se todos os nós vizinhos estão no canal <i>default</i> ou não. Se alguns nós vizinhos estiverem nos canais de dados, eles perderão o pacote de <i>broadcast</i> . Portanto, o nó tem de retransmitir o pacote de <i>broadcast</i> na próxima janela ATIM.	Matlab	Redes <i>ad hoc</i>
FD-MMAC [97]	2016	Multicanal baseado em contenção	Não	Elimina o uso de canais dedicados de controle dentro e fora da banda para resolver ataques <i>jamming</i> , descobrir o canal residente de destinos e executar o balanceamento de carga.	Mesmo tendo propriedades <i>anti-jamming</i> , ela possui maior vazão de dados na ausência de <i>jamming</i> .	dispositivos NI USRP ¹	Redes sem fio

5 Direcionamento de pesquisas futuras e desafios

Nesta seção, serão abordados alguns dos desafios identificados através da literatura, visando apresentar algumas diretrizes para pesquisas futuras, que devem ser consideradas no estudo e concepção de protocolos MAC para redes *ad hoc*.

¹<http://www.ni.com/sdr/usrp/pt/>

Técnicas de estimação de mobilidade mais precisas

As redes *ad hoc* possuem diversas aplicações onde os nós podem ser móveis, por isso a estimativa da mobilidade é um fator essencial para evitar as oscilações desnecessárias no estabelecimento de *links* entre nós ou associação de um novo nó à rede [111, 112]. De acordo com [113], existe um forte *trade-off* entre a precisão da estimativa, o tempo de estimativa e o custo do processamento do sinal (tanto em termos de consumo de energia como de recursos computacionais). Por este motivo, surge a necessidade de novas técnicas de estimativa de mobilidade que otimizem este *trade-off*.

As técnicas de estimação que são baseadas somente em valores de RSSI¹ (*Received Signal Strength Indicator*) flutuam significativamente devido a efeitos de desvanecimento (*fading*) e sombreamento (*shadowing*), fornecendo um resultado não muito preciso, conduzindo a oscilações frequentes de medida mesmo quando os nós não são móveis. Infelizmente, a maioria das abordagens propostas baseiam-se nesta técnica [114, 115, 116]. Outro fator que limita a precisão da medida é que o tamanho limitado de um nó sensor e seus recursos limitados colocam restrições significativas nos tipos de fontes de dados que podem ser usadas para estimativa de mobilidade.

Comunicação entre canais

Outro desafio apontado por [117, 118] nos protocolos multicanais da camada MAC é a comunicação entre canais. Em diversas aplicações de redes *ad hoc*, como redes de sensores, o nó é normalmente equipado com um transceptor de rádio *half-duplex*, por questões de custo, onde este transceptor não consegue ouvir múltiplos canais ao mesmo tempo. Com isso, os nós devem ficar comutando entre os canais para verificar se existe algum outro nó querendo se comunicar com ele. Essas mudanças frequentes entre canais fazem um nó consumir energia mais rápido. Portanto, como realizar a comunicação entre canais de forma eficiente é algo que deve ser investigado.

Modelos mais realísticos

A simulação é a forma mais utilizada para validação na concepção e pesquisa de protocolos. Muitos resultados da simulação revelam as contribuições oferecidas pelo protocolo analisado ou

¹RSSI representa o relacionamento entre a potência de transmissão e a potência recebida.

problemas que venham a surgir na implementação de tal protocolo em determinadas aplicações. Apesar disso, existe uma grande lacuna entre as simulações e o ambiente real de funcionamento [119]. Podemos citar por exemplo o estudo realizado em [120] que fornece limites empíricos sobre a ligação prática e a capacidade de rede disponível para a transferência de dados em um protocolo multicanal para RSSF. Por isso, deve-se considerar o comportamento da propagação de rádio de forma mais realista, levando sempre em consideração atrasos de comutação de pacotes em uma rede sem fio multi-saltos.

Cross-layer

O roteamento, o agendamento de transmissão e a atribuição de canais têm sido constantemente investigados em redes *ad hoc*. No entanto, poucos estudos têm abordado o problema de forma conjunta da atribuição de canais, agendamento e roteamento em redes *ad hoc* [121].

Segundo [119, 122], investigar técnicas que utilizam a interação entre camadas, conhecido como camadas cruzadas, do inglês *cross-layer*, é promissor, pois a utilização desta abordagem onde protocolos MAC funcionam em conjunto com o roteamento pode melhorar o desempenho da rede. A arquitetura tradicional em camadas apresenta uma abordagem rígida, limitando a capacidade dos nós para selecionar melhores rotas, por exemplo. Diante disso, um método MAC que interaja com a camada física e camada de rede (roteamento) iria fornecer melhores resultados em comparação com uma estrita abordagem em camadas [123, 118].

