



**PEDRO MESQUITA MOURA**

**MAD-CHANNEL: UM MECANISMO DISTRIBUÍDO  
DE ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CANAIS PARA  
REDES DE SENSORES SEM FIO**

**LAVRAS - MG**

**2011**

**PEDRO MESQUITA MOURA**

**MAD-CHANNEL: UM MECANISMO DISTRIBUÍDO DE ALOCAÇÃO  
DINÂMICA DE CANAIS PARA REDES DE SENSORES SEM FIO**

Monografia apresentada ao Colegiado do  
Curso de Ciência da Computação, para a  
obtenção do título de Bacharel em Ciên-  
cia da Computação.

Orientador

Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Coreia

**LAVRAS - MG**

**2011**

**PEDRO MESQUITA MOURA**

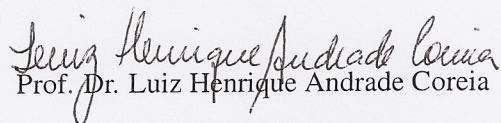
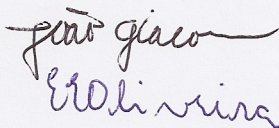
**MAD-CHANNEL: UM MECANISMO DISTRIBUÍDO DE ALOCAÇÃO  
DINÂMICA DE CANAIS PARA REDES DE SENSORES SEM FIO**

Monografia apresentada ao Colegiado do  
Curso de Ciência da Computação, para a  
obtenção do título de Bacharel em Ciên-  
cia da Computação.

Aprovada em 07 de Junho de 2011

João Carlos Giacomini

Erasmus Evangelista Oliveira



Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Coreia

Orientador

**LAVRAS - MG**

**2011**

*Aos meus pais  
Maxwel e Sandra,  
à minha namorada  
Cristiane,  
ao meu irmão  
Renan  
e aos meus amigos  
Erasmão e Luiz Henrique*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais *Maxwel e Sandra* pelo apoio a todos os momentos e de todas as formas possíveis.

À minha namorada *Cristiane* pela paciência e apoio durante essa jornada durante este trabalho.

Ao meu orientador *Luiz Henrique* por me apoiar na parte científica e acreditar no meu trabalho.

A todos os membros do GRUBi *Alex, Alexandre, Erasmo, Moizes, Jesimar e Vinicius* pela troca de experiências e momentos de diversão durante esse tempo de convívio.

A todos os professores do DCC da UFLA que me ajudaram a subir essa escada grande que é a universidade.

E a FAPEMIG pelo apoio financeiro durante estes dois últimos anos.

## **RESUMO**

Este trabalho propõe um mecanismo de alocação dinâmica de canais chamado MAD-Channel. O uso indiscriminado do espectro causou uma ocupação de mais de 90%, por esse motivo surgiu a necessidade de redes de sensores sem fio que consigam sensorear o espectro e realizar transmissões em suas faixas livres. O principal objetivo deste mecanismo é coordenar a escolha do canal de um modo distribuído em rede de sensores sem fio, e com isso realizar transmissões em faixas livres do espectro, escolhendo sempre o melhor canal disponível para a transmissão. Foi utilizado o protocolo T-MAC como base para a implementação do mecanismo de alocação dinâmica de canais, que foi implementado em ambiente de simulação com a finalidade de testar e avaliar os seus resultados. Em cenários com ruído base altos, o MAD-Channel consegue entregar até 15% mais pacotes que o T-MAC sem aumentar o atraso e consumo de energia deste protocolo.

**Palavras-chave:** Redes de sensores sem fio; Protocolos MAC; Simuladores; Rádios cognitivos.

## **ABSTRACT**

This work proposes a dynamic channel allocation mechanism called MAD-Channel. The indiscriminate use of the spectrum caused an occupation of more than 90%, therefore emerged the necessity of wireless sensor networks that are able to sense the spectrum and realize transmissions in the available portions. The main goal of this mechanism is to coordinate the channel choice in a distributed way in wireless sensor networks, and so transmit in available portions of the spectrum, choosing always the best channel to do so. The T-MAC protocol was used as base for the mechanism, which was implemented in simulation environment for testing and evaluating their results. In low noise scenarios, the MAD-Channel mechanism was able to deliver 15% more packets than T-MAC without raising the delay and energy consumption of this protocol.

