



**FILIPE BARROS RODRIGUES**

**HW-MAC: UM PROTOCOLO MULTICANAL COM  
BACKBONE PARA RSSF**

**LAVRAS – MG**

**2020**

**FILIPPE BARROS RODRIGUES**

**HW-MAC: UM PROTOCOLO MULTICANAL COM BACKBONE PARA RSSF**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Sistemas de Informação, para a obtenção do título de Bacharel.



Prof. Dr. Tales Heimfarth

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rodrigues, Filipe Barros.

HW-MAC: Um Protocolo Multicanal com Backbone para  
RSSF / Filipe Barros Rodrigues. – Lavras : UFLA, 2020.

57 p. : il.

Monografia(graduação)–Universidade Federal de Lavras,  
2020.

Orientador: Prof. Dr. Tales Heimfarth.

Bibliografia.

1. Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs). 2. Protocolos de  
Controle de Acesso ao Meio (MAC). 3. Backbone. I. Tales  
Heimfarth. II. Título.

**FILIPPE BARROS RODRIGUES**

**HW-MAC: UM PROTOCOLO MULTICANAL COM BACKBONE PARA RSSF**

**HW-MAC: A BACKBONED MULTICHANNEL PROTOCOL FOR WSN**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Sistemas de Informação, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 27 de Agosto de 2020.

Prof. Dr. Dilson Lucas Pereira	DAC-UFLA
Prof. Dr. João Carlos Giacomini	DCC-UFLA
Prof. Dr. Raphael Winckler de Bettio	DAC-UFLA

Prof. Dr. Tales Heimfarth  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2020**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Antonio Rodrigues e Maria de Lourdes Gomes de Barros Rodrigues, pelo amor e apoio incondicionais, pela inspiração e motivação, sem os quais eu jamais teria alcançado minhas conquistas.

Aos meus professores, pelo inestimável conhecimento que me transmitiram, além dos conselhos e das experiências que me proporcionaram.

Ao meu orientador, pelas inestimáveis oportunidades que me ofereceu, pela confiança em mim, e meus companheiros do GRUBI, que me auxiliaram quando mais precisei.

E ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro durante esses anos de PIBIC.

Muito obrigado!

*Não tente fazer com que os fatos aconteçam como você quer, mas deseje que aconteçam como eles acontecem e você se sairá bem.*  
*(Epicteto)*

## RESUMO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) são compostas por diversos dispositivos de tecnologia embarcada alimentados por pequenas baterias, e são capazes de detectar e transmitir eventos em tempo real. Com a sua escassez energética característica, tornam-se necessárias medidas para preservar a capacidade de operação da rede, sendo o uso energético eficiente uma das mais importantes. Normalmente, nas RSSFs, é adotado o uso de ciclos de trabalho, de forma que os sensores permaneçam a maior parte do tempo em *stand-by*, acordando periodicamente para se comunicar. Ao passo que essa aproximação poupa energia, um atraso acaba sendo introduzido nas transmissões entre nós vizinhos, resultando numa alta latência na comunicação fim-a-fim. Este trabalho propõe o HW-MAC, um protocolo *cross-layer* multicanal baseado no X-MAC que distribui vias de alta velocidade de transmissão (backbones) através da sincronia entre sensores, além de promover um roteamento inteligente capaz de utilizar dessas vias para entregar os pacotes com uma latência reduzida sem impactar no consumo energético total. Testes foram realizados para validar o protocolo e os resultados indicaram que as transmissões fim-a-fim apresentaram redução na latência em relação ao X-MAC.

**Palavras-chave:** Rede de Sensores Sem Fio, Protocolos MAC, Multicanal, Backbone.

## ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSNs) are composed of several devices of embedded technology powered by small batteries, and are capable of detecting and transmitting events in real time. With its characteristic energy scarcity, measures are needed to preserve the network's operating capacity, with efficient energy use being one of the most important aspect. Normally, in WSNs, the use of duty cycle is adopted, so that the sensors remain most of the time in stand-by, and wakes up periodically to communicate. While this approach saves energy, a delay ends up being introduced in transmissions between neighboring nodes, resulting in high latency in end-to-end communication (sleep-delay problem). This work proposes HW-MAC, a multichannel cross-layer protocol based on X-MAC that distributes high-speed transmission paths (backbones). The backbone uses synchronization between sensor nodes and promotes an intelligent routing capable of using these paths to deliver the data packages with reduced latency. Tests were carried out to validate the protocol, and the results indicated that end-to-end transmissions showed a reduction in latency compared to X-MAC.

**Keywords:** Wireless Sensor Network, MAC Protocols, Multichannel, Backbone.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Camadas definidas no modelo TCP/IP híbrido. . . . .	14
Figura 2.2 – Uma rede de sensores sem fio. . . . .	16
Figura 2.3 – As camadas inferiores definidas pelo IEEE802.15.4. . . . .	17
Figura 2.4 – GPSR no modo ganancioso. . . . .	19
Figura 2.5 – O nó S é um mínimo local. . . . .	20
Figura 2.6 – GPSR no modo perímetro. . . . .	20
Figura 2.7 – O problema do terminal oculto. . . . .	23
Figura 2.8 – Uma transmissão sob o protocolo B-MAC. . . . .	25
Figura 2.9 – B-MAC+, com Tx transmitindo a $Rx_1$ . . . . .	26
Figura 2.10 – Uma transmissão sob o protocolo X-MAC . . . . .	27
Figura 2.11 – Protocolo WiseMAC antes da sincronia. . . . .	28
Figura 2.12 – Protocolo WiseMAC depois da sincronia. . . . .	28
Figura 2.13 – RSSF com um <i>backbone</i> B Wise . . . . .	29
Figura 2.14 – EX-MAC: Primeira transmissão no caminho $A \rightarrow B \rightarrow C$ . . . . .	30
Figura 2.15 – EX-MAC: Segunda transmissão no caminho $A \rightarrow B \rightarrow C$ . . . . .	30
Figura 3.1 – Formação de <i>backbones</i> no HW-MAC . . . . .	34
Figura 3.2 – Rede com <i>backbones</i> distribuídos . . . . .	35
Figura 3.3 – Os subsegmentos dos <i>backbones</i> . . . . .	36
Figura 3.4 – Transmissão do nó A ao nó G . . . . .	37
Figura 3.5 – Gráfico de sincronia . . . . .	37
Figura 3.6 – S precisa transmitir dados para D . . . . .	38
Figura 3.7 – Rotas possíveis de S para D . . . . .	39
Figura 3.8 – Divisão das regiões de acesso aos subsegmentos de <i>backbone</i> . . . . .	41
Figura 3.9 – Mudança no padrão de ocorrência de um ciclo . . . . .	43
Figura 3.10 – O padrão do ciclo é mantido com $t_{SL_i}$ variado . . . . .	44
Figura 4.1 – Variações do HW-MAC . . . . .	45
Figura 4.2 – Grupos de nós que irão dividir o papel de transmissor/receptor . . . . .	47
Figura 4.3 – Latência média de transmissões individuais . . . . .	48
Figura 4.4 – Média de <i>hops</i> por transmissão . . . . .	49
Figura 4.5 – Latência média das cadeias de transmissões . . . . .	49
Figura 4.6 – Latência média das transmissões aleatórias . . . . .	51

Figura 4.7 – Média de *hops* nas transmissões aleatórias . . . . . 51

## LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Guia de parâmetros utilizados . . . . .	46
Quadro 4.2 – Sumário dos resultados do Cenário I - Média de latência e <i>hops</i> . . . . .	50
Quadro 4.3 – Sumário dos resultados do Cenário I - Latência média das cadeias de trans- missões . . . . .	50
Quadro 4.4 – Sumário dos resultados do Cenário II - Média de latência (30 mensagens) e <i>hops</i> . . . . .	52

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Contextualização e Motivações	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Estrutura do Trabalho	12
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico</b>	<b>14</b>
2.1	Pilha de Protocolos	14
2.2	Redes de Sensores Sem Fio	15
2.2.1	Nós Sensores	15
2.2.2	Modelo de Comunicação	16
2.3	A Camada de Rede	17
2.3.1	GPSR	19
2.4	As Camadas Inferiores - MAC e Física	20
2.5	Protocolos MAC nas RSSFs	21
2.5.1	Primeiras Soluções MAC nas RSSFs	24
2.5.2	O Avanço dos Protocolos com Amostragem de Preâmbulo	25
2.5.3	Escalonamento em Protocolos MAC	28
2.5.4	O Protocolo EX-MAC	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>32</b>
3.1	Tipo de pesquisa	32
3.2	Descrição da Solução	32
3.3	Distribuição dos <i>Backbones</i>	33
3.4	Roteamento no HW-MAC	37
3.4.1	Visão Geral	38
3.4.2	Descrição dos Cálculos	40
3.5	Controle de Acesso ao Meio no HW-MAC	42
3.5.1	<i>Cross-Layer</i>	42
3.5.2	MAC Multicanal	42
3.5.3	Sincronização de Ciclos	42
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>45</b>
4.1	Configuração do Ambiente	45
4.2	Resultados das Simulações	47

<b>4.2.1</b>	<b>Cenário I - Grupo A vs Grupo B</b>	<b>47</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Cenário II - Sequências Aleatórias</b>	<b>50</b>
<b>4.3</b>	<b>Conclusão dos Resultados</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>53</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabalhos futuros</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma breve contextualização do cenário tecnológico no escopo das redes de sensores sem fio (RSSFs). Descreve-se ainda o problema e o objetivo de pesquisa.

### 1.1 Contextualização e Motivações

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) é composta por diversos dispositivos de funcionalidade simples e dedicada, dispersos em um ambiente com o objetivo de captar as condições físicas no meio em que se encontram. Os sensores são capazes de coletar dados ambientais como temperatura, humidade, som, velocidade do vento, níveis de poluição, entre outros (SWETHA; SANTHOSH; SOFIA, 2018). Além disso, são dotados de um processador embarcado de baixa potência, memória e bateria, e realizam suas comunicações em múltiplos saltos (*hops*) com seus rádios de curto alcance. Entre suas diversas aplicações em monitoramento, as RSSFs são utilizadas na agricultura, meteorologia, vigilância, preservação florestal, saúde, etc. (RAMSON; MONI, 2017). No entanto, as RSSFs são diferentes de redes de computadores típicas, no sentido de que nós individuais tem restrições muito limitantes na memória, no poder de processamento e no consumo de energia, pois os nós geralmente empregam plataformas de hardware pequenas e operam sob escassez energética. Uma vez que a bateria tenha se esgotado, é muito difícil, se não impossível, recarregá-la ou substituí-la, considerando-se por fim que o nó tenha sido eliminado da rede (AKYILDIZ et al., 2002).

Por esse motivo, os protocolos de comunicação normalmente utilizados por redes sem fio comuns, como o padrão Wi-Fi, não podem ser aplicados a RSSFs, pois partem do princípio de que os dispositivos para os quais irão trabalhar dispõem de energia sem escassez, tornando-se necessária a adaptação de um protocolo que priorize a eficiência energética. Os protocolos de controle de comunicação das RSSFs são divididos em cinco camadas: aplicação, transporte, rede, enlace e física (AKYILDIZ et al., 2002). O controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*), subcamada da camada de enlace, é uma das funcionalidades que mais impactam no consumo de um nó sensor, pois é responsável por gerenciar o estado de funcionamento do rádio. O rádio é o componente que mais consome energia no sensor por ser o dispositivo que controla emissão e recepção de sinais de comunicação entre outros nós (BACHIR et al., 2010; DOUDOU; DJENOURI; BADACHE, 2013).

Devido à grande importância na questão energética, a subcamada MAC é alvo de muitos estudos. Os protocolos de controle e acesso ao meio podem ser divididos em três categorias: protocolos de agendamento (reserva de recursos), protocolos de períodos ativos/inativos comuns e protocolos assíncronos (CANO et al., 2011). Os protocolos assíncronos são largamente utilizados em RSSFs devido à sua simplicidade e boa escalabilidade (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002). Para economizar energia, os nós sensores trabalham alternando o estado de funcionamento de seus rádios de forma cíclica (*duty cycle*), mantendo-se desligados na maior parte do tempo, ligando periodicamente para verificar se existe alguma tentativa de comunicação, ou quando precisa enviar dados (BUETTNER et al., 2006).

O protocolo X-MAC (BUETTNER et al., 2006) é um protocolo da camada MAC assíncrono, proposto para lidar com as principais necessidades das RSSFs. Utiliza ciclo de trabalho, e apresenta um desempenho superior em relação aos protocolos similares que foram propostos anteriormente. No entanto, a utilização de ciclos de trabalho aumenta consideravelmente a latência de transmissão comparado a protocolos que não o utilizam, o que se torna problemático em muitas aplicações, como detecção de eventos.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho propõe o HW-MAC, um protocolo de múltiplas camadas (*cross-layer*) e multicanal baseado no X-MAC e roteamento geográfico, para reduzir a latência na comunicação entre dois nós quaisquer (isto é, num ambiente sem uma estação base) sem impactar significativamente no consumo energético. A ideia central deste protocolo é promover a sincronização do ciclo de trabalho de determinados nós pela rede de maneira encadeada, dando origem a uma estrutura de transmissão em alta velocidade na rede, denominada *backbone*, além de empregar uma tática de roteamento que leva em consideração a existência dessa estrutura.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando aspectos sobre Redes de Sensores Sem Fio, as pesquisas científicas envolvendo protocolos de comunicação e os objetivos desses protocolos, sendo alguns desses objetivos o roteamento eficiente de mensagens pela rede ou economia de energia dos nós sensores. O Capítulo 3 mostra a metodologia de trabalho utilizada para desenvolver o protocolo proposto,

além de apresentar as características da solução e a descrição dos testes. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e a discussão acerca deles. E finalmente o Capítulo 5 apresenta as conclusões.

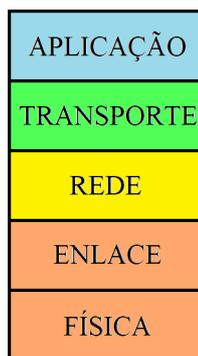
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo está presente todo o material teórico associado a busca do conhecimento necessário para melhor entender o assunto estudado e trabalhado: RSSFs e modelo em camadas; Protocolos de rede; Protocolos MAC; e Trabalhos relacionados.

### 2.1 Pilha de Protocolos

No campo de desenvolvimento de soluções para comunicação de redes, trabalhar seguindo um modelo de camadas facilita o processo e proporciona um padrão de comunicação entre os elementos da rede. Considere o modelo híbrido]:

Figura 2.1 – Camadas definidas no modelo TCP/IP híbrido.



Fonte: Adaptado de (TANENBAUM; WETHERALL, 2010)

O TCP/IP (também chamado de pilha de protocolos TCP/IP) é um conjunto de protocolos de comunicação entre computadores em rede. O modelo híbrido adiciona a camada física observada no modelo OSI, pois une os elementos que tornam importantes ambas as abordagens. A camada física especifica como transmitir bits em diferentes tipos de mídia como sinais elétricos (ou outros analógicos). A camada de enlace se preocupa em como enviar mensagens de comprimento finito entre computadores conectados diretamente com níveis específicos de confiabilidade. A camada de rede trata de como combinar vários enlaces em redes e subredes para que seja possível enviar pacotes entre computadores distantes. Isso inclui a tarefa de encontrar o caminho ao longo do qual enviar os pacotes. A camada de transporte fortalece as garantias de entrega da camada de rede e fornece abstrações de entrega, como um fluxo de bytes confiável, que atende às necessidades de diferentes aplicativos. Por fim, a camada de aplicativo contém programas que fazem uso da rede (TANENBAUM; WETHERALL, 2010).

## 2.2 Redes de Sensores Sem Fio

Com o avanço na pesquisa em microprocessadores, em transmissores de rádio de baixa potência e nos componentes eletromecânicos, foi possível conceber dispositivos sensores de baixo custo, baixa potência e multifuncionais, que são capazes de observar e reagir a mudanças nos fenômenos físicos de seus ambientes circundantes. Ao se conectarem a uma rede por um meio sem fio, esses simples dispositivos podem fornecer um resultado geral de sua funcionalidade de detecção (BARONTI et al., 2007).

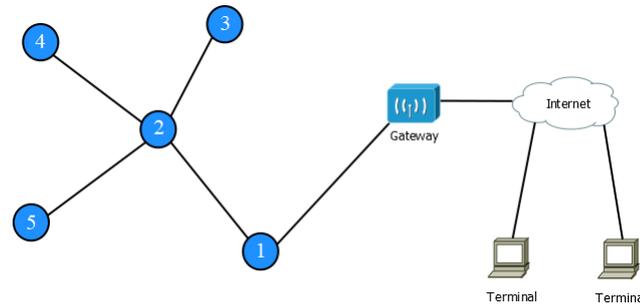
As RSSFs possuem caráter essencialmente distribuído, com a quantidade de nós sensores podendo variar desde algumas dezenas até milhares de unidades espalhadas pela área de interesse. Além disso, graças à simplicidade inerente dos nós sensores, são naturalmente capazes de trabalhar de forma *ad hoc*, conseguindo lidar agilmente tanto na adição quanto na remoção de dispositivos à mesma (AKYILDIZ et al., 2002; CANO et al., 2011; KOCAKULAK; BUTUN, 2017).

Com a crescente demanda de mercado por soluções que envolvem internet das coisas (IoT - *Internet of Things*), ou por soluções em que o uso de dispositivos cabeados ou dispositivos sem fio convencionais são desencorajados (ou mesmo impossível), as RSSFs se tornam essenciais, o que justifica a busca pelo avanço na qualidade e na confiabilidade de seus serviços (BARONTI et al., 2007).