Adaptação às mudanças do ambiente

O emprego de redes *ad hoc* é idealizado em diversas aplicações, mas devido à natureza pouco confiável das redes sem fios, a mobilidade de nós e mudanças nos perfis de tráfego, tornam seu projeto desafiador [119]. Por isso, o projeto de algoritmos de alocação dinâmica de canais que se adaptem a mudança do canal devido ao tráfego dinâmico da rede e se reconfigurem para garantir a máxima vazão possível é algo necessário [117]. Técnicas como aprendizagem adaptativa que aprendem com eventos passados e agem para maximizar a vazão, podem ser utilizadas [124, 125].

Acompanhamento da evolução do hardware

A tendência atual tem sido utilizar uma única interface de rádio (por exemplo, o dispositivo

TI CC2420 da Texas *Instruments/Chipcon*)¹ em sensores *motest* para redes de sensores sem fio. Em [126], os autores demonstram que os benefícios do paradigma multi-rádio compensam a complexidade adicionada por sua utilização. Além disso, a utilização de *motest* com multi-interfaces garantem o aumento na vazão de dados possibilitando, por exemplo, comunicação de voz em tempo real. Novas abordagens de atribuição de canal em redes *ad hoc* devem considerar nós com vários transceptores [119].

Emergência de aplicações de alta vazão e sensíveis a atrasos

Aplicações com carga de dados intensa, como monitoramento de saúde estrutural, do inglês *structural health monitoring* (SHM), e aplicações de multimídia são aplicações que estão sendo idealizadas para redes *ad hoc* e de sensores [127, 128]. Essas aplicações exigem alta vazão de dados e diminuição dos atrasos fim-a-fim da transmissão. Além disso, os dados coletados a partir de aplicações multimídias, não são apenas escalares (por exemplo, temperatura, pressão, etc), mas também de voz, imagens de alta resolução e vídeo de alta definição. As soluções de atribuição de canais devem ser adaptadas para considerar o *trade-off* entre a vazão e os atrasos de fim-a-fim [119].

Rádio cognitivo para redes de sensores

Algumas redes *ad hoc* como redes de sensores operam no espectro não licenciado que inclui essencialmente a banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical radio band*), que é compartilhada por muitas tecnologias como 802.11 [75], 802.15.1 [129] e 802.15.4 [130]. A coexistência de diversas tecnologias como RFFS, WiFi e *Bluetooth* pode degradar drasticamente os desempenhos da rede [119]. Por outro lado, o espectro licenciado é para uso exclusivo de usuários primários. Infelizmente, bandas de espectro não licenciadas estão se tornando escassas, enquanto grandes porções de todo o espectro de rádio permanecem inutilizadas. A tecnologia de rádio cognitiva [131] pode permitir que as redes *ad hoc* acessem um novo espectro que apresentem melhores características. Assim, as abordagens de atribuição de canais devem ser adaptadas para considerar essas novas bandas disponíveis [132].

¹<http://www.ti.com/product/CC2420>

6 Conclusão

Neste trabalho são apresentados os principais conceitos de redes *ad hoc*, uma tecnologia que cada vez mais está presente na sociedade através de aplicações como: redes de sensores sem fio que são utilizadas em diversos cenários onde as operações humanas se torna inviável; VANETS que é a chave para a concepção de sistemas de transporte inteligentes, que visa o aumento da segurança e o conformo no trânsito.

A falta de uma infra-estrutura e a natureza de comunicação fim-a-fim da rede *ad hoc* tornam os protocolos de acesso ao meio aleatório a escolha natural para o controle de acesso em redes *ad hoc*. Refletindo na maioria das propostas de protocolos MAC para redes *ad hoc* que vem surgindo, onde são baseado no paradigma de acesso aleatório. Por outro lado, os esquemas de acesso à atribuição por demanda (embora geralmente mais complexos) são mais adequados para ambientes que precisam de garantias sobre a Qualidade de Serviço (QoS) percebida pelos seus usuários. Diante dessas restrições e requisitos, surgem abordagens híbridas a fim de tirar proveito dos benefícios que cada abordagem individualmente proporcionam. Além da tendência da utilização de abordagens híbridas, surgem abordagens *cross layers*, onde a ideia central é manter as funcionalidades associadas as camadas originais, mas permitir a coordenação, interação e otimização conjunta de protocolos, cruzando camadas diferentes. Esta abordagem mostra-se promissora e que em ganhando força através de vários resultados de pesquisa.