**Keywords:** Wireless sensor networks; MAC Protocols; Simulators; Cognitive radios.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Funcionamento do ciclo de trabalho. ....	14
Figura 2	Funcionamento do protocolo T-MAC. ....	16
Figura 3	Máquina de estados do Protocolo B-MAC. ....	18
Figura 4	Arquitetura de uma RSSFC. ....	21
Figura 5	Estados de uma RSSFC. ....	22
Figura 6	Sensoriamento centralizado e distribuído numa RSSFC. ....	23
Figura 7	Arquitetura de um nó RSSFC. ....	24
Figura 8	Arquitetura do simulador Castalia ....	28
Figura 9	Estrutura de um nó. ....	29
Figura 10	Fluxograma do MAD-Channel. ....	31
Figura 11	Procedimento de descoberta de vizinhos. ....	33
Figura 12	Sincronização do canal de transmissão ....	38
Figura 13	Classificação dos tipos de pesquisa ....	40
Figura 14	Taxa de entrega de pacotes em um cenário de baixa densidade de nós. ....	44
Figura 15	Taxa de entrega de pacotes em um cenário de alta densidade de nós. ....	45
Figura 16	Atraso fim a fim em um cenário de baixa densidade de nós. ....	46
Figura 17	Atraso fim a fim de pacotes em um cenário de alta densidade de nós. ....	47
Figura 18	Consumo de energia em um cenário de baixa densidade de nós. ...	48
Figura 19	Consumo de energia em um cenário de alta densidade de nós. ....	49
Figura 20	<i>Handoff</i> em um cenário de baixa densidade de nós. ....	50
Figura 21	<i>Handoff</i> em um cenário de alta densidade de nós. ....	51



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Protocolos MAC para RSSFs .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Protocolo S-MAC .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Protocolo T-MAC .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Protocolo B-MAC .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Redes de Sensores Sem Fio Cognitivas .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Benefícios .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Arquitetura de uma RSSFC .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Arquitetura de um nó RSSFC .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelo de Interferência a Dois Saltos .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Simulação em RSSF .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Castalia.....</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>MAD-Channel.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Sensoreamento do espectro .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Decisão do espectro .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3</b>	<b>Compartilhamento do espectro.....</b>	<b>36</b>
<b>3.4</b>	<b>Controle de Canal Comum .....</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Classificação do Trabalho .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2</b>	<b>Materias e Métodos .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Métricas Avaliadas.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Cenários de Avaliação .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Classe Geradora de Tráfego .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Metodologia de Simulação .....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1</b>	<b>Taxa Média de Pacotes Entregues.....</b>	<b>44</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Cenário de Baixa Densidade .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Cenário de Alta Densidade.....</b>	<b>45</b>
<b>5.2</b>	<b>Atraso fim a fim .....</b>	<b>46</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Cenário de Baixa Densidade .....</b>	<b>46</b>

5.2.2	Cenário de Alta Densidade.....	47
5.3	Consumo de energia .....	48
5.3.1	Cenário de Baixa Densidade .....	48
5.3.2	Cenário de Alta Densidade.....	49
5.4	<i>Handoff</i> .....	50
5.4.1	Cenário de Baixa Densidade .....	50
5.4.2	Cenário de Alta Densidade.....	51
6	Conclusões .....	52
7	Referências Bibliográficas .....	53

# 1 Introdução

Este trabalho tem como foco principal apresentar um algoritmo de alocação dinâmica de canais para redes de sensores sem fio cognitivas (RSSFC). Este algoritmo trabalha de forma distribuída e procura alocar diferentes canais de transmissão para os nós presentes na rede, visando eficiência de uso do espectro e a coexistência de redes. Este algoritmo pode ser usado para a realização da decisão de espectro.

## 1.1 Contextualização

O uso do espectro de rádio-frequências é regulamentado por agências reguladoras de telecomunicações de cada país, como por exemplo a *Federal Communications Commission* (FCC) nos Estados Unidos; Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) no Brasil e o *Office of Communications* (Ofcom) no Reino Unido. Todos esses órgãos definem uma política de alocação estática das faixas de frequências, o que pode implicar num gerenciamento ineficiente do uso do espectro.

Isso acontece devido a política de concessão definida pelas agências reguladoras, que divide o espectro entre usuários primários (licenciados) e secundários (não licenciados). As licenças de uso são concedidas observando-se uma faixa de frequência, uma abrangência geográfica e um período de exploração. As concessionárias exploram essas bandas por um longo período de tempo e em regiões geográficas abrangentes.

As faixas de frequências não licenciadas são destinadas às utilizações industriais, científicas e médicas; e podem ser utilizada livremente. Essas faixas,

chamadas de ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), foram reservadas inicialmente para dispositivos usando rádio de curto alcance e de baixa potência de sinal. No Brasil, os equipamentos de radiocomunicação que trabalham nessas faixas, podem operar em três faixas, 900MHz, 2,4 GHz e 5 GHz [Anatel 2009]. Essas faixas de uso livre possibilitaram a expansão e o uso de redes locais de computadores sem fio, e o provimento de acesso a Internet via radiofrequência.

No entanto, o uso indiscriminado das faixas de frequência não licenciadas causou uma poluição do espectro, na qual a ocupação do espectro atinge um patamar de 90% [McHenry 2005], o que tem inviabilizado a comunicação nessas faixas de frequências, sobretudo na frequência de 2,4GHz. Por outro lado, as faixas de frequências conhecidas como primárias, ou licenciadas, apresentam em determinadas regiões uma baixa taxa de ocupação do espectro, chegando a menos de 1%.