### 2.2.1 Nós Sensores

Os sensores sem fio são equipados com um transceptor de rádio e um conjunto de transdutores através dos quais eles adquirem informações sobre o ambiente em sua volta (AKYILDIZ et al., 2002; KOCAKULAK; BUTUN, 2017). Dependendo da aplicação do sensor, mais unidades funcionais podem estar presentes. Quando implantados em grandes quantidades em um campo, esses sensores podem se organizar automaticamente para formar uma rede *ad hoc* para se comunicarem entre si, com ou sem a presença de nós coletores (*sinks*). Em redes com *sinks*, um usuário remoto pode injetar comandos na rede de sensores através do *sink* para atribuir tarefas de coleta, processamento e transferência de dados aos sensores e, posteriormente, pode receber os dados detectados pela rede através do mesmo *sink* (BARONTI et al., 2007). A Figura 2.2 ilustra uma RSSF típica: Os nós numerados de 1 a 5 realizam sensoreamento. Mas apenas o nó 1 está ligado ao *gateway*, fazendo dele um centralizador de dados – os nós 3, 4 e 5 direcionam transmissões ao nó 2, que serão repassadas ao nó 1, entregando-as ao *gateway*.

Figura 2.2 – Uma rede de sensores sem fio.



Fonte: Adaptado de (KOCAKULAK; BUTUN, 2017)

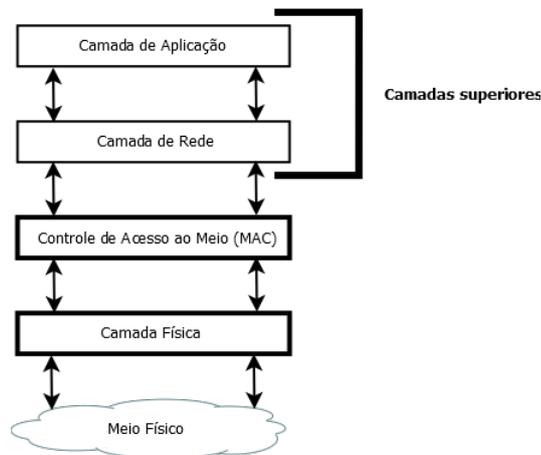
### 2.2.2 Modelo de Comunicação

Em RSSFs também é muito comum o desenvolvimento de protocolos *cross-layer* (múltiplas camadas). A abordagem *cross-layer* é benéfica para RSSFs por vários motivos (JAGADEESAN; PARTHASARATHY, 2012):

- A abordagem arquitetural padrão, embora seja muito bem-sucedida em redes convencionais, restringe o espaço de busca para uma adaptação otimizada. Diferentemente das redes comuns, onde os recursos são abundantes, é primordial para RSSFs poder explorar um espaço maior de otimização, incluindo várias camadas para aproveitar ao máximo os recursos limitados.
- A pilha de protocolos existente é definida levando em consideração redes cabeadas. Pode não ser adequado para RSSFs que são fundamentalmente diferentes em muitos aspectos. As características exclusivas das RSSFs requerem uma consideração conjunta dos parâmetros anteriormente localizados em diferentes camadas.
- Os parâmetros de comunicação, que podem estar espalhados entre as diversas camadas, são mais inter-relacionados numa RSSF do que numa rede convencional. Seria um desafio desenvolver um “princípio de separação” bem definido para RSSFs.

Portanto, as limitações das RSSFs tornam inviável o uso de protocolos convencionais (HILL et al., 2004). Por isso, simplificações no modelo de camadas foram efetuadas para adequar esta categoria de dispositivos. A IEEE especificou padrões para a camada física e subcamada controle de acesso ao meio (Figura 2.3), formalizados como o padrão IEEE802.15.4 (IEEE, 2020). As camadas superiores são propostas e gerenciadas de acordo com os desenvolvedores de RSSF.

Figura 2.3 – As camadas inferiores definidas pelo IEEE802.15.4.



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2020)

As camadas MAC e Física são extremamente importantes na gestão do funcionamento de um nó sensor, porém a camada de Rede é bastante relevante na definição do padrão de comunicação dos nós, e por esse motivo deve haver uma seção dedicada a essa camada neste referencial teórico.

### 2.3 A Camada de Rede

Localizada na Camada 3 do modelo de comunicação ISO/OSI, a principal função da camada de rede é mover dados para dentro de outras redes, e movê-los através delas. Os protocolos da camada de rede cumprem com esse papel empacotando dados com informações corretas do endereço de rede, selecionando as rotas de rede apropriadas, e encaminhando os dados empacotados abaixo na pilha para a camada de enlace (Camada 2), ou acima na pilha para a camada de transporte (Camada 4) (KUROSE; ROSS, 2012).

Nas RSSFs, a aplicação na qual está operando influencia fortemente na natureza do protocolo a ser adotado. Por exemplo, os requerimentos de um protocolo desenvolvido para uma aplicação de vigilância são diferentes dos requerimentos para uma aplicação veicular. Segundo (NOROUZI; ZAIM, 2012), alguns requerimentos que podem ser citados são: escalabilidade, latência, rendimento, agregação de dados, *overhead*, entre outros. Entretanto, independente dos requerimentos da aplicação, os protocolos de roteamento para RSSF devem buscar maximizar o tempo de vida da rede e minimizar o consumo de energia.

Os protocolos de roteamento possuem três categorias clássicas. Um protocolo pode ser definido como centrado em dados, hierárquico e baseado em localização, dependendo da estrutura da rede e da aplicação (RATHI; SARASWAT; BHATTACHARYA, 2012):

- No roteamento centrado em dados, o *sink* envia consultas para determinadas regiões e guarda os dados dos sensores localizados nas regiões selecionadas. Como os dados estão sendo solicitados por meio de consultas, é necessário nomear com base em atributos para especificar as propriedades dos mesmos. Geralmente, os dados são transmitidos de todos os nós sensores na região de implantação com redundância significativa. O protocolo Difusão Direta (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000) se encaixa nesta categoria. Após a distribuição da consulta, o nó que corresponder com a requisição direciona a resposta ao *sink*, podendo criar caminhos preferenciais.
- Métodos hierárquicos ou baseados em *cluster* são técnicas bem conhecidas com vantagem especial de escalabilidade e comunicação eficiente. Nós desempenham papéis diferentes na rede. Aqui podemos citar o protocolo LEACH (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002). Neste protocolo, os sensores se agrupam e selecionam um encaminhador denominado *cluster head*. Somente o *cluster head* tem a prerrogativa de direcionar os dados para a estação base. Ele agrega dados de todos os nós e os compacta para serem enviados à estação base. O LEACH é um protocolo capaz de se adaptar, auto-organizar e se agrupar, podendo ser ajustado conforme as características dos sensores e da estação base.
- No roteamento centrado em localização, os nós sabem onde estão em uma região geográfica. As informações de localização são usadas para melhorar o desempenho do roteamento e fornecer novos tipos de serviços. O protocolo GEAR e GPSR fazem parte desta categoria. O protocolo GEAR (YU; GOVINDAN; ESTRIN, 2001) realiza um roteamento balanceando o estado energético de um nó com sua posição geográfica em relação ao destino da mensagem em uma função de custo de envio. Cada vez que um sensor realiza uma transmissão, seu custo de envio se torna maior, e o objetivo deste protocolo é selecionar o *hop* que apresentar o menor custo possível. O GPSR será visto com mais detalhes adiante.

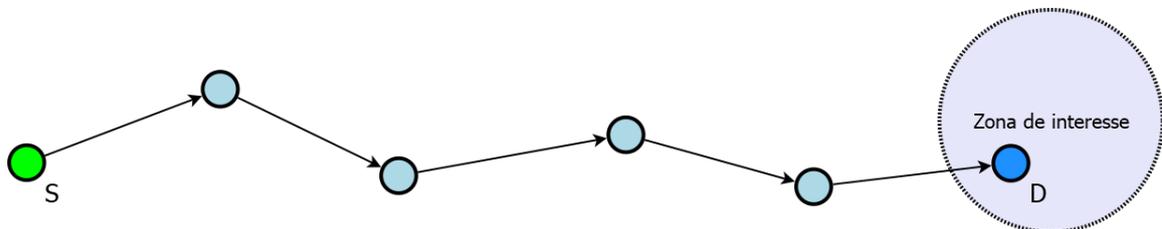
Os protocolos de roteamento também podem ser classificados em três categorias, como proativo, reativo e híbrido, dependendo de como a fonte encontra uma rota para o destino

(RATHI; SARASWAT; BHATTACHARYA, 2012). Um protocolo proativo configura os caminhos e estados de roteamento antes que haja uma demanda por tráfego. Os caminhos são mantidos mesmo que não haja fluxo de tráfego naquele momento. No protocolo de roteamento reativo, os caminhos são configurados sob demanda quando as consultas são iniciadas. O protocolo híbrido combina essas duas idéias.

### 2.3.1 GPSR

O GPSR (acrônimo de *Greedy Perimeter Stateless Routing*) (KARP; KUNG, 2000) é um protocolo de roteamento baseado em localização geográfica. É conhecido como independente de estado, porque os nós coletam sob demanda informações sobre os vizinhos em vez de usar métricas de roteamento. Este protocolo explora a correspondência entre posição geográfica e conectividade em uma rede sem fio, usando as posições dos nós para tomar decisões de encaminhamento de pacotes. O GPSR usa uma tática gulosa para encaminhar pacotes para os nós que estão sempre progressivamente mais próximos do destino (Figura 2.4).

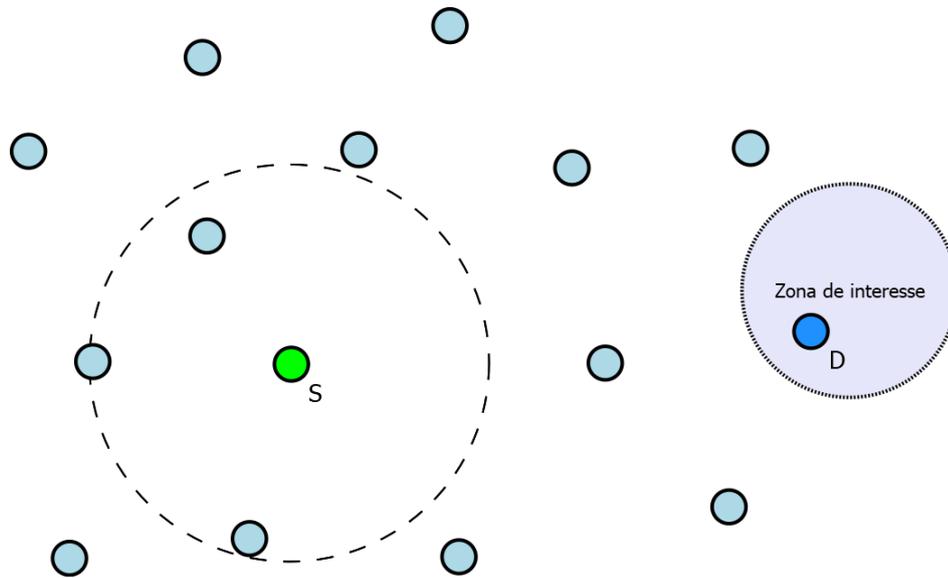
Figura 2.4 – GPSR no modo ganancioso.



Fonte: Elaborada pelo autor

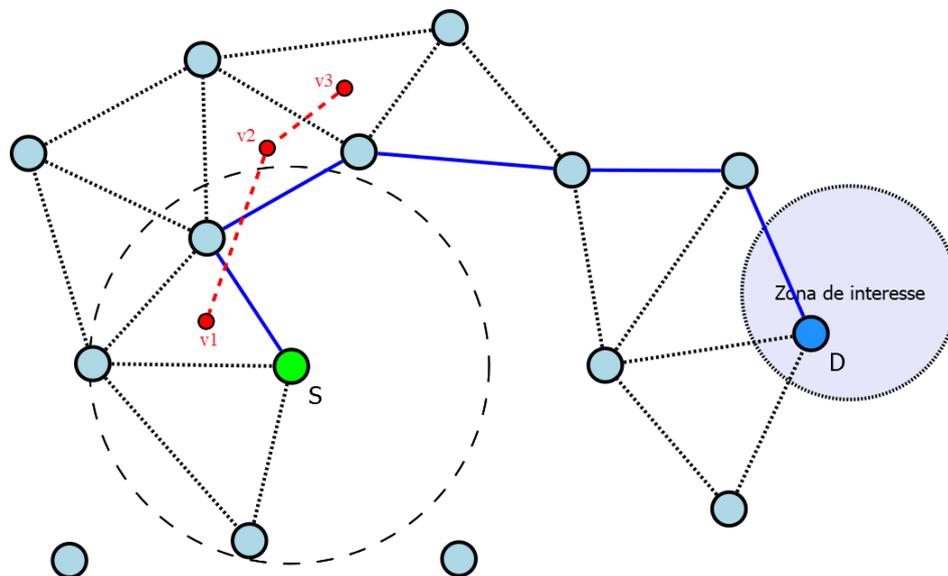
Porém conforme ilustrado na Figura 2.5, nas regiões da rede em que esse caminho guloso não existe (ou seja, o único caminho que existe exige que se se afaste temporariamente do destino), o GPSR se recupera encaminhando no modo de perímetro, no qual um pacote atravessa sucessivamente as faces mais próximas de um subgrafo planar do grafo completo de conectividade de rede de rádio, até chegar a um nó mais próximo do destino, onde o encaminhamento guloso é retomado, conforme a Figura 2.6. Neste exemplo, o modo perímetro tem o objetivo de levar a mensagem do vértice do grafo dual  $v_1$ , o mais distante, ao  $v_3$ , levando a mensagem para fora da zona de aprisionamento (GHAFOOR et al., 2013).

Figura 2.5 – O nó S é um mínimo local.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 2.6 – GPSR no modo perímetro.



Fonte: Elaborada pelo autor

## 2.4 As Camadas Inferiores - MAC e Física

Este trabalho é direcionado à camada de acesso ao meio de comunicação, ou camada de enlace, que é responsável pela transmissão e recepção (delimitação) de quadros e pelo controle de fluxo. Ela também estabelece um protocolo de comunicação entre sistemas diretamente conectados. A camada de enlace de dados possui duas subcamadas: controle de enlace lógico (LLC) e controle de acesso ao meio (MAC). A subcamada MAC determina quem tem permissão para acessar o meio a qualquer momento. Ao enviar dados para outro dispositivo

na rede, o bloco MAC encapsula quadros de nível superior em quadros apropriados para o meio de transmissão (ou seja, o MAC adiciona um preâmbulo de sincronia e também preenchimento, se necessário), adiciona uma sequência de verificação de quadros para identificar erros de transmissão e, em seguida, encaminha os dados para a camada física assim que o método de acesso ao canal apropriado permitir. Controlar quando os dados são enviados e quando esperar é necessário para evitar o congestionamento e as colisões, especialmente para topologias com um domínio de colisão (topologias de barramento, anel, malha, ponto a multiponto) (LITWIN, 2001; KUROSE; ROSS, 2012).

Também importante neste trabalho é a camada física. A camada física define especificações elétricas e físicas para a representação de símbolos (ou conjunto de *bits*). A camada física define o relacionamento entre um dispositivo e um meio de transmissão, como um cabo de cobre ou óptico. Isso inclui o layout de pinos, tensões, especificações de cabos, hubs, repetidores, adaptadores de rede, adaptadores de barramento de host (HBA usado em redes de área de armazenamento) e outros. As principais funções e serviços executados pela camada física são: Estabelecimento e término de uma conexão com um meio de comunicação; Participação no processo pelo qual os recursos de comunicação são efetivamente compartilhados entre vários usuários (por exemplo, resolução de contenção e controle de fluxo); Modulação ou conversão entre a representação de dados digitais no equipamento do usuário e os sinais correspondentes transmitidos através de um canal de comunicação (KUROSE; ROSS, 2012). Estes são sinais que operam sobre o cabeamento físico (como cobre e fibra óptica) ou sobre um *link* de rádio.

## 2.5 Protocolos MAC nas RSSFs

Muitos autores dividem os protocolos MAC em três categorias: protocolos com agendamento de recursos, com período ativo comum e protocolos assíncronos (CANO et al., 2011).

Em RSSFs, os protocolos MAC baseados em reserva de recursos, conforme sugerido, coordenam a divisão e a utilização de um recurso específico. No TDMA (*Time Division Multiple Access*) por exemplo, há um nó centralizador (mestre) que distribui a escala de transmissão entre os nós da rede durante a inicialização. Para utilizar este tipo de protocolo, uma RSSF é normalmente dividida em clusters, e o líder (*cluster head*) controla o tempo de acesso de cada nó de seu grupo (XIE; WANG, 2008). Há também o CDMA (*Code Division Multiple Access*), que assimila um código de transmissão a cada unidade de comunicação dentro de um cluster na rede fazendo o uso de espalhamento espectral (SALAM; AMEEN; AL-KHAYAT, 2014), e o

FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), que faz a divisão da frequência entre as unidades do cluster. Desses, o TDMA é o tipo de protocolo baseado em reserva mais utilizado pelo fato de que os *hardwares* que o implementam são mais simples.