As abordagens mais atuais utilizam múltiplos canais, o que aumenta as transmissões simultâneas, conseqüentemente a vazão de dados é aumentada, e o número de nós que é suportado pela rede é maior. Esta abordagem está sendo melhorada com o surgimento de tecnologias utilizando múltiplas antenas [99], onde os protocolos MAC pode tirar vantagem e aumentar ainda mais as transmissões paralelas.

Por fim, estabelecer padrões de protocolos para redes *ad hoc* é algo desafiador, pois de acordo com cada aplicação e cenário as restrições mudam. Diante disso, a importância deste trabalho é trazer de forma conjunta uma análise comparativa de cada abordagem, frisando suas vantagens e desvantagem, a fim de que seja um objeto de referência no estudo de protocolos multicanal de redes *ad hoc*.

Referências

- [1] Marcelo G Rubinstein, Igor M Moraes, Miguel Elias M Campista, Luis Henrique MK Costa, and Otto Carlos MB Duarte. A survey on wireless ad hoc networks. In *Mobile and Wireless Communication Networks*, pages 1–33. Springer, 2006.
- [2] Raja Jurdak, Cristina Videira Lopes, and Pierre Baldi. A survey, classification and comparative analysis of medium access control protocols for ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 6(1):2–16, 2004.
- [3] Falko Dressler and Ozgur B Akan. A survey on bio-inspired networking. *Computer Networks*, 54(6):881–900, 2010.
- [4] Mingfei Wang, Linlin Ci, Ping Zhan, and Yongjun Xu. Multi-channel mac protocols in wireless ad hoc and sensor networks. In *2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*, volume 2, pages 562–566. IEEE, 2008.
- [5] Claudia Cormio and Kaushik R Chowdhury. A survey on mac protocols for cognitive radio networks. *Ad Hoc Networks*, 7(7):1315–1329, 2009.
- [6] John Jubin and Janet D Tornow. The darpa packet radio network protocols. *Proceedings of the IEEE*, 75(1):21–32, 1987.
- [7] Jie Wu and Ivan Stojmenovic. Ad hoc networks. *COMPUTER-IEEE COMPUTER SOCIETY-*, 37(2):29–31, 2004.
- [8] Mario Gerla. *Ad Hoc Networks*, pages 1–22. Springer US, Boston, MA, 2005.
- [9] Matthew Smith and Bernd Freisleben. Self-healing wireless ad hoc networks based on adaptive node mobility. In *Proc. IFIP Conf. on Wireless and Optical Communications Networks*, 2004.
- [10] Doina Bein. Self-configuring, self-organizing, and self-healing schemes in mobile ad hoc networks. In *Guide to Wireless Ad Hoc Networks*, pages 27–41. Springer, 2009.
- [11] Ridha Soua and Pascale Minet. Multichannel assignment protocols in wireless sensor networks: A comprehensive survey. *Pervasive and Mobile Computing*, 16:2–21, 2015.
- [12] Luca Mottola and Gian Pietro Picco. Programming wireless sensor networks: Fundamental concepts and state of the art. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 43(3):19, 2011.

- [13] Shu Yinbiao, P Lanctot, and Fan Jianbin. Internet of things: wireless sensor networks. *White Paper, International Electrotechnical Commission*, <http://www.iec.ch>, 2015.
- [14] Manoj Kumar, Kapil Pandey, and Murli Manohar Sharma. Survey on wireless sensor networks using mac protocol. In *2014 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, pages 1–6. IEEE, 2014.
- [15] Brian P Crow, Indra Widjaja, LG Kim, and Prescott T Sakai. Ieee 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications magazine*, 35(9):116–126, 1997.
- [16] Akansha Verma, MP Singh, Jyoti Prakash Singh, and Prabhat Kumar. Survey of mac protocol for wireless sensor networks. In *Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE), 2015 Second International Conference on*, pages 92–97. IEEE, 2015.
- [17] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4):393–422, 2002.
- [18] Bhavana Narain, Anuradha Sharma, Sanjay Kumar, and Vinod Patle. Energy efficient mac protocols for wireless sensor networks: A survey. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES) Vol, 2*, 2011.
- [19] Imrich Chlamtac, Marco Conti, and Jennifer J-N Liu. Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges. *Ad hoc networks*, 1(1):13–64, 2003.
- [20] Jeroen Hoebeke, Ingrid Moerman, Bart Dhoedt, and Piet Demeester. An overview of mobile ad hoc networks: applications and challenges. *Journal-Communications Network*, 3(3):60–66, 2004.
- [21] James Bernsen and D Manivannan. Unicast routing protocols for vehicular ad hoc networks: A critical comparison and classification. *Pervasive and Mobile Computing*, 5(1):1–18, 2009.
- [22] Felipe Cunha, Leandro Villas, Azzedine Boukerche, Guilherme Maia, Aline Viana, Raquel AF Mini, and Antonio AF Loureiro. Data communication in vanets: Protocols, applications and challenges. *Ad Hoc Networks*, 44:90–103, 2016.
- [23] Vandana Jayaraj, C Hemanth, and RG Sangeetha. A survey on hybrid mac protocols for vehicular ad-hoc networks. *Vehicular Communications*, 2016.
- [24] Felipe Domingos Da Cunha, Azzedine Boukerche, Leandro Villas, Aline Carneiro Viana, and Antonio AF Loureiro. *Data communication in VANETs: a survey, challenges and applications*. PhD thesis, INRIA Saclay; INRIA, 2014.