O uso de período ativo comum é uma abordagem que surgiu do CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*, acesso múltiplo por detecção de transmissor) (ZAREEI et al., 2017). Neste grupo de protocolos geralmente é fornecido acesso a nós múltiplos aleatórios sem depender de uma coordenação central. O diferencial dessa aproximação advém da capacidade desses protocolos de alocar recursos sob demanda, os permitindo se adaptarem às flutuações de tráfego e a mudanças nos parâmetros do protocolo. Os nós que operam sob este tipo de protocolo são programados para ativação e hibernação simultâneas, utilizando uma sincronia local adaptável.

Já os protocolos MAC assíncronos não utilizam formas de sincronia, os nós dormem e acordam independentemente dos outros nós da rede. Neste tipo de protocolo, a mensagem de dados é precedida por um sinal de aviso de intenção de transmissão. Ao acordar e ouvir tal sinal, o nós receptor se manterá acordado para receber a mensagem de dados.

Os protocolos baseados em reserva possuem uma vantagem natural de economia de energia quando comparado aos protocolos assíncronos, devido ao fato de que o ciclo de trabalho é reduzido e de não haver *overhead* e colisões entre pacotes transmitidos na rede. Isso acontece porque o *cluster head* realiza o agendamento das transmissões, eliminando a disputa entre os nós subordinados.

No entanto, conforme (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002), algumas desvantagens características dos protocolos baseados em reserva são observadas: Possuem uma escalabilidade limitada, isto é, alterações na topologia da rede como adição ou remoção de nós podem ser difíceis de tratar; Devido à natureza coordenada desta classe de protocolo, torna-se indispensável a formação de clusters de comunicação com os nós sensores como acontece no protocolo LEACH (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002); Decorrente deste último, emerge ainda problemas de colisões e disputas entre os *cluster heads*, que não são triviais de se tratar.

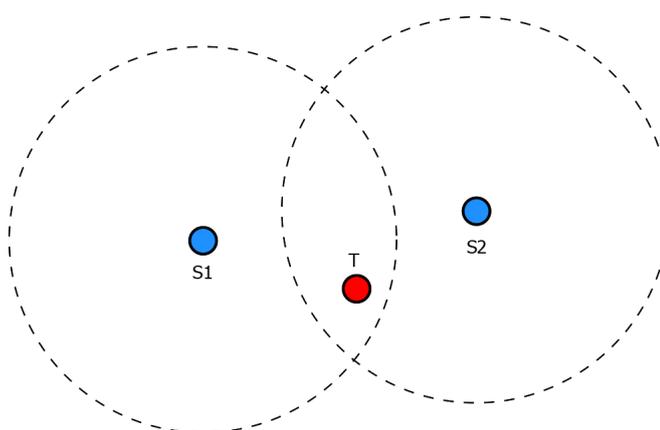
Os protocolos assíncronos por outro lado oferecem uma escalabilidade maior, pois a ausência de coordenação e sincronia conjunta inerentes da outra categoria é compensada pela grande flexibilização na alteração da topologia física da rede: como o acesso ao meio se dá de maneira aleatória, nenhum outro dispositivo será obrigado a se reconfigurar para que a rede continue operacional, sendo necessária apenas por motivos de otimização. Porém este protocolo

é afetado por um problema denominado escuta ociosa (*idle listening*), no qual o rádio se mantém ativo na espera de uma comunicação, mesmo que não ocorram. Numa RSSF os eventos são relativamente raros de se ocorrer, e a limitação energética característica desse tipo de rede exige que os protocolos apropriados otimizem o uso do rádio. A adoção de um ciclo de trabalho em que o nó sensor permanece em modo de baixo consumo durante a maior parte do período enquanto no resto ele volta ao modo de escuta é uma prática indispensável para esse tipo de abordagem. Afinal, as escutas ociosas são um dos maiores causadores de desperdício de energia em uma RSSF (BANđUR et al., 2019).

Este tipo de protocolo também é afetado pelo problema das colisões, que ocorrem por não haver um nó centralizador que administra e agenda as transmissões, logo, haverá frequentes disputas para a realização de transmissões. Normalmente este problema é reduzido pela utilização da técnica de CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), cujo princípio básico é o mesmo que o CSMA padrão, diferindo-se apenas pelo fato de que o adiamento se dá a partir da adoção de um tempo de espera aleatório antes de uma nova tentativa. Isso reduz significativamente as chances de uma colisão (KUROSE; ROSS, 2012).

No entanto, as chances de colisão nessa abordagem, apesar de serem reduzidas, não são completamente eliminadas. O problema do terminal oculto (*hidden terminal*) é a principal fonte de colisões numa comunicação que funciona sob CSMA/CA:

Figura 2.7 – O problema do terminal oculto.



Fonte: Elaborada pelo autor

Aqui, S1 e S2 precisam transmitir uma mensagem simultaneamente. Supondo que pelo menos um deles queira se comunicar com T, que está no alcance dos dois, como S1 e S2 estão fora do alcance do rádio um do outro, ambos assumem que o canal está livre e então ambos iniciam suas transmissões. Isso fará com que T receba uma mensagem corrompida pela in-

interferência de dois sinais. O problema do terminal oculto pode ser resolvido com a adoção do mecanismo RTS/CTS (*Ready To Send / Clear To Send*) (IEEE, 2016), no qual são enviados quadros de controle que permitem que o transmissor reconheça que houve uma colisão, permitindo que decisões de contingência sejam tomadas.

Em suma, os protocolos MAC assíncronos oferecem vantagens bastante atrativas no campo das RSSFs porque tratam de maneira natural as suas principais necessidades e deficiências, quando comparadas às redes cabeadas ou de alta disponibilidade energética. Um protocolo apropriado para RSSFs deve ser escalável, ser capaz de evitar colisões (bem como lidar com as eventuais colisões de maneira efetiva), usar de maneira eficiente o canal de transmissões, e lidar com a escassez energética a partir de um uso racionado e efetivo das reservas, reduzindo desperdícios. (POLASTRE; HILL; CULLER, 2004).

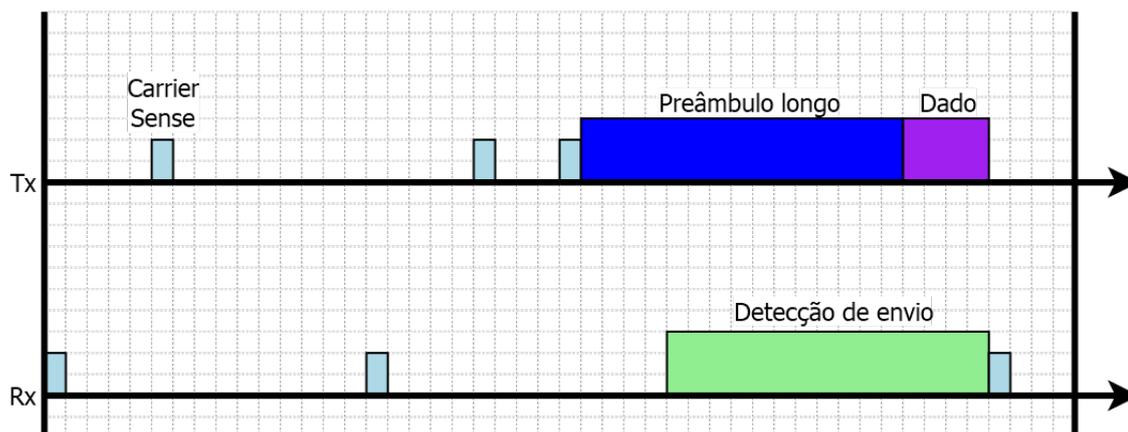
### 2.5.1 Primeiras Soluções MAC nas RSSFs

No campo das RSSFs, um dos primeiros protocolos a ser desenvolvido foi o S-MAC (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002), um protocolo de período ativo comum que utiliza a abordagem de ciclos de trabalho. Neste protocolo, os nós verificam periodicamente se há uma requisição de transmissão a eles, e caso não haja, volta ao estado de *stand-by* com o rádio desligado para poupar energia. Aqui o uso de ciclos de trabalho reduz o *idle listening* em troca de admitir uma latência maior nas transmissões. Os ciclos de trabalho são sincronizados em grupos de nós, que ocorrem através de mensagens SYNC, que são enviadas entre os vizinhos no período para sincronizações. Este protocolo utiliza CSMA/CA e é *unicast* - isto é, os saltos (*hops*) nas transmissões ocorrem apenas entre o encaminhador da mensagem e um único nó vizinho escolhido para rotear a mensagem.

No entanto, a implementação do S-MAC era complexa. Ele faz com que as aplicações dependam das políticas de seu funcionamento enquanto as condições dos nós e da rede mudam constantemente, colocando dessa forma restrições na sua adaptabilidade e escalabilidade. Foi então sugerido o B-MAC (POLASTRE; HILL; CULLER, 2004), um protocolo assíncrono de amostragem de preâmbulo caracterizado por ser de implementação mais simples, que deixa as tarefas de roteamento e sincronização nas camadas superiores. O B-MAC usa avaliação de canal livre (CCA - *Clear Channel Assessment*) ao invés do sistema RTS-CTS: quando um nó deve se comunicar, ele realiza um *carrier sense* (CS) para verifica se há outras transmissões. Caso não haja, ele envia um preâmbulo longo - com a mesma duração de um ciclo completo - e

então envia a mensagem de dados. O uso do preâmbulo longo aqui serve para certificar de que o receptor esteja com seu rádio ligado para receber o pacote de dados. A Figura 2.8 ilustra a comunicação de um nó transmissor (Tx) com um nó receptor (Rx) sob o protocolo B-MAC:

Figura 2.8 – Uma transmissão sob o protocolo B-MAC.



Fonte: Elaborada pelo autor

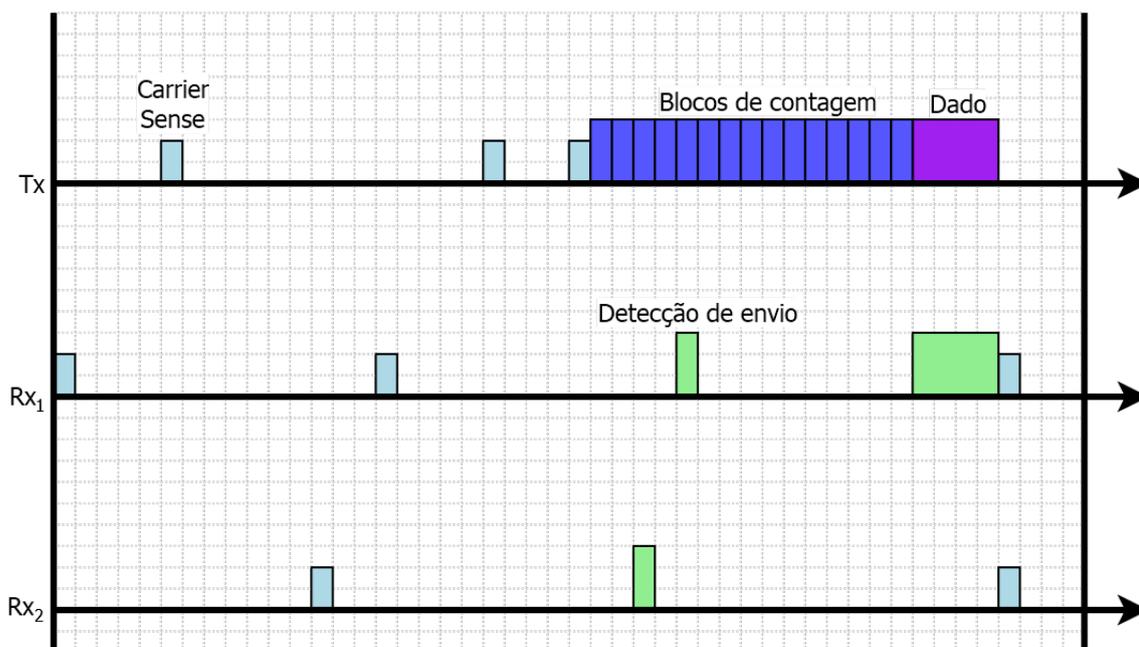
Como se pode ver, não foram utilizadas mensagens de controle como ACK depois da transmissão. O nó receptor (RX), ao entrar em *carrier sense* detectou um envio de mensagem em progresso (não importando se é preâmbulo ou dado), e irá permanecer ativo até que o sinal de envio deixe de ser detectado. Ao passo que o protocolo de fato é mais simples e adaptável que o anterior, existem alguns problemas. O *overhearing* pode afetar fortemente, pois o mesmo princípio que garante que Rx receba a mensagem direcionada a ele, faz com que um nó terceiro não intencionado receba a mesma transmissão, e como ele só reconhece o destinatário após receber o dado, fica caracterizado o desperdício de energia.

### 2.5.2 O Avanço dos Protocolos com Amostragem de Preâmbulo

O problema com o *overhearing* motivou outros autores a buscar uma forma de evitar o desperdício de energia fazendo com que um nó não intencionado reconheça com antecedência quando a mensagem não se dirige a ele. O protocolo assíncrono B-MAC+ (AVVENUTI et al., 2007) propõe uma forma de fazer com que os nós receptores poupem mais energia dividindo o preâmbulo longo da versão padrão em uma rajada de blocos de contagem, contendo um contador representando a quantidade restante de preâmbulos curtos até a transmissão do dado e o endereço do *hop* destinatário. Após o recebimento do bloco de contagem, o receptor verifica se é o destinatário. Caso seja (Figura 2.9, nó  $Rx_1$ ), seu rádio é desligado durante o tempo calculado a partir da quantidade de preâmbulos restantes até o início da transmissão do dado pelo emissor,

reativando seu rádio ao final deste intervalo para receber o pacote. Caso não seja (Figura 2.9, nó  $Rx_2$ ), o nó volta a desligar seu rádio e continua seu ciclo de funcionamento normalmente, reduzindo consideravelmente o desperdício por *overhearing*.

Figura 2.9 – B-MAC+, com Tx transmitindo a  $Rx_1$



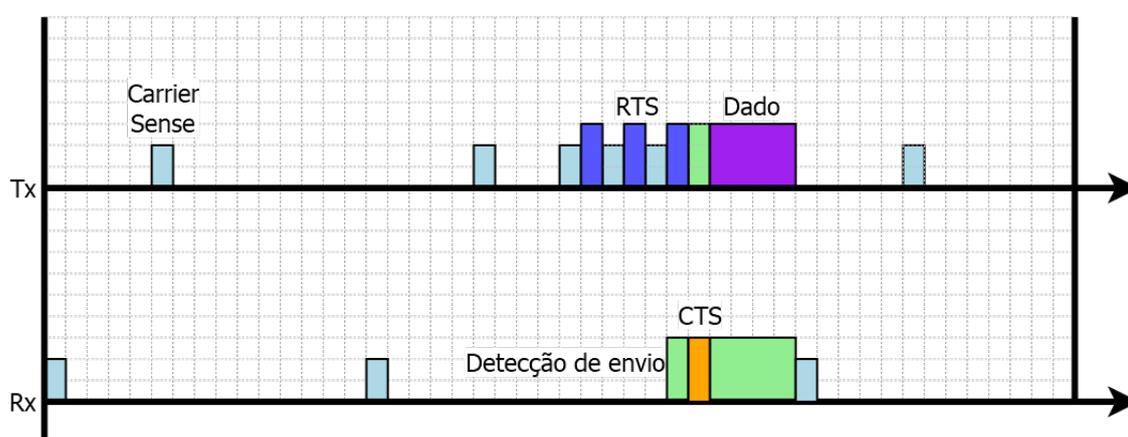
Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 2.9, percebe-se que  $Rx_2$  detectou o envio de um bloco de contagem, mas verificou que o destinatário era  $Rx_1$ , mantendo-se em estado de baixo consumo pelo menos até o fim da transmissão.

O foco do B-MAC+ foi na economia de energia do receptor, mas o transmissor não foi poupado com o envio de vários preâmbulos, apresentando o mesmo padrão de consumo no emissor que o B-MAC, sem contar na alta latência de transmissão provocada pela emissão contínua desnecessária de preâmbulos curtos (ou com o envio de um preâmbulo longo como nas abordagens anteriores). Um protocolo que melhora a eficiência energética nos transmissores e receptores é o X-MAC (BUETTNER et al., 2006). Este protocolo também assíncrono utiliza mensagens de controle para otimizar o envio de preâmbulos curtos quando o transmissor precisa iniciar uma comunicação, intercalando o envio de um preâmbulo curto no formato de RTS contendo o endereço do destinatário com um período igualmente curto de escuta, na espera de um CTS de seu transmissor (o CTS no X-MAC também é referido como *early ACK*, por se tratar de uma mensagem ACK recebida antes de se esgotar a quantidade máxima de preâmbulos, que é calculada com base no tempo de ciclo). Caso receba o CTS, inicia-se imediatamente o

envio do dado. Sem receber um CTS após esgotada a contagem máxima de RTS, o nó aguarda um período para tentar se comunicar novamente. No lado do receptor, se em seu ciclo durante o período de escuta for detectado um RTS, o endereço é verificado. Caso haja correspondência com seu endereço, imediatamente é enviado um CTS, e então entra em escuta novamente para receber o dado. Caso contrário, o nó desliga seu rádio e prossegue seu ciclo. A Figura 2.10 ilustra uma transmissão em X-MAC. Percebe-se o adiantamento no envio do pacote por parte do transmissor, bem como a agilidade do receptor em responder ao RTS e receber o pacote. Além de economizar energia, foi reduzida a latência quando comparado aos protocolos anteriores.