- [25] Wenshuang Liang, Zhuorong Li, Hongyang Zhang, Shenling Wang, and Rongfang Bie. Vehicular ad hoc networks: architectures, research issues, methodologies, challenges, and trends. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015:17, 2015.
- [26] Miad Faezipour, Mehrdad Nourani, Adnan Saeed, and Sateesh Addepalli. Progress and challenges in intelligent vehicle area networks. *Communications of the ACM*, 55(2):90–100, 2012.
- [27] Sherali Zeadally, Ray Hunt, Yuh-Shyan Chen, Angela Irwin, and Aamir Hassan. Vehicular ad hoc networks (vanets): status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, 50(4):217–241, 2012.
- [28] Saleh Yousefi, Mahmoud Siadat Mousavi, and Mahmood Fathy. Vehicular ad hoc networks (vanets): challenges and perspectives. In *2006 6th International Conference on ITS Telecommunications*, pages 761–766. IEEE, 2006.
- [29] Lina Altoaimy, Imad Mahgoub, and Monika Rathod. Weighted localization in vehicular ad hoc networks using vehicle-to-vehicle communication. In *2014 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, pages 1–5. IEEE, 2014.
- [30] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 12(3):493–506, 2004.
- [31] Rajoua Anane, Ridha Bouallegue, and Kosai Raoof. Medium access control (mac) protocols for wireless sensor network: An energy aware survey. In *Proceedings of the Mediterranean Conference on Information & Communication Technologies 2015*, pages 561–569. Springer, 2016.
- [32] Hoi-Sheung Wilson So and Jean Walrand. Design of a multi-channel mac protocol for ad-hoc wireless networks. Technical report, Technical Report UCB/EECS-2006-17, EECS Department, University of California, Berkeley, 2006.
- [33] João L Sobrinho, Roland De Haan, and José M Brazio. Why rts-cts is not your ideal wireless lan multiple access protocol. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2005*, volume 1, pages 81–87. IEEE, 2005.
- [34] Mark Stemm et al. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices. *IEICE transactions on Communications*, 80(8):1125–1131, 1997.

- [35] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1567–1576. IEEE, 2002.
- [36] Fayez Alfayez, Mohammad Hammoudeh, and Abdelrahman Abuarqoub. A survey on mac protocols for duty-cycled wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*, 73:482–489, 2015.
- [37] Parma Nand et al. Contention based energy efficient wireless sensor network—a survey. In *Computing, Communication & Automation (ICCCA), 2015 International Conference on*, pages 546–551. IEEE, 2015.
- [38] Abdelmalik Bachir, Mischa Dohler, Thomas Watteyne, and Kin K Leung. Mac essentials for wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(2):222–248, 2010.
- [39] Phil Karn. Maca—a new channel access method for packet radio. In *ARRL/CRRL Amateur radio 9th computer networking conference*, volume 140, pages 134–140, 1990.
- [40] Suresh Singh and CS Raghavendra. Power efficient mac protocol for multihop radio networks. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1998. The Ninth IEEE International Symposium on*, volume 1, pages 153–157. IEEE, 1998.
- [41] Alec Woo and David E Culler. A transmission control scheme for media access in sensor networks. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 221–235. ACM, 2001.
- [42] Ashikur Rahman and Pawel Gburzynski. Hidden problems with the hidden node problem. In *Proceedings of 23rd Biennial Symposium on Communications*, pages 270–273, 2006.
- [43] Fouad Tobagi and Leonard Kleinrock. Packet switching in radio channels: Part ii—the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution. *IEEE Transactions on communications*, 23(12):1417–1433, 1975.
- [44] Leonard Kleinrock and Fouad A Tobagi. Packet switching in radio channels: Part i—carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. *IEEE Transactions on communications*, 23 (12): 1400 - 1416, 1975.
- [45] Katarzyna Kosek-Szott. A survey of mac layer solutions to the hidden node problem in ad-hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 10(3):635–660, 2012.

- [46] Rahul Mishra, Shivam Nayak, Kapil Verma, and Dayashankar Singh. Survey on techniques to resolve problems associated with rts/cts mechanism. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Communication, Computing & Security*, pages 86–91. ACM, 2011.
- [47] Fabrizio Talucci, Mario Gerla, and Luigi Fratta. Maca-bi (maca by invitation)-a receiver oriented access protocol for wireless multihop networks. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1997. Waves of the Year 2000. PIMRC'97., The 8th IEEE International Symposium on*, volume 2, pages 435–439. IEEE, 1997.
- [48] Saikat Ray and David Starobinski. On false blocking in rts/cts-based multihop wireless networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(2):849–862, 2007.
- [49] Rahul Mishra, Shivam Nayak, Kapil Verma, and Dayashankar Singh. Survey on techniques to resolve problems associated with rts/cts mechanism. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Communication, Computing & Security*, pages 86–91. ACM, 2011.
- [50] Saikat Ray, Jeffrey B Carruthers, and David Starobinski. Evaluation of the masked node problem in ad hoc wireless lans. *IEEE Transactions on mobile computing*, 4(5):430–442, 2005.
- [51] João L Sobrinho, Roland De Haan, and José M Brazio. Why rts-cts is not your ideal wireless lan multiple access protocol. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2005*, volume 1, pages 81–87. IEEE, 2005.
- [52] Tijs Van Dam and Koen Langendoen. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 171–180. ACM, 2003.
- [53] Yanjun Sun, Shu Du, Omer Gurewitz, and David B Johnson. Dw-mac: a low latency, energy efficient demand-wakeup mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 53–62. ACM, 2008.
- [54] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari, and Cauligi S Raghavendra. An adaptive energy-efficient and low-latency mac for data gathering in wireless sensor networks. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings. 18th International*, page 224. IEEE, 2004.
- [55] Amre El-Hoiydi and J-D Decotignie. Wisemac: an ultra low power mac protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks. In *Computers and Communications, 2004. Proceedings. ISCC 2004. Ninth International Symposium on*, volume 1, pages 244–251. IEEE, 2004.

- [56] Amre El-Hoiydi. Spatial tdma and csma with preamble sampling for low power ad hoc wireless sensor networks. In *Computers and Communications, 2002. Proceedings. ISCC 2002. Seventh International Symposium on*, pages 685–692. IEEE, 2002.
- [57] Michael Buettner, Gary V Yee, Eric Anderson, and Richard Han. X-mac: a short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 307–320. ACM, 2006.
- [58] Lei Tang, Yanjun Sun, Omer Gurewitz, and David B Johnson. Pw-mac: An energy-efficient predictive-wakeup mac protocol for wireless sensor networks. In *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, pages 1305–1313. IEEE, 2011.
- [59] Yanjun Sun, Omer Gurewitz, and David B Johnson. Ri-mac: a receiver-initiated asynchronous duty cycle mac protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, pages 1–14. ACM, 2008.
- [60] Fabio Martignon. Multi-channel power-controlled directional mac for wireless mesh networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 11(1):90–107, 2011.
- [61] Jing Li and Georgios Y Lazarou. A bit-map-assisted energy-efficient mac scheme for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks*, pages 55–60. ACM, 2004.
- [62] Tao Zheng, Sridhar Radhakrishnan, and Venkatesh Sarangan. Pmac: an adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, pages 8–pp. IEEE, 2005.
- [63] Mark J Karol and I Chih-Lin. A protocol for fast resource assignment in wireless pcs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43(3):727–732, 1994.
- [64] N Amitay. Resource auction multiple access (rama): efficient method for fast resource assignment in decentralised wireless pcs. *Electronics Letters*, 28(8):799–801, 1992.
- [65] Ahlam Saud Althobaiti and Manal Abdullah. Medium access control protocols for wireless sensor networks classifications and cross-layering. *Procedia Computer Science*, 65:4–16, 2015.
- [66] Injong Rhee, Ajit Warriar, Mahesh Aia, Jeongki Min, and Mihail L Sichitiu. Z-mac: a hybrid mac for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 16(3):511–524, 2008.