Figura 2.10 – Uma transmissão sob o protocolo X-MAC

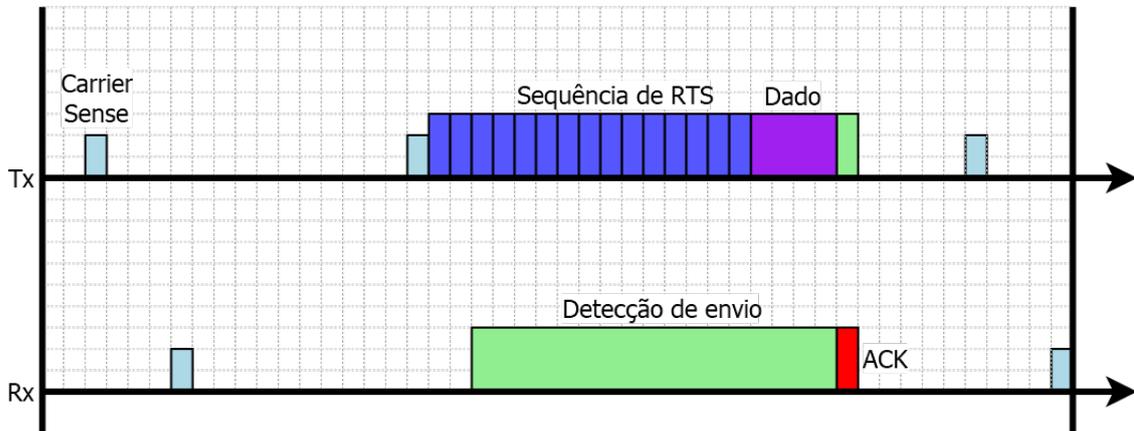


Fonte: Elaborada pelo autor

Uma abordagem um pouco diferente da utilizada no X-MAC foi explorada num protocolo de abordagem híbrida proposto anteriormente por (EL-HOIYDI et al., 2003). Denominado WiseMAC, este protocolo tem o funcionamento básico semelhante ao B-MAC, por exemplo, no sentido que um nó transmissor utiliza de um preâmbulo longo (ou uma série de preâmbulos curtos) que se estende pelo período de um ciclo completo ao iniciar a transmissão, e em seguida envia o dado. Porém ao final disso, o transmissor espera um quadro de confirmação (ACK), que além de certificar o êxito no envio, possui uma informação sobre o horário do ciclo do nó receptor. A partir disso, todas as transmissões para tal receptor serão iniciadas próximo ao seu horário de acordar, além de usar um preâmbulo encurtado (ou reduzir a quantidade de preâmbulos curtos) antes do envio do dado. O nó transmissor guarda as informações sobre o ciclo de cada nó vizinho em uma estrutura de dados, e essa informação é sempre atualizada a cada transmissão no ACK, eliminando um *overhead* de mensagens de sincronia desnecessárias. A Figura 2.11 ilustra uma comunicação em que o transmissor *Tx* ainda não conhece o período

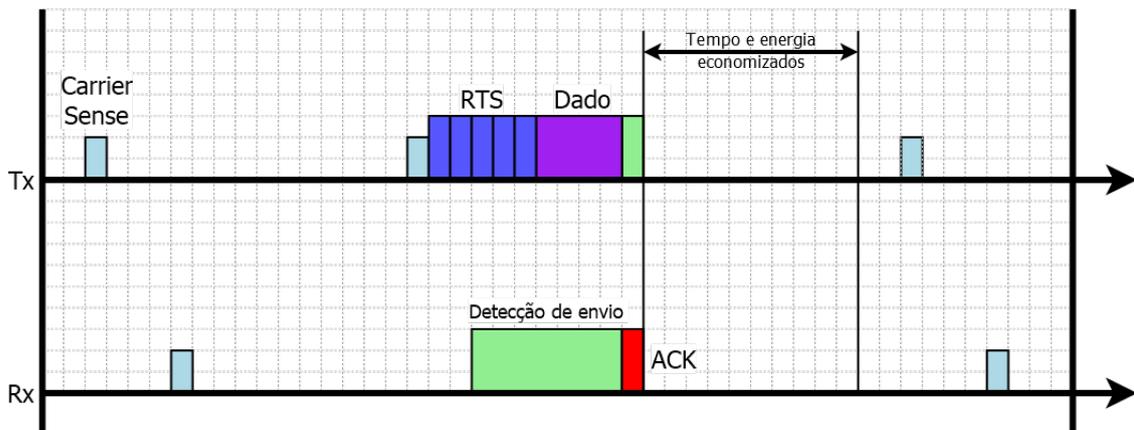
do receptor  $Rx$ , e a Figura 2.12 ilustra uma segunda transmissão, já sincronizada, de onde é possível ver uma redução de latência e de consumo tanto em  $Tx$  quanto em  $Rx$ :

Figura 2.11 – Protocolo WiseMAC antes da sincronia.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 2.12 – Protocolo WiseMAC depois da sincronia.



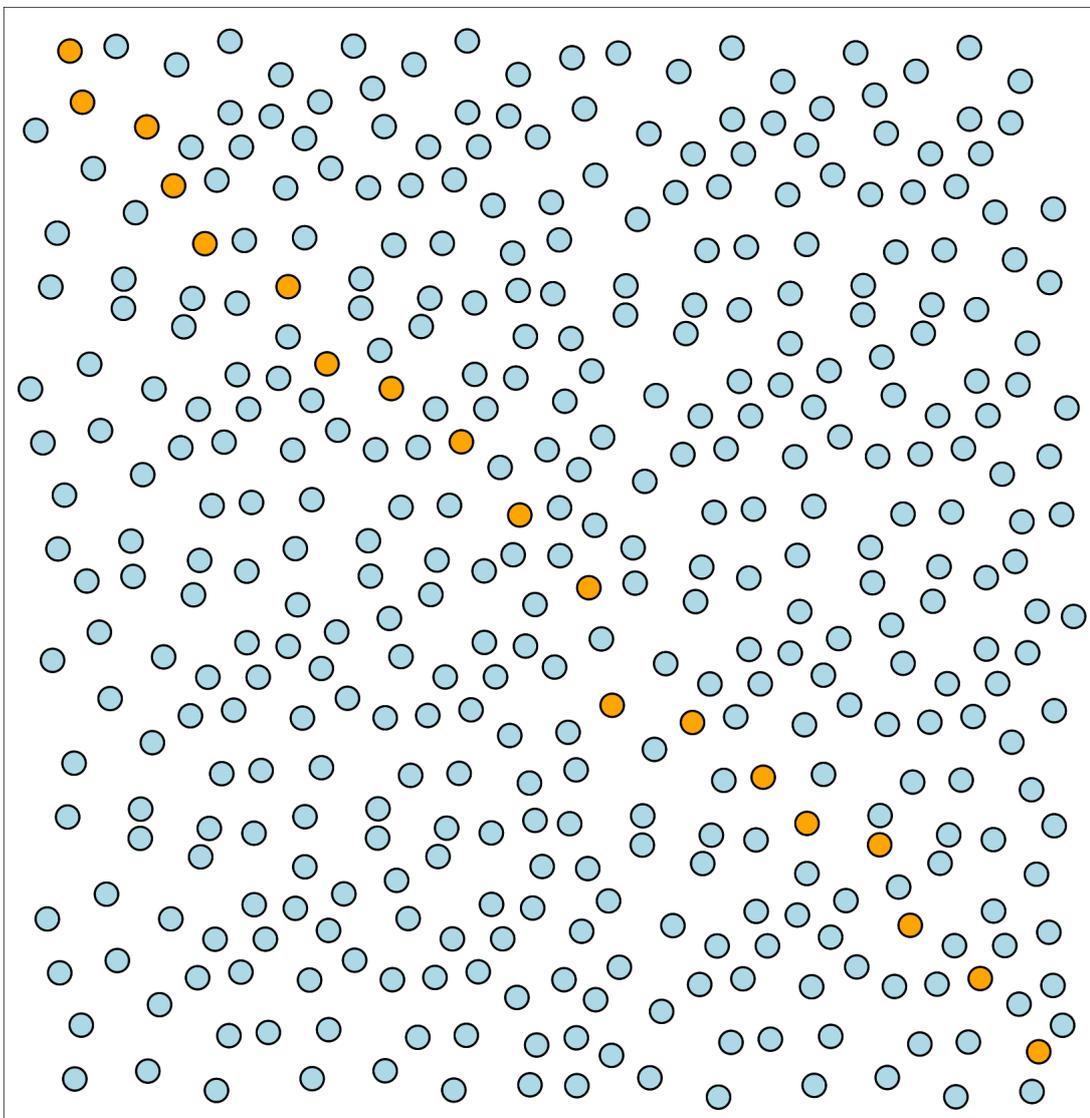
Fonte: Elaborada pelo autor

### 2.5.3 Escalonamento em Protocolos MAC

O *sleep delay* é um problema que sempre estará presente em protocolos adaptados para sistemas que visam economizar energia. Algumas propostas de melhoria consistem em reduzir o ciclo de funcionamento de determinados nós sensores, tornando mais frequentes as verificações por comunicação no canal, reduzindo a latência mas a custo de um maior consumo. Outra maneira de abordar o *sleep delay* é alinhar o ciclo de uma série de sensores sem alterar suas durações, resultando numa técnica denominada *escalonamento*. Essa técnica, apesar de simples, pode impactar fortemente no desempenho da rede, beneficiando muito determinadas aplicações.

Um exemplo de técnica que utiliza escalonamento foi proposto por (SOARES, 2018). O protocolo *cross layer B Wise (Backboned WiseMAC)* conta com dois tipos de nó: O nó tipo 1, cujo funcionamento é regido pelo WiseMAC padrão, e o nó tipo 2, que está dentro de uma estrutura de alta velocidade denominada *backbone*, na qual os períodos dos nós estão em sincronia, com um nó acordando logo após o outro, fazendo com que as transmissões sejam realizadas com um mínimo de atraso em uma direção. Apesar de os nós estarem diferenciados por tipo, eles são fundamentalmente iguais, todos tem o potencial de se tornarem tipo 1 ou 2. O backbone é ilustrado na Figura 2.13:

Figura 2.13 – RSSF com um *backbone* B Wise

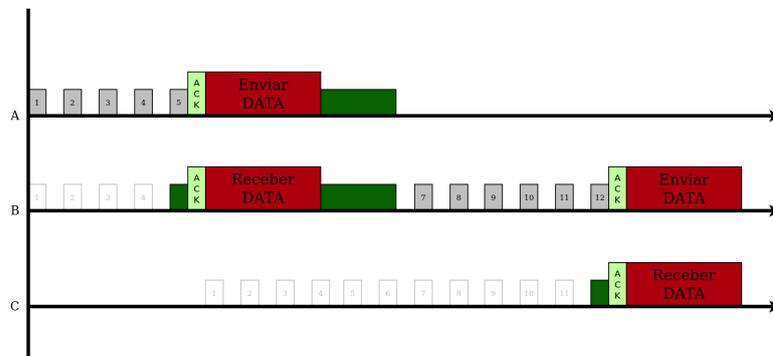


Fonte: Elaborada pelo autor

### 2.5.4 O Protocolo EX-MAC

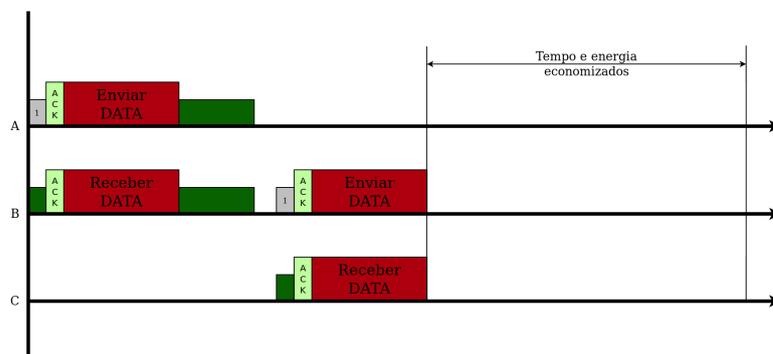
Uma adaptação do protocolo X-MAC utilizando sincronização de ciclos de trabalho foi elaborada por (HONG; KIM, 2009). O EX-MAC, como foi proposto pelos autores, é fundamentalmente semelhante ao protocolo de base, utilizando rajadas de preâmbulos, quadros de controle RTS-CTS e um *duty cycle* que consiste na maior parte do tempo em estado dormente. A diferença é que nos quadros de RTS estão inclusos não somente o identificador do *hop* destinatário, como também um contador de quantos preâmbulos foram utilizados até o momento. O próximo *hop*, após receber o RTS, utiliza este contador para calcular um valor de ajuste para o início de seu ciclo, fazendo-o coincidir com o envio do primeiro preâmbulo que partiu do nó anterior. Como este processo ocorre em cadeia, a cada transmissão realizada surge um caminho sincronizado do remetente ao nó destinatário, em que os dados trafegam em alta velocidade sem ter sido necessário alterar o ciclo dos nós. Ao utilizar essa estrutura em uma RSSF que conta com um ou mais *sinks*, o *throughput* da rede cresce drasticamente no sentido deles (HONG; KIM, 2009). Observe as Figuras 2.14 e 2.15 a seguir:

Figura 2.14 – EX-MAC: Primeira transmissão no caminho  $A \rightarrow B \rightarrow C$ .



Fonte: Adaptado de (HONG; KIM, 2009)

Figura 2.15 – EX-MAC: Segunda transmissão no caminho  $A \rightarrow B \rightarrow C$ .



Fonte: Adaptado de (HONG; KIM, 2009)

O protocolo proposto neste trabalho visa reduzir a latência de pacotes em cenários sem a presença de unidades *sink*, onde as comunicações ocorrem entre nós aleatórios, com o mínimo impacto no consumo energético. Este protocolo consiste na junção do X-MAC com a ideia de reserva de caminho do EX-MAC em determinadas vias de comunicação, resultando numa abordagem híbrida, em que os nós funcionam geralmente sob um regime assíncrono, mas com a adoção de sincronia em determinadas circunstâncias, como será visto no Capítulo 3.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia associada no trabalho na busca dos objetivos. Primeiro é apresentada a classificação da pesquisa quanto à natureza, ao objetivo e aos procedimentos. Em seguida são descritos os procedimentos metodológicos utilizados durante a pesquisa.

#### 3.1 Tipo de pesquisa

O presente trabalho é de natureza aplicada, de caráter exploratório, de abordagem quantitativa apoiada em procedimentos experimentais voltados ao *design science*.

Segundo sua natureza, é uma pesquisa aplicada, pois utiliza de verdades e interesses locais, com objetivo de aplicação imediata que gere conhecimento para uso prático.

A pesquisa tem objetivo exploratório, porque foi motivada pela necessidade de buscar pela solução de um problema na tecnologia estudada através de alguma inovação na sua metodologia.

Quanto à abordagem, essa é uma pesquisa quantitativa, pois tem como objetivo quantificar o problema, entender a dimensão dele e comparar estatisticamente o cenário submetido à metodologia anterior e posterior à inovação. Em suma, esse tipo de pesquisa fornece informações numéricas sobre o desempenho da tecnologia observada.

E finalmente quanto aos procedimentos, é uma pesquisa experimental orientada ao *design science* porque ela se dá através da observação e manipulação de variáveis relacionadas ao cenário do problema, focando no desenvolvimento e no desempenho de artefatos projetados com a intenção explícita de melhorar o desempenho funcional do artefato em si. O *design science* é bastante presente nos campos da Engenharia e em Ciência da Computação, apesar de não limitado a eles.

#### 3.2 Descrição da Solução

Este trabalho propõe o **HW-MAC** (*Highway X-MAC*), um protocolo *cross-layer* multicanal para redes de sensores sem fio baseado em X-MAC (BUETTNER et al., 2006), apresentando técnicas de roteamento inteligente e de controle de acesso ao meio. O HW-MAC basicamente coordena a distribuição de segmentos de *backbone* através do escalonamento de nós em linhas direcionadas pelo campo onde os sensores estão localizados. Uma vez que as estruturas são criadas, o protocolo gerencia um roteamento que maximiza o uso eficiente dos

*backbones*, objetivando a redução de latência em transmissões não dependentes de *sink*, *i.e.*, entre dois nós quaisquer da rede. Todos os nós operam basicamente sob o protocolo X-MAC, utilizando os mesmos padrões de transmissão e com quadros de controle semelhantes. A diferença está na adoção de mais de um único canal de transmissão (3 canais, como será visto mais adiante), e no fato de que os nós dos *backbones* operam com os períodos de seus ciclos sincronizados, baseando-se no modelo de controle de sincronia do EX-MAC (HONG; KIM, 2009), bem como a inclusão de um modelo de roteamento apropriado para a infraestrutura de rede proposta. A implementação do algoritmo proposto foi realizada utilizando-se o *Grubix*, que é um simulador de RSSFs baseado em eventos. O simulador *Grubix* é derivado do simulador *Shox* (LESSMANN; HEIMFARTH; JANACIK, 2008).