- [67] LAN/MAN Standards Committee et al. Part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE-SA Standards Board*, 2003.
- [68] 802.3-1985 - ieee standards for local area networks: Carrier sense multiple access with collision detection (csma/cd) access method and physical layer specifications. 1985.
- [69] Chunyu Hu, Hwangnam Kim, and Jennifer C Hou. An analysis of the binary exponential backoff algorithm in distributed mac protocols. 2005.
- [70] Chane L Fullmer and JJ Garcia-Luna-Aceves. Floor acquisition multiple access (fama) for packet-radio networks. In *ACM SIGCOMM computer communication review*, volume 25, pages 262–273. ACM, 1995.
- [71] JJ Garcia-Luna-Aceves and Asimakis Tzamaloukas. Reversing the collision-avoidance handshake in wireless networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 120–131. ACM, 1999.
- [72] C-K Toh, Vasos Vassiliou, Guillermo Guichal, and C-H Shih. March: a medium access control protocol for multihop wireless ad hoc networks. In *MILCOM 2000. 21st Century Military Communications Conference Proceedings*, volume 1, pages 512–516. IEEE, 2000.
- [73] Jung-Won Kim and Nicholas Bambos. Power-efficient mac scheme using channel probing in multirate wireless ad hoc networks. In *Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th*, volume 4, pages 2380–2384. IEEE, 2002.
- [74] Luciano Bononi, Marco Conti, and Lorenzo Donatiello. A distributed contention control mechanism for power saving in random-access ad-hoc wireless local area networks. In *Mobile Multimedia Communications, 1999.(MoMuC'99) 1999 IEEE International Workshop on*, pages 114–123. IEEE, 1999.
- [75] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee et al. Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications, 1997.
- [76] Cheng-shong Wu and V Li. Receiver-initiated busy-tone multiple access in packet radio networks. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, volume 17, pages 336–342. ACM, 1987.
- [77] Zygmunt J Haas and Jing Deng. Dual busy tone multiple access (dbtma)-a multiple access control scheme for ad hoc networks. *IEEE Transactions on Communications*, 50(6):975–985, 2002.

- [78] Yu-Chee Tseng, Shih-Lin Wu, Chih-Yu Lin, and Jang-Ping Sheu. A multi-channel mac protocol with power control for multi-hop mobile ad hoc networks. In *Distributed Computing Systems Workshop, 2001 International Conference on*, pages 419–424. IEEE, 2001.
- [79] Yu-Chee Tseng, Chih-Min Chao, Shih-Lin Wu, and Jang-Ping Sheu. Dynamic channel allocation with location awareness for multi-hop mobile ad hoc networks. *Computer Communications*, 25(7):676–688, 2002.
- [80] Chenxi Zhu and M Scott Corson. A five-phase reservation protocol (fprp) for mobile ad hoc networks. In *INFOCOM'98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 1, pages 322–331. IEEE, 1998.
- [81] Michael J Markowski and Adarshpal S Sethi. Fully distributed wireless mac transmission of real-time data. In *Real-Time Technology and Applications Symposium, 1998. Proceedings. Fourth IEEE*, pages 49–57. IEEE, 1998.
- [82] Chang Wook Ahn, Chung Gu Kang, and You Ze Cho. Soft reservation multiple access with priority assignment (srma/pa): A novel mac protocol for qos-guaranteed integrated services in mobile ad-hoc networks. In *Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE-VTS Fall VTC 2000. 52nd*, volume 2, pages 942–947. IEEE, 2000.
- [83] I Chlamtac, A Farago, AD Myers, VR Syrotiuk, and G Zaruba. Adapt: a dynamically self-adjusting media access control protocol for ad hoc-networks. In *Global Telecommunications Conference, 1999. GLOBECOM'99*, volume 1, pages 11–15. IEEE, 1999.
- [84] Shengming Jiang, Jianqiang Rao, Dajiang He, Xinhua Ling, and Chi Chung Ko. A simple distributed prma for manets. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 51(2):293–305, 2002.
- [85] Asis Nasipuri, Jun Zhuang, and Samir R Das. A multichannel csma mac protocol for multihop wireless networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 1999. WCNC. 1999 IEEE*, pages 1402–1406. IEEE, 1999.
- [86] Kyu-Tae Jin and Dong-Ho Cho. Multi-code mac for multi-hop wireless ad hoc networks. In *Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th*, volume 2, pages 1100–1104. IEEE, 2002.
- [87] Asimakis Tzamaloukas and Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves. A channel-hopping protocol for ad-hoc networks. In *Computer Communications and Networks, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on*, pages 142–147. IEEE, 2000.