### 3.3 Distribuição dos *Backbones*

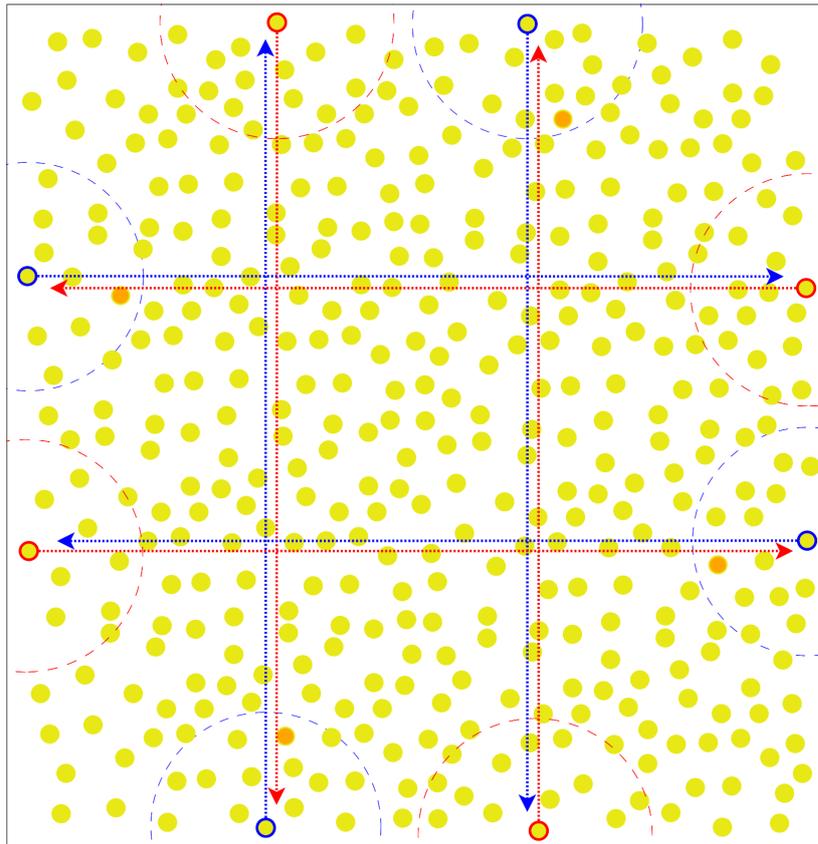
Numa aplicação de RSSFs contendo *backbones*, essas estruturas podem ser distribuídas estática ou dinamicamente. A distribuição estática implica em posicionar fisicamente os dispositivos já preparados para operar como nós *backbone*, enquanto na distribuição dinâmica os nós se ajustam e elegem os componentes do *backbone* sem manipulação externa. Para simplificar o processo de desenvolvimento deste protocolo, foi utilizada uma abordagem híbrida, onde os nós iniciais, que serão denominados *nós-raiz*, são pré-selecionados, e os demais são escolhidos conforme as especificações dos segmentos de *backbone* da qual farão parte. Os detalhes serão vistos mais adiante. Note que essa pré-seleção inicial poderia ser substituída por uma abordagem totalmente dinâmica a partir de sistemas de eleição para nós-raiz.

Uma rede que opera sob o protocolo HW-MAC passa por duas fases, com a primeira sendo a fase de configuração, e a segunda sendo a fase de operação. Na fase de configuração, os *backbones* são distribuídos e ajustados, e na fase de operação a rede trabalha como deveria, detectando eventos e trocando informações, utilizando a estrutura de transmissão desenvolvida na fase anterior. A fase de configuração será descrita como a seguir.

No início, oito nós são pré-selecionados, posicionados de forma que ao traçar linhas imaginárias entre os seus extremos opostos, dividem o campo em nove áreas iguais. Esses serão os nós-raiz de seus segmentos de *backbone*, denotados por  $S$ , e a conversão deles é anunciada aos vizinhos em uma mensagem *broadcast* que leva consigo também o identificador (*id*) do próximo nó que fará parte do segmento, denotados por  $T$ , junto a dois campos, com um informando a hora em que a transmissão para  $T$  ocorreu e o outro com a próxima hora que  $S$

irá acordar. O vizinho extrai o *id* do emissor do *broadcast* e o armazena numa lista de vizinhos *backbone* para utilizar mais tarde em operações de roteamento, e a seleção do próximo *hop* sincronizado será relativa à direção de crescimento do *backbone*, predeterminada para cada um dos oito nós iniciais. Essa etapa é ilustrada pela Figura 3.1.

Figura 3.1 – Formação de *backbones* no HW-MAC



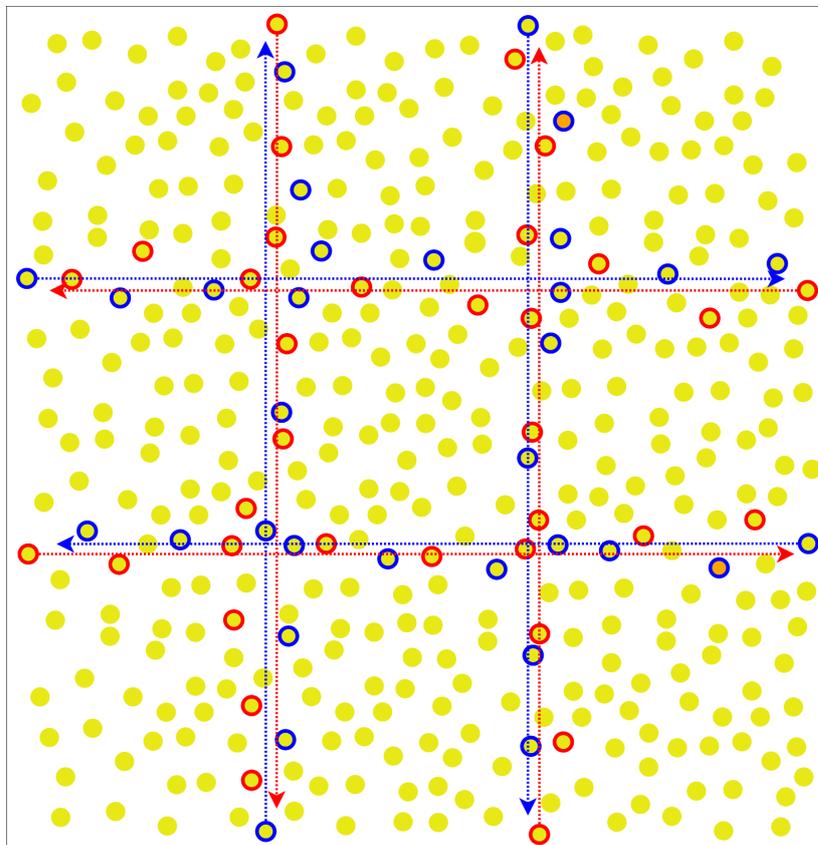
Fonte: Elaborada pelo autor

O próximo nó selecionado será o vizinho que mais se aproximar de uma projeção da posição de *S* no lado oposto. Os círculos de coloração laranja na Figura 3.1 representam *T*, os próximos a entrar no *backbone*. Os *backbones* continuarão a se expandir até que se atinja um limite de avanço predeterminado, fazendo com que a configuração final do campo após a execução da heurística de propagação seja similar à ilustrada na Figura 3.2. Essa forma de distribuição em particular foi escolhida pelo fato de cruzar uma grande proporção do campo, aumentando dessa forma as chances de que os *backbones* sejam usados nas opções de roteamento.

É importante ressaltar que como os segmentos de *backbone* funcionam sob o princípio da sincronia, eles são intrinsecamente unidirecionais, isto é, são capazes de transmitir com baixíssima latência em um sentido, mas uma transmissão no sentido contrário terá o efeito exatamente oposto, porque neste caso o próximo *hop* entraria em *sleep* exatamente no momento do

nó atual entregar o dado a ele, tendo que esperar praticamente um ciclo completo para conseguir enviar o pacote. Vale ressaltar também que o protocolo HW-MAC cria duas vias opostas de *backbone* próximas uma da outra, fazendo com que os segmentos sejam *virtualmente* bidirecionais. Cada via opera em uma frequência diferente, que por sua vez são diferentes da frequência utilizada pelos nós que não pertencem às cadeias de *backbones*, reduzindo as chances de possíveis colisões em casos de transmissões simultâneas. Observados os fatos, em todas figuras ilustrativas deste capítulo os círculos de coloração *amarela* representam nós denominados *commons* que operam no *canal A*, os círculos de coloração *azul* são os *backbones tipo I* que operam no *canal B*, e os círculos de coloração *vermelha* são os *backbones tipo II* que operam no *canal C*. Observe que no centro da Figura 3.2 os segmentos azuis sobrepostos formam um ciclo de condução no sentido horário, enquanto os segmentos vermelhos sobrepostos formam um ciclo de condução no sentido anti-horário. Toda vez que for necessário um nó de um determinado canal se comunicar com um de outro canal, seu rádio será ajustado para alcançar seu destino, e após o envio da mensagem, seu canal original é restaurado.

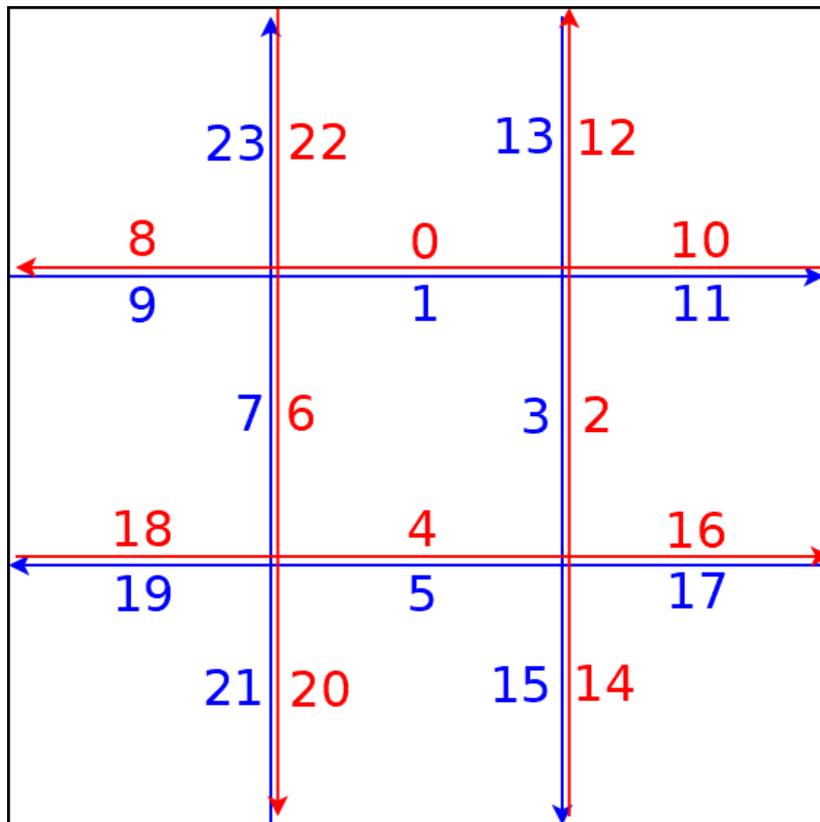
Figura 3.2 – Rede com *backbones* distribuídos



Fonte: Elaborada pelo autor

Esta sobreposição de segmentos de *backbone* é possível e não prejudica os segmentos envolvidos porque cada nó interno tem conhecimento do seu antecessor, e a sincronia é mantida a cada transmissão ocorrida dentro da cadeia, com os dados de sincronismo inclusos em quadros de controle. Toda a infraestrutura lógica construída pela formação dos *backbones* pode ser representada conforme a Figura 3.3. Os subsegmentos de numeração par são formados por nós do *canal B*, enquanto os subsegmentos de numeração ímpar são formados por nós do *canal C*.

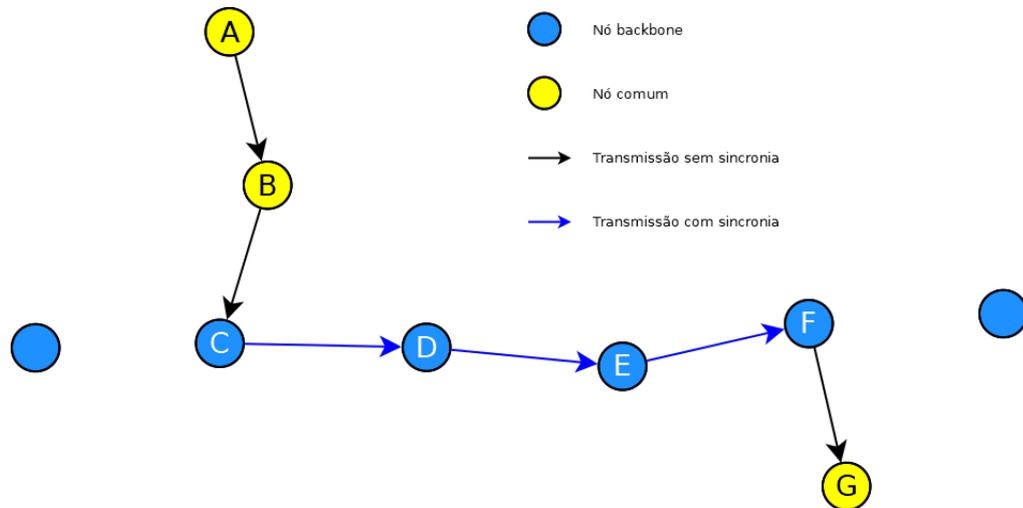
Figura 3.3 – Os subsegmentos dos *backbones*



Fonte: Elaborada pelo autor

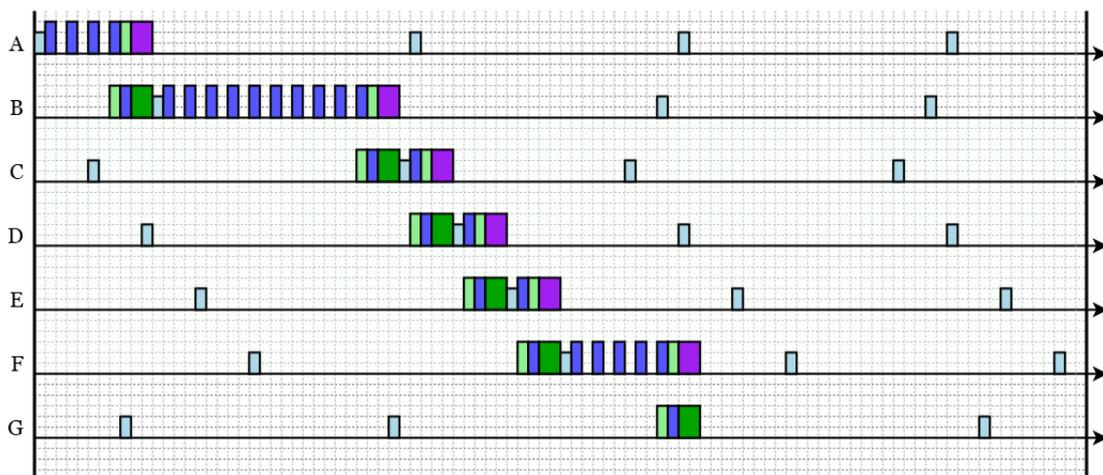
A Figura 3.5 ilustra uma transmissão do nó *A* ao nó *G*, passando por alguns *hops*, dos quais *C*, *D*, *E* e *F* são nós internos consecutivos do mesmo segmento de *backbone*. A figura 3.4 demonstra as atividades desempenhadas por cada nó na transmissão. Note a diferença na quantidade de preâmbulos usados em transmissões entre nós comuns e entre os sincronizados. Note também que a sincronia dos nós internos é mantida após as transmissões, principalmente quando se compara *A* e *B*, nós externos cujas prospecções de canal após a transmissão após o envio da mensagem se deram exatamente após o período de 1 ciclo, com *F*, que descontou o tempo gasto na transmissão a *G* de seu tempo de dormir. Mais detalhes acerca do comportamento do ciclo dos nós e do cálculo utilizado para a sincronia serão vistos mais adiante.

Figura 3.4 – Transmissão do nó A ao nó G



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3.5 – Gráfico de sincronia



Fonte: Elaborada pelo autor

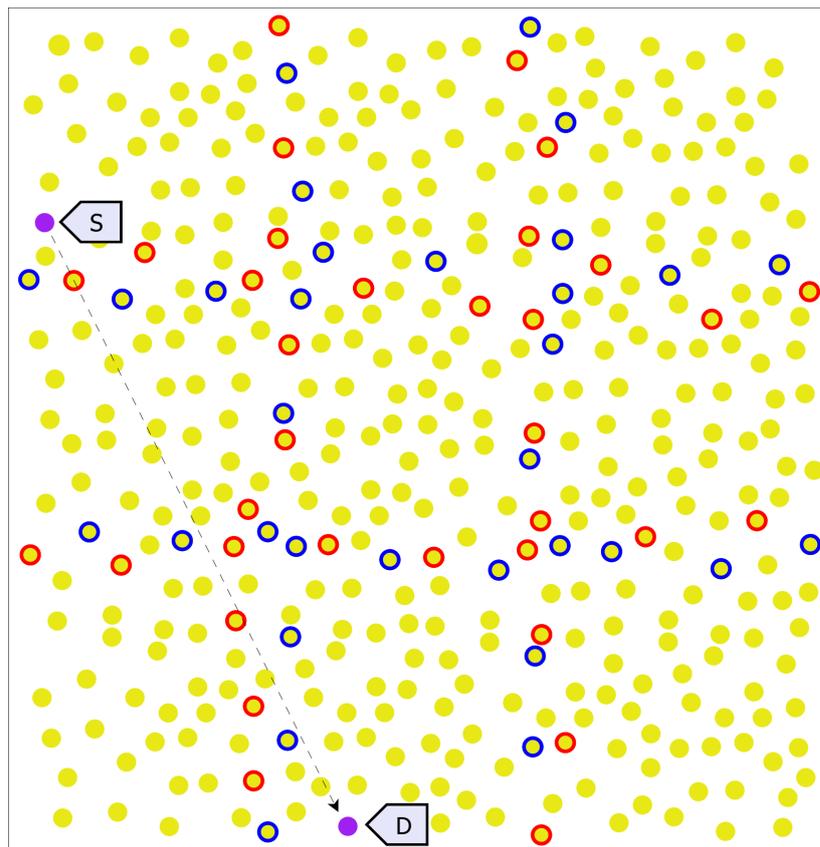
### 3.4 Roteamento no HW-MAC

O protocolo proposto utiliza como base um roteamento geográfico guloso, semelhante ao GPSR. Denominaremos apenas como *geo-rooteamento*. Como este protocolo foi desenvolvido considerando utilizá-lo em redes com alta densidade de nós, não foi implementada uma técnica para lidar com o aprisionamento de uma transmissão com o nó atual em mínimo local (confira o Capítulo 2 Subsecção 2.3.1 para mais informações).