- [88] Zhenyu Tang and Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves. Hop reservation multiple access for multi-channel packet radio networks. *Computer Communications*, 23(10):877–886, 2000.
- [89] Dhananjay Lal, Rishi Toshniwal, Rajesh Radhakrishnan, Dharma P Agrawal, and J Caffery. A novel mac layer protocol for space division multiple access in wireless ad hoc networks. In *Computer Communications and Networks, 2002. Proceedings. Eleventh International Conference on*, pages 614–619. IEEE, 2002.
- [90] Romit Roy Choudhury, Xue Yang, Ram Ramanathan, and Nitin H Vaidya. Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 59–70. ACM, 2002.
- [91] David J Goodman, Reinaldo A Valenzuela, KT Gayliard, and B Ramamurthi. Packet reservation multiple access for local wireless communications. *IEEE transactions on Communications*, 37(8):885–890, 1989.
- [92] Norman Abramson. The aloha system: another alternative for computer communications. In *Proceedings of the November 17-19, 1970, fall joint computer conference*, pages 281–285. ACM, 1970.
- [93] Kyu-Tae Jin and Dong-Ho Cho. A mac algorithm for energy-limited ad-hoc networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference*, volume 1, pages 219–222. IEEE; 1999, 2000.
- [94] Ghassan M Abdalla, Mosa Ali Abu-Rgheff, and Sidi-Mohammed Senouci. Space-orthogonal frequency-time medium access control (soft mac) for vanet. In *2009 Global Information Infrastructure Symposium*, pages 1–8. IEEE, 2009.
- [95] Duc Ngoc Minh Dang, Hanh Ngoc Dang, Vandung Nguyen, Zaw Htike, and Choong Seon Hong. Her-mac: A hybrid efficient and reliable mac for vehicular ad hoc networks. In *2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, pages 186–193. IEEE, 2014.
- [96] Lin Zhang, Zishan Liu, Rui Zou, Jinjie Guo, and Yu Liu. A scalable csma and self-organizing tdma mac for ieee 802.11 p/1609. x in vanets. *Wireless Personal Communications*, 74(4):1197–1212, 2014.
- [97] Yan Zhang, Loukas Lazos, Kai Chen, Bocan Hu, and Swetha Shivaramaiah. Multi-channel medium access without control channels: A full duplex mac design. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, PP(99):1–15, 2016.

- [98] Duc Ngoc Minh Dang, Choong Seon Hong, and Sungwon Lee. A hybrid multi-channel mac protocol for wireless ad hoc networks. *Wireless Networks*, 21(2):387–404, 2015.
- [99] Chung Le Tran, Tadeusz A Wysocki, Alfred Mertins, and Jennifer Seberry. Multiple-input multiple-output systems with space-time codes. *Complex Orthogonal Space-Time Processing in Wireless Communications*, pages 9–58, 2006.
- [100] Marie Dufлот, Laurent Fribourg, Thomas Herault, Richard Lassaigne, Frédéric Magniette, Stéphane Messika, Sylvain Peyronnet, and Claudine Picaronny. Probabilistic model checking of the csma/cd protocol using prism and apmc. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 128(6):195–214, 2005.
- [101] Zygmunt J Haas and Jing Deng. Dual busy tone multiple access (dbtma)-a multiple access control scheme for ad hoc networks. *IEEE Transactions on Communications*, 50(6):975–985, 2002.
- [102] Phil Karn. Maca-a new channel access method for packet radio. In *ARRL/CRRL Amateur radio 9th computer networking conference*, volume 140, pages 134–140, 1990.
- [103] Vaduvur Bharghavan, Alan Demers, Scott Shenker, and Lixia Zhang. Macaw: a media access protocol for wireless lan’s. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 24(4):212–225, 1994.
- [104] Chane L Fullmer and JJ Garcia-Luna-Aceves. Floor acquisition multiple access (fama) for packet-radio networks. In *ACM SIGCOMM computer communication review*, volume 25, pages 262–273. ACM, 1995.
- [105] Suresh Singh and CS Raghavendra. Power efficient mac protocol for multihop radio networks. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1998. The Ninth IEEE International Symposium on*, volume 1, pages 153–157. IEEE, 1998.
- [106] Chang Wook Ahn, Chung Gu Kang, and You Ze Cho. Soft reservation multiple access with priority assignment (srma/pa): A novel mac protocol for qos-guaranteed integrated services in mobile ad-hoc networks. In *Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE-VTS Fall VTC 2000. 52nd*, volume 2, pages 942–947. IEEE, 2000.
- [107] Shih-Lin Wu, Yu-Chee Tseng, Chih-Yu Lin, and Jang-Ping Sheu. A multi-channel mac protocol with power control for multi-hop mobile ad hoc networks. *The Computer Journal*, 45(1):101–110, 2002.