### 3.4.1 Visão Geral

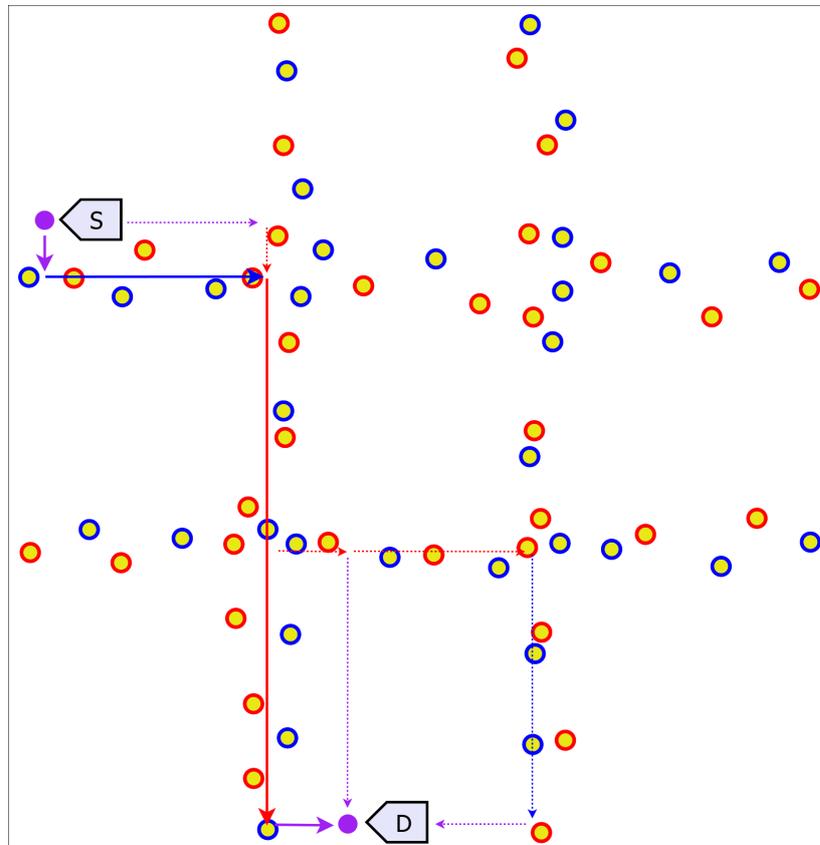
Para realizar uma transmissão de ponta a ponta, o HW-MAC define que a estratégia de envio será determinada no nó fonte apenas uma vez. Após a escolha, os outros *hops* da rede saberão o que fazer com base no tipo do pacote da camada de Rede foi recebido por eles. Considere o seguinte cenário: Um nó  $S$  detectou eventos e deve enviar os dados do sensor a um nó destinatário mais próximo de uma região de coordenadas específicas no campo, longe do alcance de seu rádio. Considere este nó destinatário como sendo  $D$ .  $S$  então deve calcular o custo para enviar a mensagem àquelas coordenadas via geo-roteamento (Figura 3.6) e calcular o custo de envio dentro dos *backbones* encadeados (Figura 3.7). O método de envio que apresentar o menor custo será escolhido.

Figura 3.6 –  $S$  precisa transmitir dados para  $D$



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 3.7 apresenta diversos caminhos possíveis para a mensagem ser transmitida no *backbone*. O caminho evidenciado pelas retas contínuas é o que possui menor custo, e as cores das retas simbolizam o tipo de *backbone* no qual os dados irão trafegar. A seleção do melhor caminho será descrita com mais detalhes na Subsecção 3.4.2.

Figura 3.7 – Rotas possíveis de  $S$  para  $D$ 

Fonte: Elaborada pelo autor

Caso o menor custo de envio seja via *backbones*, o pacote a ser despachado pela camada de rede contará com uma coordenada de entrada e uma lista de direções. A coordenada de entrada é a localização aproximada da entrada do segmento de *backbone* que compõe o caminho de menor custo. A lista de direções auxilia a mudança de segmentos de *backbone* quando necessário. Quando a lista possui elementos e o nó atual não é um nó *backbone* (nó interno), significa que a mensagem ainda precisa entrar no *backbone*, portanto o nó deve usar o geo-roteamento para levar o pacote para um nó vizinho que esteja mais próximo da entrada, até encontrar um vizinho que seja nó interno. Se o nó atual é um nó interno e a lista está vazia, a mensagem continuará a ser conduzida dentro da cadeia sincronizada até que a distância Euclidiana entre o próximo nó da cadeia e  $D$  seja maior que a do nó atual com  $D$ . Neste caso, aplica-se o geo-roteamento até chegar em  $D$ .

Caso o menor custo de envio seja via geo-roteamento, o pacote da camada de rede não irá conter lista de direções nem coordenadas de entrada. Os *hops* entendem que será preciso procurar o vizinho mais próximo do destino.

### 3.4.2 Descrição dos Cálculos

O geo-roteamento se baseia no cálculo da menor distância entre dois pontos. Considere a equação da distância Euclidiana:

$$d_{AB} = \sqrt{(A_x - B_x)^2 + (A_y - B_y)^2} \quad (3.1)$$

Onde  $A$  e  $B$  são dois pontos definidos pelas coordenadas  $(A_x, A_y)$  e  $(B_x, B_y)$ . O geo-roteamento consiste na escolha do nó vizinho cujo cálculo de sua distância Euclidiana até o objetivo resulte no menor resultado dentre todos. Este cálculo acontece a cada *hop* da comunicação.

O roteamento do HW-MAC possui dois modos de operação: O primeiro modo é executado quando um nó fonte ( $S$ ) deseja enviar um dado para um nó objetivo ( $D$ ). O segundo modo é executado quando um nó intermediário da comunicação deve transmitir adiante o pacote que saiu de  $S$  para  $D$ . Aqui serão tratadas as particularidades do primeiro modo.

No primeiro modo, o nó  $S$  decide o método de roteamento da mensagem: Se ela será enviada utilizando geo-roteamento, ou se ela será encaminhada pelos *backbones*. A decisão é tomada escolhendo o menor custo de envio dentre os dois métodos. Na Fórmula 3.2,  $C(S, D)$  será o custo estimado do método escolhido para enviar de  $S$  para  $D$ ,  $C_{GR}$  é o custo estimado para enviar via geo-roteamento e  $C_{BB}$  é o custo estimado de se enviar via *backbones*:

$$C(S, D) = \min [C_{GR}(S, D), C_{BB}(S, D)] \quad (3.2)$$

Os custos de envio pelo geo-roteamento direto e pelos *backbones* são, respectivamente:

$$C_{GR}(S, D) = \frac{d_{SD} \times \bar{P}_N}{\bar{H}} \quad (3.3)$$

$$C_{BB}(S, D) = \min_{\substack{\forall i \in I \\ \forall j \in O}} \left[ C_{GR}(S, P_i) + C_{GR}(P_j, D) + \frac{D_{ij} \times \bar{P}_{BB}}{\bar{H}} \right] \quad (3.4)$$

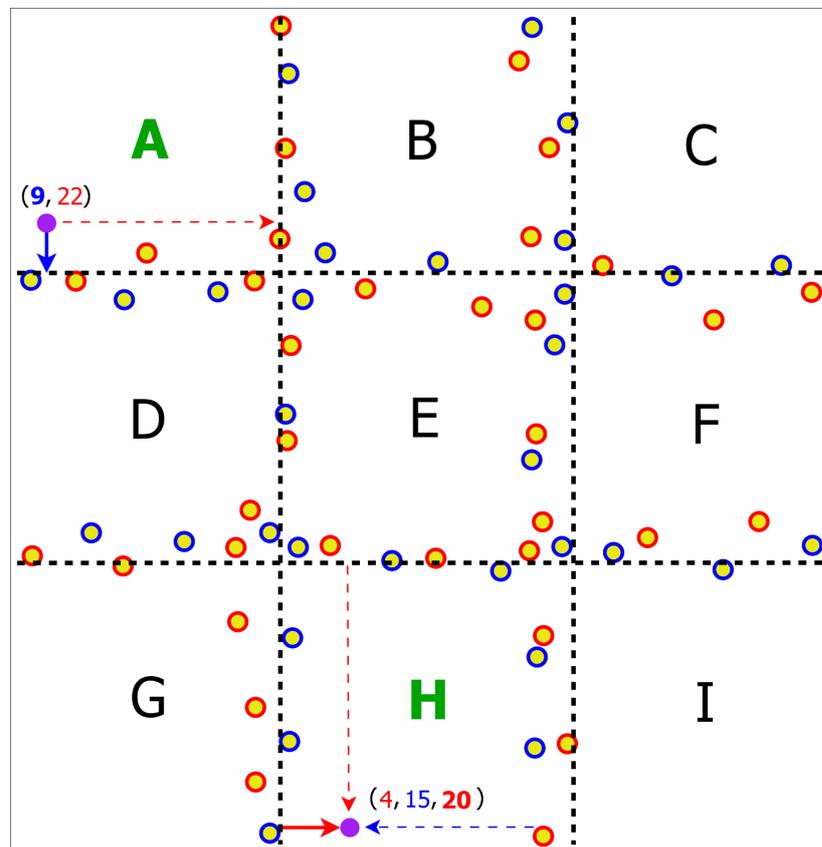
Onde  $\bar{P}_N$  é o número médio de preâmbulos gastos em uma transmissão entre dois nós comuns (*i.e.*, sem sincronia),  $\bar{P}_{BB}$  é a média de preâmbulos usados em uma transmissão interna ao *backbone* encadeado,  $P_i$  e  $P_j$  são, respectivamente, os pontos de entrada e de saída do *backbone*,  $\bar{H}$  é a distância média percorrida em um *hop* que utiliza geo-roteamento.

$D_{ij}$  é a aplicação do algoritmo *Dijkstra* a partir dos pontos  $P_i$  e  $P_j$ , gerando como resultado a soma das distâncias Euclidianas entre os pontos de intersecção dos subsegmentos de *backbone*:

$$D_{ij} = Dijkstra(P_i, P_j) \quad (3.5)$$

Para calcular o custo de envio pelo *backbone* é necessário escolher a rota mais conveniente dentro dos nós encadeados. Primeiro é obtido uma lista dos subsegmentos disponíveis para a região do transmissor e do receptor.

Figura 3.8 – Divisão das regiões de acesso aos subsegmentos de *backbone*



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 3.8 mostra que os subsegmentos viáveis de entrada  $I = \{9, 22\}$  foram extraídos da região A e os subsegmentos viáveis de saída  $O = \{4, 15, 20\}$  foram extraídos da região H. Depois é calculado o custo de cada combinação das entradas com as saídas. O par que obtiver o menor custo será escolhido para ser comparado com o geo-roteamento simples.

### 3.5 Controle de Acesso ao Meio no HW-MAC

O HW-MAC se assemelha bastante ao X-MAC na maneira que realiza o gerenciamento do uso do meio de comunicação. Porém este protocolo é acrescido de duas funcionalidades: gestão do uso de canais e mudança de configuração de ciclos.

#### 3.5.1 *Cross-Layer*

O protocolo HW-MAC foi projetado fazendo uso de comunicação entre as suas camadas de operação. A abordagem *cross-layer* por comunicação permitiu poupar recursos computacionais através da simplificação do uso de estruturas de dados, envio de comandos para outras camadas e consultas *cross-layer*. A camada de Rede é capaz de fornecer para a camada MAC diversas informações importantes sobre a vizinhança do nó e seu próprio estado como um nó comum ou *backbone*.

#### 3.5.2 MAC Multicanal

A primeira funcionalidade acrescenta a capacidade de lidar com múltiplos canais de comunicação. Ao receber um pacote para o envio das camadas anteriores, o primeiro passo é obter o canal do próximo *hop* consultando a camada de Rede. Se o *id* do vizinho estiver contido na lista de *backbones* do tipo I, a camada MAC sinaliza à camada Física para que esta sintonize o rádio no *canal B*. Se estiver contido na lista de *backbones* tipo II, será sinalizada uma mudança para o *canal C*. Mas se não constar nas listas de vizinhos *backbone*, a frequência de sintonia a ser escolhida será do *canal A*. A mudança de frequência só ocorre dentro de um nó quando for necessário que ele transmita uma mensagem. Após a transmissão, a frequência original do nó é restaurada.

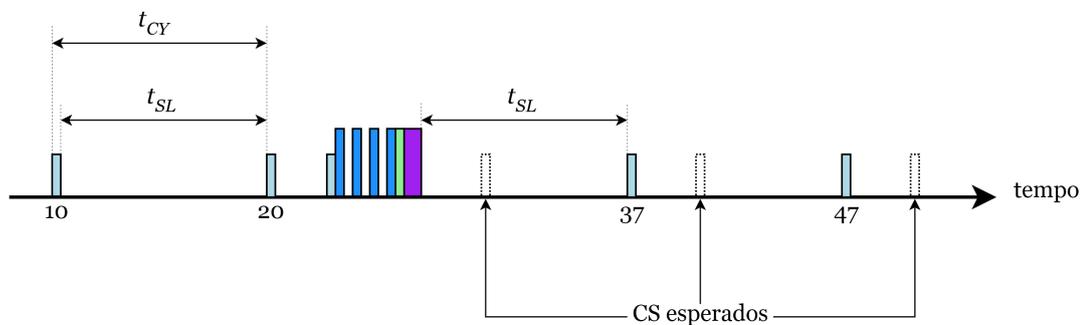
#### 3.5.3 Sincronização de Ciclos

A segunda funcionalidade diferencia os nós comuns dos nós *backbone*. Todos os nós comuns operam sob o mesmo regime de ciclos de trabalho, de forma que cada ciclo tem a duração ( $t_{CY}$ ) conforme a seguinte fórmula:

$$t_{CY} = t_{SL} + t_{CS} \quad (3.6)$$

Onde  $t_{SL}$  é o tempo de *sleep* e o  $t_{CS}$  é o tempo de escuta do canal (*carrier sense*). Em ocasião normal, os nós comuns tem seus tempos de *sleep* ajustados em um valor constante. Isso elimina a previsibilidade de seus comportamentos porque os tempos gastos entre emissões e recepções de quadros de controle e dados são somados ao ciclo, alterando o padrão com o qual eles ocorrem ao longo do tempo. A Figura 3.9 ilustra uma comunicação deslocando o início do ciclo em +7 unidades de tempo, evidenciando os instantes em que deveriam ocorrer eventos *carrier sense*. Note que isso ocorre porque o nó em questão utiliza a mesma quantidade de tempo de *sleep* sempre que termina suas operações.

Figura 3.9 – Mudança no padrão de ocorrência de um ciclo



Fonte: Elaborada pelo autor

Para que seja possível realizar uma sincronia entre os diversos nós, é preciso preservar o padrão de ocorrência de suas atividades. Isso é possível através do uso do relógio interno para que se possa ter uma referência de quando se deve acordar novamente.

Os nós *backbone*, ao se converterem, necessitam de duas informações: as marcações do relógio do nó anterior do momento em que este iniciou sua tentativa de comunicação ( $T_{nB}$ ), e do momento em que o nó anterior conseguiu estabelecê-la, ao receber o CTS ( $T_{nS}$ ). Essas informações são encapsuladas junto ao dado no quadro a ser enviado. Daí então, calcula-se o atraso ( $d_{comm}$ ) no recebimento:

$$d_{comm} = T_{nS} - T_{nB} \quad (3.7)$$

Este atraso é utilizado na fórmula para calcular o tempo ideal em que o nó atual deveria acordar ( $T_i$ ) com base no tempo em que ele acordou ( $T_m$ ):

$$T_i = T_m - d_{comm} \quad (3.8)$$

Como a duração do ciclo ( $t_{CY}$ ) é estabelecida por padrão com um valor fixo para todos os nós, o intervalo de previsão para o nó atual iniciar seu ciclo de trabalho ( $r$ ) pode ser calculado a partir do *timestamp* ideal estimado na fórmula anterior:

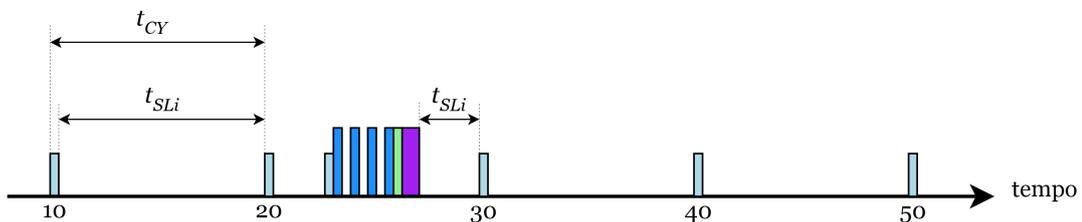
$$r = T_i \bmod t_{CY} \quad (3.9)$$

Este valor extraído torna-se uma constante na fórmula para definir o período total que o nó atual deve dormir ( $t_{SL_i}$ ) para preservar seu padrão temporal de funcionamento, dado o tempo corrente de seu relógio ( $T_m$ ):

$$t_{SL_i} = t_{CY}(1 + r) - (T_m \bmod t_{CY}) \quad (3.10)$$

Dessa forma, sempre que um nó *backbone* receber ou enviar um dado, seu tempo de *sleep* será descontado naquele ciclo, enquanto na prática irá permanecer pelo mesmo período de inatividade que os nós comuns na ausência de comunicações:

Figura 3.10 – O padrão do ciclo é mantido com  $t_{SL_i}$  variado



Fonte: Elaborada pelo autor

Para o desenvolvimento dessa solução e nos testes não foi considerada a distorção causada pelas pequenas diferenças entre os cristais osciladores dos nós sensores (*clock drift*), mas a possibilidade de interferência do *clock drift* foi parcialmente abordada adicionando ao cálculo do tempo ideal de *sleep* 5% do período de 1 ciclo, oferecendo margem para compensar uma eventual diferença na contagem dos relógios.

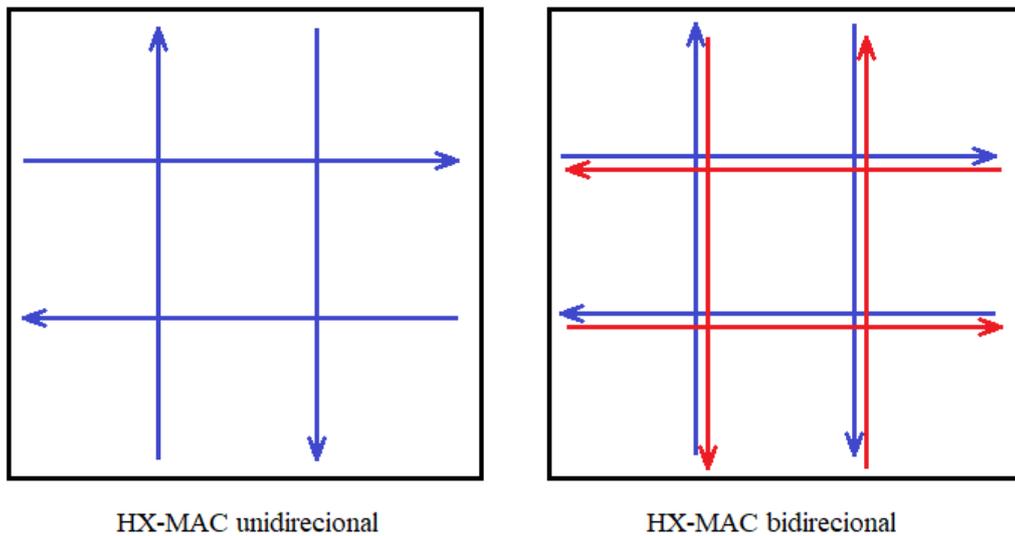
## 4 RESULTADOS

Este capítulo descreve a configuração do ambiente de teste e seus cenários, apresenta os resultados deles e a discussão acerca da análise dos dados obtidos a partir deles.

### 4.1 Configuração do Ambiente

O protocolo HW-MAC teve seu funcionamento comparado ao X-MAC (BUETTNER et al., 2006) em dois ajustes diferentes: utilizando apenas um canal de *backbone*, descrito como **HW-MAC unidirecional**, e utilizando os dois canais conforme proposto, descrito como **HW-MAC bidirecional** (Figura 4.1). O HW-MAC unidirecional pode ser executado sob apenas um único canal, pois não há ocorrências de segmentos opostos de *backbone*, e utiliza em média a metade da quantidade de nós em relação à sua versão bidirecional. Além disso servirá para evidenciar o impacto que a adição de nós sincronizados à rede promove, em termos de comportamento nas comunicações e latência. Todos os protocolos utilizados nos testes foram implementados na mesma plataforma, utilizando geo-roteamento como o protocolo de Rede básico.

Figura 4.1 – Variações do HW-MAC



Fonte: Elaborada pelo autor

Para cada protocolo a ser testado, o simulador *Grubix* foi configurado para executar uma série de transmissões numa rede de sensores espalhados aleatoriamente por uma área de  $90.000\text{ m}^2$  seguindo uma distribuição de *Poisson*. A cada simulação, a rede era reorganizada e os *backbones* eram reconfigurados, preservando-se apenas o posicionamento dos oito nós

básicos para o início do encadeamento das sincronizações. Os rádios dos nós utilizaram o modelo de comunicação de raio único com alcance de comunicação e interferência de 40 *m*, com velocidade de transmissão de 250 *kbps*. As comunicações simuladas não contemplaram erros de transmissão nem colisões, o foco foi apenas na latência e na quantidade de saltos usados. Todos os sensores da rede dispunham da posição dos seus vizinhos, das dimensões do campo onde estão atuando, da posição aproximada dos segmentos de *backbone* e suas direções (mas não dos nós que os compõem) e da posição do nó destino.

Para os cálculos de custo de envio via geo-roteamento é necessário o número médio de preâmbulos para comunicações envolvendo nós comuns, que é obtido dividindo a quantidade máxima adotada por 2. Já para o cálculo do custo de envio via *backbone*, deve-se obter o número médio de preâmbulos em transmissões entre nós sincronizados. Esse valor foi retirado de observações durante testes preliminares na fase de implementação, nos quais os nós emitiam entre 2 e 4 quadros RTS por comunicação. Foi fixado então uma média de 3 preâmbulos. Ambos os cálculos de custo necessitam também da distância média de 1 salto, que foi adotada em 90% do alcance máximo do rádio.

No mais, todos os parâmetros importantes necessários às simulações são resumidos no Quadro 4.1:

Quadro 4.1 – Guia de parâmetros utilizados

Alcance do rádio	40 <i>m</i>
Dimensões do campo	300×300 <i>m</i>
Distância média de 1 <i>hop</i>	36 <i>m</i>
Distribuição de nós	distribuição Poisson
Duração do <i>carrier sense</i>	4,072 <i>ms</i>
Duração do ciclo	100 <i>ms</i>
Máximo de preâmbulos	50
Média de nós <i>backbone</i> por canal	31
Potência	60 <i>mW</i>
Quantidade de nós	700
Quantidade máxima de preâmbulos	50
Tamanho do pacote de dados	512 <i>bits</i>
Tamanho do quadro CTS	128 <i>bits</i>
Tamanho do quadro RTS	256 <i>bits</i>
Total de simulações	90
Velocidade de transmissão	250 <i>kbps</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

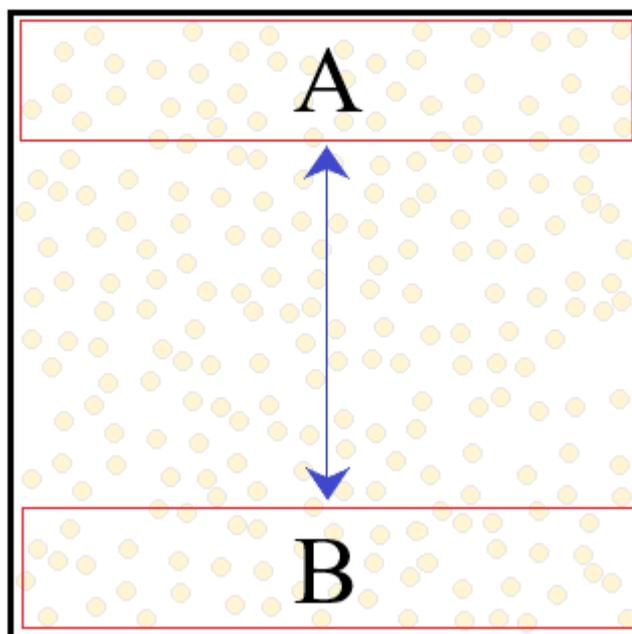
## 4.2 Resultados das Simulações

Foram observados os comportamentos do protocolo X-MAC e dos dois variantes do HW-MAC em dois cenários diferentes, que serão designados como **Cenário I**, para o qual foram realizadas 30 simulações, e **Cenário II**, contando com 60 simulações. Os resultados dos testes foram sintetizados através do cálculo de média com intervalo de confiança de 95%.

### 4.2.1 Cenário I - Grupo A vs Grupo B

Neste cenário, dois grupos de nós trocam mensagens entre si de maneira sequencial e alternada, nunca podendo um nó de determinado grupo decidir como destinatário outro do mesmo grupo ou externo aos dois. As posições dos nós internos aos grupos estão em uma lista que é enviada no pacote da aplicação a partir do nó que inicia a transmissão, da qual serão escolhidos pelos destinatários de maneira aleatória os próximos nós alvos. A cadeia de transmissões tem um limite, e uma vez que um determinado nó destino verifica que este limite foi alcançado, seu próximo e último destinatário é o nó que iniciou a sequência, que irá calcular quanto tempo levou para receber o pacote que enviou.

Figura 4.2 – Grupos de nós que irão dividir o papel de transmissor/receptor



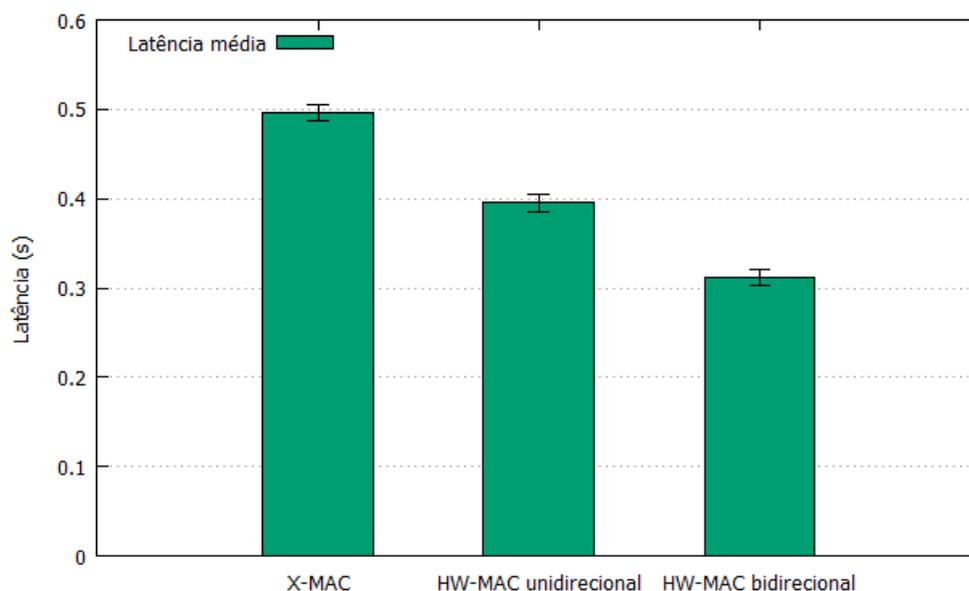
Fonte: Elaborada pelo autor

Foram realizados testes contemplando três modalidades diferentes: cadeias de 10 transmissões, 20 transmissões e 30 transmissões. Foram dedicadas 10 simulações para cada modalidade, sendo que cada vez em que uma simulação é executada, a rede se organiza de forma

diferente. O simulador foi então adaptado para registrar a quantidade de *hops* que ocorreram a cada transmissão, sua latência, e a distância entre os nós terminais. Neste cenário, a distância média entre os nós que se comunicaram foi de  $\approx 276 m$ .

A figura 4.3 indica as latências médias por transmissão de cada protocolo. O X-MAC realiza as transmissões por geo-roteamento normalmente, com cada *hop* gastando em média 25 preâmbulos (50% do número máximo de preâmbulos). No HW-MAC, dentro dos backbones são gastos, conforme mencionado, por volta de 3 preâmbulos (medida introduzida como uma margem para compensar um possível *clock drift*), além dos custos de se conduzir a mensagem para dentro e para fora do *backbone*, justificando dessa forma o aumento na contagem de *hops* na abordagem deste protocolo (Figura 4.4).

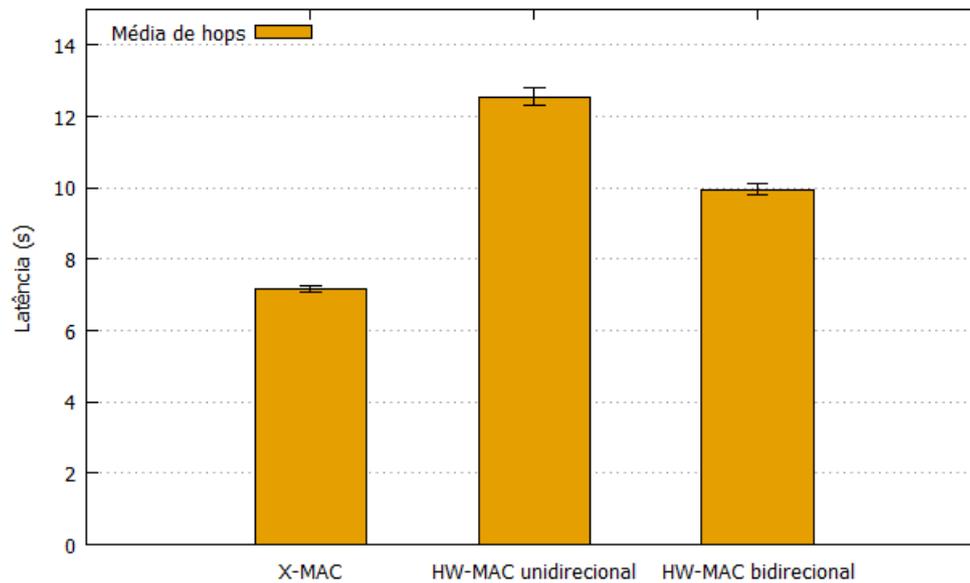
Figura 4.3 – Latência média de transmissões individuais



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados mostram que a redução da latência é diretamente proporcional ao aumento da quantidade de segmentos de *backbone* na rede. O problema da latência no X-MAC está relacionado ao fato de que os nós aos quais se deseja realizar uma transmissão não possuem disponibilidade constante, necessitando aguardar o momento em que este pode receber o dado. O HW-MAC amenizou a latência por meio de uso de rotas sincronizadas, com o custo de apresentar uma contagem maior de *hops* em suas transmissões.

A contagem de *hops* do HW-MAC unidirecional foi maior que a de sua versão bidirecional porque como não haviam rotas de *backbone* alternativas menores que levavam a mensagem ao objetivo, as únicas que haviam custo menor que o geo-roteamento envolviam o uso de vá-

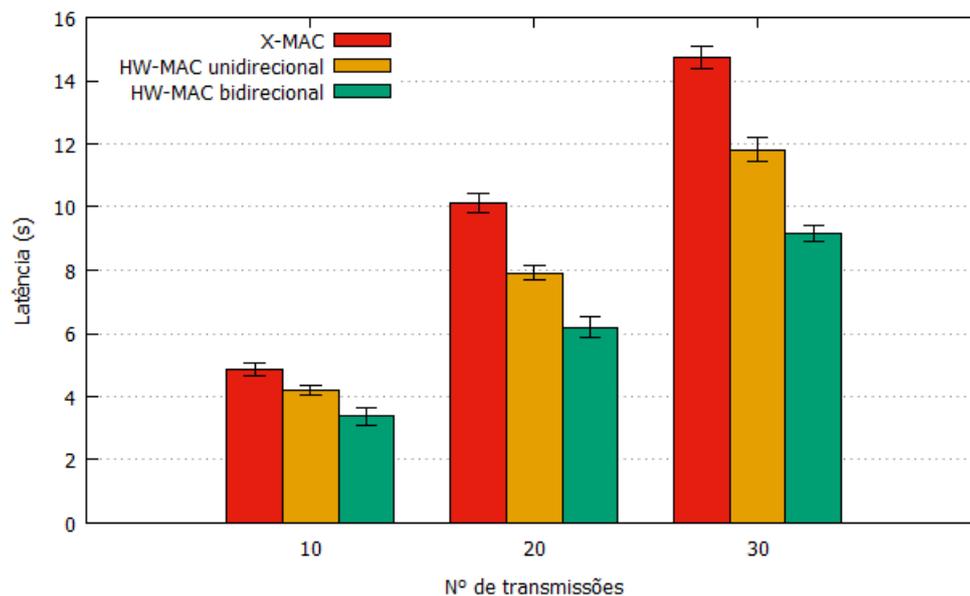
Figura 4.4 – Média de *hops* por transmissão

Fonte: Elaborada pelo autor

rios nós. A redução na quantidade de *hops* no HW-MAC bidirecional justifica a redução ainda mais acentuada na latência quando se usa mais vias de *backbone*, além de distribuir mais a alta demanda de uso dos nós internos ao *backbone*.

Já para a latência total da sequência, foram somados os tempos de cada transmissão individual nas sequências para as três modalidades, resultando no tempo gasto para a mensagem retornar ao primeiro nó. A Figura 4.5 evidencia o desempenho dos protocolos.