- [108] Shengming Jiang, Jianqiang Rao, Dajiang He, Xinhua Ling, and Chi Chung Ko. A simple distributed prma for manets. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 51(2):293–305, 2002.
- [109] Rongsheng Huang, Hongqiang Zhai, Chi Zhang, and Yuguang Fang. Sam-mac: An efficient channel assignment scheme for multi-channel ad hoc networks. *Computer Networks*, 52(8):1634–1646, 2008.
- [110] Rishi Pal Singh and DK Lobiyal. Performance modeling of slotted maca-bi mac protocol for mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Interaction Sciences: Information Technology, Culture and Human*, pages 860–862. ACM, 2009.
- [111] Muneeb Ali, Tashfeen Suleman, and Zartash Afzal Uzmi. Mmac: A mobility-adaptive, collision-free mac protocol for wireless sensor networks. In *PCCC 2005. 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, 2005.*, pages 401–407. IEEE, 2005.
- [112] Zhiyong Tang and Walteneagus Dargie. A mobility-aware medium access control protocol for wireless sensor networks. In *The fifth IEEE international workshop on heterogeneous, multi-hop, wireless and mobile networks (Globecom 2010)*, volume 32, page 45, 2010.
- [113] Qian Dong and Walteneagus Dargie. A survey on mobility and mobility-aware mac protocols in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1):88–100, 2013.
- [114] Hirokazu Miura, Kazuhiko Hirano, Noriyuki Matsuda, Hirokazu Taki, Norihiro Abe, and Satoshi Hori. Indoor localization for mobile node based on rssi. In *International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, pages 1065–1072. Springer, 2007.
- [115] Huan Pham and Sanjay Jha. An adaptive mobility-aware mac protocol for sensor networks (ms-mac). In *Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, 2004 IEEE International Conference on*, pages 558–560. IEEE, 2004.
- [116] Tang Zhiyong and Walteneagus Dargie. A mobility-aware medium access control protocol for wireless sensor networks. In *2010 IEEE Globecom Workshops*, pages 109–114. IEEE, 2010.
- [117] Pei Huang, Li Xiao, Soroor Soltani, Matt W Mutka, and Ning Xi. The evolution of mac protocols in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1):101–120, 2013.

- [118] Amjad Ali, Wang Huiqiang, Lv Hongwu, and Xiaoming Chen. A survey of mac protocols design strategies and techniques in wireless ad hoc networks. *Journal of Communications*, 9(1):30–38, 2014.
- [119] Ridha Soua and Pascale Minet. Multichannel assignment protocols in wireless sensor networks: A comprehensive survey. *Pervasive and Mobile Computing*, 16, Part A:2 – 21, 2015.
- [120] P Gireesan Namboothiri and M Sivalingam Krishna. Capacity analysis of multi-hop wireless sensor networks using multiple transmission channels: A case study using ieee 802.15. 4 based networks. In *Local Computer Networks (LCN), 2010 IEEE 35th Conference on*, pages 168–171. IEEE, 2010.
- [121] Jinbao Li, Xiaohang Guo, and Longjiang Guo. Joint routing, scheduling and channel assignment in multi-power multi-radio wireless sensor networks. In *30th IEEE International Performance Computing and Communications Conference*, pages 1–8. IEEE, 2011.
- [122] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, Fatih Alagoz, et al. Mac protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 44(4):115–121, 2006.
- [123] Ridha Soua. *Wireless sensor networks in industrial environment: energy efficiency, delay and scalability*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2014.
- [124] Kieu-Ha Phung, Bart Lemmens, Mihail Mihaylov, Dario Di Zenobio, Kris Steenhaut, and Lan Tran. Multi-agent learning for multi-channel wireless sensor networks. In *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 6448–6452. IEEE, 2012.
- [125] Kieu-Ha Phung, Bart Lemmens, Mihail Mihaylov, Lan Tran, and Kris Steenhaut. Adaptive learning based scheduling in multichannel protocol for energy-efficient data-gathering wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 2013.
- [126] Priya Kasirajan, Hao Xu, Maciej J Zawodniok, and S Jagannathan. Demonstration of a multi-interface multi-channel routing protocol (mmcr) for wsns using missouri s&t motes. *LCN demo*, 2010.
- [127] Takuto Kuroiwa, Makoto Suzuki, Yasutaka Yamashita, Shunsuke Saruwatari, Tomonori Nagayama, and Hiroyuki Morikawa. A multi-channel bulk data collection for structural health monitoring using wireless sensor networks. In *2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, pages 295–299. IEEE, 2012.

- [128] Bambang Harjito and Song Han. Wireless multimedia sensor networks applications and security challenges. In *Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2010 International Conference on*, pages 842–846. IEEE, 2010.
- [129] Patricia McDermott-Wells. What is bluetooth? *IEEE potentials*, 23(5):33–35, 2004.
- [130] Andreas F Molisch, Kannan Balakrishnan, Chia-Chin Chong, Shahriar Emami, Andrew Fort, Johan Karedal, Juergen Kunisch, Hans Schantz, Ulrich Schuster, and Kai Siwiak. Ieee 802.15.4a channel model-final report. *IEEE P802*, 15(04):0662, 2004.
- [131] Ozgur B Akan, Osman B Karli, and Ozgur Ergul. Cognitive radio sensor networks. *IEEE network*, 23(4):34–40, 2009.
- [132] Shamik Sengupta and KP Subbalakshmi. Open research issues in multi-hop cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(4):168–176, 2013.