Figura 4.5 – Latência média das cadeias de transmissões



Fonte: Elaborada pelo autor

Os números indicam o efeito cumulativo da redução das latências de transmissões individuais nas sequências, que se tornam cada vez mais discrepantes à medida em que mais transmissões são feitas. Os quadros a seguir sumarizam os resultados vistos até agora:

Quadro 4.2 – Sumário dos resultados do Cenário I - Média de latência e *hops*

Protocolo	Média de <i>hops</i>	Latência média/transmissão
X-MAC	7,2	495,63 <i>ms</i>
HW-MAC unidirecional	12,5	395,67 <i>ms</i>
HW-MAC bidirecional	10,0	312,44 <i>ms</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 4.3 – Sumário dos resultados do Cenário I - Latência média das cadeias de transmissões

Protocolo	Latência média		
	10 transmissões	20 transmissões	30 transmissões
X-MAC	4,87 <i>s</i>	10,13 <i>s</i>	14,73 <i>s</i>
HW-MAC unidirecional	4,19 <i>s</i>	7,89 <i>s</i>	11,81 <i>s</i>
HW-MAC bidirecional	3,37 <i>s</i>	6,19 <i>s</i>	9,16 <i>s</i>

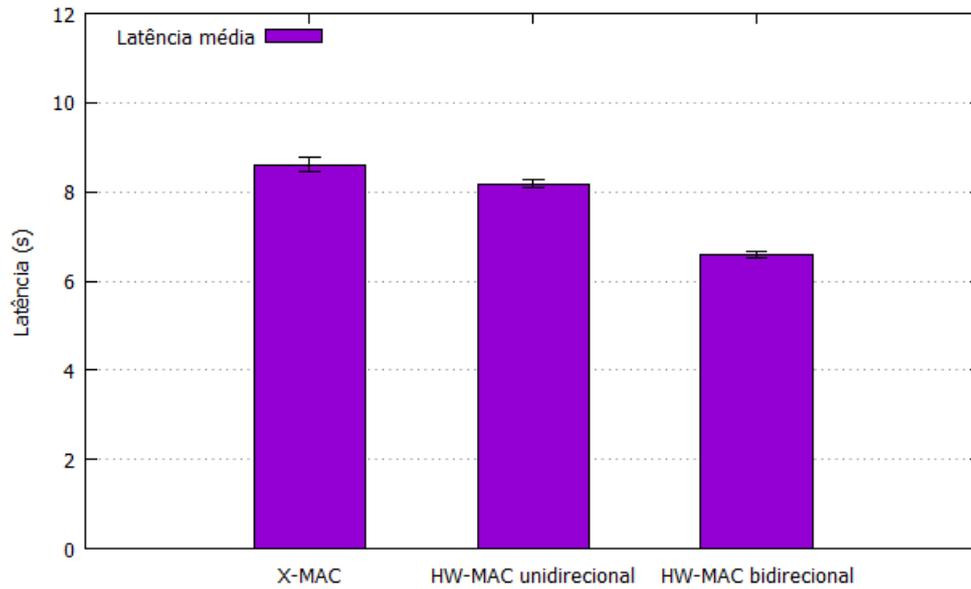
Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.2 Cenário II - Sequências Aleatórias

No segundo cenário de testes, as transmissões ocorreram em uma sequência de 30 nós aleatórios, com a mensagem retornando ao nó inicial ao fim das trigésima transmissão, mas desta vez sem o critério de distância mínima como no cenário anterior. Foram realizadas 60 simulações para este cenário, de maneira que cada simulação gera uma topologia de rede diferente com uma sequência de nós destinatários diferentes, que foram utilizados igualmente pelos três protocolos. O objetivo deste teste é validar a eficácia da solução num contexto geral, em aplicações que não dispõem da presença de *sinks* na rede.

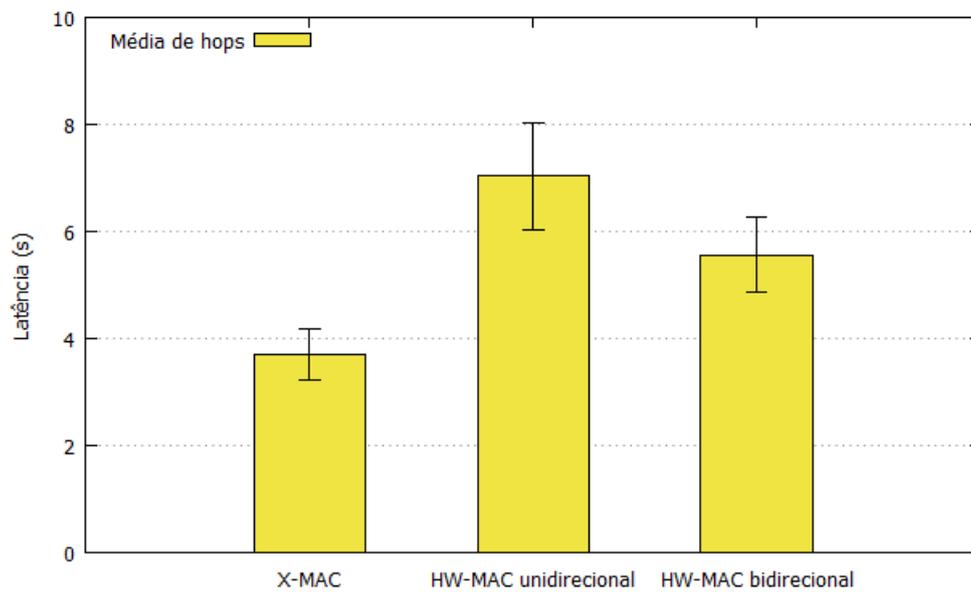
A proximidade do valor médio de latência entre o X-MAC e o HW-MAC unidirecional implica que apesar de uma pequena melhora no desempenho da rede no geral, a adoção do uso de um *backbone* unidirecional é ineficiente, principalmente quando se leva em consideração o grande aumento na quantidade média de *hops* (Figura 4.7). Mas o uso de dois canais de *backbone* melhorou substancialmente o desempenho do HW-MAC, pois, de maneira similar ao que ocorreu no Cenário I, ofereceu rotas de *backbone* mais eficientes, reduzindo o número de *hops* necessários para entregar a mensagem quando comparado ao modo unidirecional.

Figura 4.6 – Latência média das transmissões aleatórias



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.7 – Média de hops nas transmissões aleatórias



Fonte: Elaborada pelo autor

Os intervalos de confiança mais acentuados se dão pelo fato de que em comunicações entre nós aleatórios neste cenário, suas distâncias variam aos extremos, reduzindo a precisão dos resultados, porém as médias sugerem que há uma preferência maior em se usar os *backbones* principalmente quando as distâncias são maiores, pois nestas circunstâncias o custo dos envios pelo *backbone* são mais atrativos, e já que as transmissões que usam tais vias possuem um

padrão de movimentação *Manhattan*, a quantidade de *hops* cresce proporcionalmente mais do que o observado num padrão Euclidiano.

O quadro a seguir sumariza os dados obtidos com as simulações neste cenário:

Quadro 4.4 – Sumário dos resultados do Cenário II - Média de latência (30 mensagens) e *hops*

Protocolo	Média de <i>hops</i>	Latência média/transmissão
X-MAC	3,7	8,6 s
HW-MAC unidirecional	7,0	8,17 s
HW-MAC bidirecional	5,5	6,6 s

Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 Conclusão dos Resultados

Os resultados dos testes nos dois cenários apresentados validam a eficácia da solução proposta pelo protocolo HW-MAC. O Cenário I permite, através do estabelecimento de uma distância mínima, visualizar a redução efetiva da latência nas comunicações e a propagação dessa redução à medida em que mais transmissões são realizadas. Além disso, este cenário evidenciou que ao utilizar-se de rotas sincronizadas na maior parte de sua extensão, é possível que uma mensagem consiga trafegar mais rapidamente em comparação com o geo-roteamento. Já os testes com o Cenário II mostraram que não importam onde estejam posicionados os nós que se comunicarão, a maneira com a qual os segmentos de *backbones* estão distribuídos faz com que se torne mais frequente a utilização de suas estruturas. Os resultados refletem isso no aumento do número de *hops* acompanhado à redução da latência. É possível concluir também a partir das estreitas margens de erro que os resultados foram consistentes, indicando a eficácia do algoritmo de roteamento em escolher os caminhos de melhor custo. E por fim, pode-se estimar relacionando a contagem de saltos com a latência que o consumo energético por comunicação de ponta a ponta no HW-MAC pode ter sido reduzido quando comparado ao X-MAC, pois apesar da quantidade de *hops* ter crescido, foi reduzida a quantidade de preâmbulos usados por salto, mas isso é válido para cenários com pacotes pequenos de dados. Se os dados fossem maiores, o aumento na quantidade de *hops* influenciaria negativamente no consumo.

No entanto essa melhoria vem acompanhada ao custo de se utilizar os mesmos gupos de nós em diversas comunicações. Numa rede real, estes nós teriam suas baterias exauridas mais rapidamente que os outros sensores pelo volume de mensagens que teriam de transportar.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Considerações Finais

Este trabalho acadêmico propôs um protocolo *cross layer* que foi capaz de reduzir a latência nas transmissões em uma RSSF baseada em X-MAC utilizando *backbones* direcionais sincronizados, alcançados adicionando informações simples nos cabeçalhos dos quadros dos dados.

O protocolo HW-MAC teve sua validação alcançada através da análise dos testes de latência e de contagem de *hops*, comparando seus resultados aos do protocolo X-MAC. O primeiro cenário de testes determinou a latência média por transmissão, com distância mínima fixada ajustada de forma a melhor aproveitar as estruturas de *backbone*, e a partir dessa informação foi possível determinar que a redução de latência se dá de forma cumulativa à medida em que mais transmissões são efetuadas. A quantidade de *hops*, embora tenha aumentado em relação ao X-MAC, se mantém em uma margem aceitável e mais baixa quando se compara o uso de apenas um *backbone* unidirecional. A inclusão de um *backbone* de encadeamento oposto na rede mostrou, nos testes envolvendo os dois cenários, que o roteamento inteligente funcionou eficientemente ao ser munido com mais opções viáveis de roteamento. Já no segundo cenário de testes, o desempenho médio de operação do protocolo envolvendo comunicações entre vários pares de nós quaisquer da rede indicou que as estruturas de *backbone* estão sendo bem aproveitadas. Isso é sinalizado pela redução significativa nas latências das cadeias de transmissão.

Porém, apesar de sua dinamicidade em sua auto-distribuição e de oferecer latências menores em suas transmissões, o HW-MAC tem o problema no fato de que há muita demanda aos nós dos *backbones*. Isso pode ser problemático pois as reservas de energia dos nós internos poderão se exaurir mais rápido, e o aparecimento de buracos nos *backbones* é uma possibilidade potencialmente indesejável. Mas fora essa questão, a implementação do protocolo foi feita com êxito, e ele tem um bom potencial para aplicação, principalmente em cenários em que ocorrem transmissões entre pares de sensores aleatórios.

### 5.2 Trabalhos futuros

O HW-MAC pode se beneficiar muito com a adoção de uma técnica de manutenção das vias dos *backbones*, para evitar a sobrecarga de operação dos mesmos. Uma forma de se abordar este problema seria realizar trocas periódicas de nós *backbone* - quando um nó atinge

determinado nível de energia, ele pode iniciar um processo de substituição selecionando um vizinho apto, preservando dessa forma a estrutura do *backbone* e poupando seu restante de energia. Além disso, ainda pode ser tratada de maneira mais eficaz a questão do *clock drift* para poupar ainda mais tempo de transmissão, do que adotar simplesmente uma margem de tempo extra estática conforme feito neste trabalho.

Quanto à topologia formada pela distribuição dos *backbones*, outras organizações podem ser elaboradas e comparadas, podendo até mesmo serem conjugadas com a adotada como uma maneira de poupar a energia dos sensores nas regiões dos segmentos.

## REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. **Computer Networks**, Elsevier North-Holland, Inc., New York, NY, USA, v. 38, n. 4, p. 393–422, mar. 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)>.
- AVVENUTI, M. et al. Energy-efficient reception of large preambles in mac protocols for wireless sensor networks. **Electronics Letters**, v. 43, n. 5, p. 59–60, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1049/el:20073919>>.
- BACHIR, A. et al. Mac essentials for wireless sensor networks. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 12, n. 2, p. 222–248, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/SURV.2010.020510.00058>>.
- BANDUR Đoko et al. An analysis of energy efficiency in wireless sensor networks (wsns) applied in smart agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, p. 500 – 507, 2019. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918316570>>.
- BARONTI, P. et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and zigbee standards. **Computer Communications**, v. 30, n. 7, p. 1655 – 1695, 2007. ISSN 0140-3664. *Wired/Wireless Internet Communications*. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366406004749>>.
- BUETTNER, M. et al. 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**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2006. (SenSys '06), p. 307–320. ISBN 1595933433. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/1182807.1182838>>.
- CANO, C. et al. Low energy operation in wsns: A survey of preamble sampling mac protocols. **Computer Networks**, v. 55, n. 15, p. 3351 – 3363, 2011. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128611002349>>.
- DOUDOU, M.; DJENOURI, D.; BADACHE, N. Survey on latency issues of asynchronous mac protocols in delay-sensitive wireless sensor networks. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 15, n. 2, p. 528–550, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/SURV.2012.040412.00075>>.
- EL-HOIYDI, A. et al. Poster abstract: Wisemac, an ultra low power mac protocol for the wisenet wireless sensor network. In: **Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2003. (SenSys '03), p. 302–303. ISBN 1581137079. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/958491.958531>>.
- GHAFOOR, K. et al. Routing protocols in vehicular ad hoc networks: Survey and research challenges. **Network Protocols and Algorithms**, v. 5, p. 39, 12 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.5296/npa.v5i4.4134>>.
- HEINZELMAN, W. B.; CHANDRAKASAN, A. P.; BALAKRISHNAN, H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 1, n. 4, p. 660–670, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TWC.2002.804190>>.

HILL, J. et al. The platforms enabling wireless sensor networks. **Commun. ACM**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 47, n. 6, p. 41–46, jun. 2004. ISSN 0001-0782. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/990680.990705>>.

HONG, S.; KIM, H. A multi-hop reservation method for end-to-end latency performance improvement in asynchronous mac-based wireless sensor networks. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 55, n. 3, p. 1214–1220, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TCE.2009.5277978>>.

IEEE. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. **IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)**, p. 1–3534, 2016.

IEEE. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. **IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)**, p. 1–800, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9144691>>.

INTANAGONWIWAT, C.; GOVINDAN, R.; ESTRIN, D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: **Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2000. (MobiCom '00), p. 56–67. ISBN 1581131976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/345910.345920>>.

JAGADEESAN, S.; PARTHASARATHY, V. Cross-layer design in wireless sensor networks. In: WYLD, D. C.; ZIZKA, J.; NAGAMALAI, D. (Ed.). **Advances in Computer Science, Engineering & Applications**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 283–295. ISBN 978-3-642-30157-5. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-642-30157-5\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30157-5_29)>.

KARP, B.; KUNG, H. T. Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: **Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2000. (MobiCom '00), p. 243–254. ISBN 1581131976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/345910.345953>>.

KOCAKULAK, M.; BUTUN, I. An overview of wireless sensor networks towards internet of things. In: **2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)**. [s.n.], 2017. p. 1–6. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/CCWC38876.2017>>.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Computer Networking: A Top-Down Approach**. 6<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Pearson, 2012. ISBN 0132856204.

LESSMANN, J.; HEIMFARTH, T.; JANACIK, P. Shox: An easy to use simulation platform for wireless networks. In: . [s.n.], 2008. p. 410–415. ISBN 0-7695-3114-8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/UKSIM.2008.32>>.

LITWIN, L. The medium access control sublayer. **IEEE Potentials**, v. 20, p. 30 – 34, 11 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/45.969594>>.

NOROUZI, A.; ZAIM, A. An integrative comparison of energy efficient routing protocols in wireless sensor network. **Wireless Sensor Network**, v. 04, 01 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.4236/wsn.2012.43010>>.

POLASTRE, J.; HILL, J.; CULLER, D. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2004. (SenSys '04), p. 95–107. ISBN 1581138792. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/1031495.1031508>>.

RAMSON, S.; MONI, D. Applications of wireless sensor networks: A survey. In: KARUNYA UNIVERSITY. **2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT)**. Coimbatore, India: IEEE, 2017. p. 325–329. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICIEEIMT.2017.8116858>>.

RATHI, N.; SARASWAT, J.; BHATTACHARYA, P. A review on routing protocols for application in wireless sensor networks. **International Journal of Distributed and Parallel Systems**, v. 3, 10 2012.

SALAM, M. A.; AMEEN, S.; AL-KHAYAT, O. Wsns power consumption reduction using clustering and multiple access techniques. **International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)**, Volume 87, p. 33–39, 02 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.5120/15239-3780>>.

SOARES, P. F. **UM PROTOCOLO CROSS-LAYER HÍBRIDO PARA REDES DE SENSORES SEM FIO BASEADO EM BACKBONE**. 1 – 70 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, 2018.

SWETHA, R.; SANTHOSH, V.; SOFIA, A. Wireless sensor network : A survey. **IJARCCCE**, v. 7, p. 114–117, 11 2018.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. **Computer Networks**. 5a. ed. USA: Prentice Hall Press, 2010. ISBN 0132126958.

XIE, M.; WANG, X. An energy-efficient tdma protocol for clustered wireless sensor networks. In: **2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management**. [s.n.], 2008. v. 2, p. 547–551. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/CCCM.2008.97>>.

YE, W.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In: **Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies**. [s.n.], 2002. v. 3, p. 1567–1576 vol.3. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/INFCOM.2002.1019408>>.

YU, Y.; GOVINDAN, R.; ESTRIN, D. Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. **UCLA Computer Science Department Technical Report**, v. 463, 10 2001.

ZAREEI, M. et al. Mobility-aware medium access control protocols for wireless sensor networks: A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 104, 12 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.12.009>>.