Nos Estados Unidos, a DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) propôs um novo paradigma de redes, denominado redes de nova geração ou xG (*NeXtGeneration*). Esse novo paradigma envolve técnicas de acesso dinâmico ao espectro (*Dynamic Spectrum Access - DSA*) baseadas em rádios inteligentes, também conhecidos como rádios cognitivos [Akyildiz et al. 2006]. Além disso, algumas modificações na política de alocação estática de frequências reguladas pelo FCC têm sido propostas de forma a homologar novos dispositivos que façam alocação dinâmica do espectro [FCC 2005].

Essas redes de nova geração, também denominadas redes de rádios cognitivos (RRC), devem ser capazes de aprender, monitorando as condições de uso de frequências em determinada região, planejar e atuar de acordo com as suas observações [Akyildiz et al. 2008]. As RRC devem ainda, respeitar a premissa de

que um sistema secundário não deve interferir em sistemas primários, e que caso isso ocorra o rádio cognitivo deve atuar prontamente na liberação da frequência licenciada ocupada.

As RRC impõem desafios devido à natureza flutuante do espectro disponível, bem como os diversos requisitos de qualidade de serviço das aplicações. A fim de enfrentar esses desafios, cada usuário na RRC deve [Akyildiz et al. 2008]:

1. Determinar quais porções do espectro estão disponíveis;
2. Escolher o melhor canal disponível;
3. Coordenar o acesso a este canal com outros usuários;
4. Desocupar o canal quando um utilizador licenciado é detectado.

As RRC devem considerar também os requisitos da aplicação, como largura de banda, atraso e vazão. Sendo assim, uma RRC deve possuir um arcabouço de gerenciamento do espectro que realize as seguintes funções: sensoriamento, decisão, compartilhamento e mobilidade do espectro [Akyildiz et al. 2008].

Em linhas gerais, os desafios principais envolvidos no projeto de rádios cognitivos, são o sensoriamento e a decisão do espectro, flexibilidade para adaptar os parâmetros de transmissão para maximizar a capacidade do sistema, coexistência com redes sem fio legadas e a necessidade de atender a requisitos de qualidade de serviço das classes de aplicações, sem interferir nos usuários primários.

No âmbito das redes de sensores sem fio (RSSF), as técnicas de acesso dinâmico ao espectro usadas nas redes de rádio cognitivo, podem trazer benefícios

a essas redes. Em [Akan, Karli e Ergul 2009] é proposto um novo paradigma de redes, no qual ocorre a junção do conceito de rádio cognitivo e redes de sensores sem fio, constituindo Redes de Sensores Sem Fio Cognitivas (RSSFC)<sup>1</sup>.

Segundo [Akan, Karli e Ergul 2009], esse novo paradigma de rede constituirá a próxima geração das redes de sensores sem fio. O objetivo dessa mescla de tecnologias, é identificar como a incorporação da tecnologia de rádio cognitivo às redes de sensores sem fio (RSSF) tradicionais poderá trazer benefícios a comunicação como maior número de canais disponíveis, menor número de colisões, coexistência de redes sobrepostas e aumento do ciclo de vida.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal atender o requisito de coordenar o acesso ao canal de transmissão com outros usuários. Essa técnica foi proposta por [Akyildiz et al. 2008] através de um algoritmo distribuído de alocação dinâmica de canais. Este mecanismo trata o problema de redes heterogêneas sobrepostas e procura diminuir o número de colisões a partir do uso oportunista do espectro.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado da seguinte forma: na seção 2 são apresentados os conceitos básicos e trabalhos relacionados, na seção 3 é apresentada a metodologia e os procedimentos metodológicos, na seção 4 o mecanismo MAD-Channel e na seção 5 os resultados obtidos.

---

<sup>1</sup>Traduzido do Inglês CRSN - Cognitive Radio Sensor Network.

## 2 Referencial Teórico

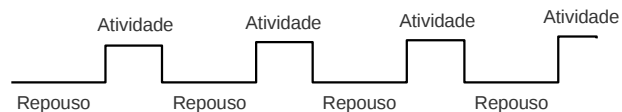
### 2.1 Protocolos MAC para RSSFs

Nesta seção serão apresentados alguns protocolos MAC para RSSFs. Estes protocolos serviram de base para a implementação do mecanismo de alocação dinâmica de canais. Estes protocolos utilizam técnicas já validadas para economia de energia, e tais técnicas devem ser mantidas nos protocolos com a alocação dinâmica de canais.

#### 2.1.1 Protocolo S-MAC

O protocolo *sensor*-MAC (S-MAC) foi o primeiro desenvolvido especialmente para RSSFs. Este protocolo tem como principal objetivo economizar energia e prevenir de colisões [Ye, Heidemann e Estrin 2004].

O protocolo S-MAC utiliza ciclo de trabalho para economia de energia, uma técnica que fixa tempos de atividade e repouso, seu funcionamento está ilustrado na Figura 1. O tempo de repouso é bem menor que o tempo de atividade, em geral cerca de 10%.



**Figura 1:** Funcionamento do ciclo de trabalho.

Para a prevenção de colisões o protocolo S-MAC utiliza quadros de controle RTS e CTS, que fazem reserva do canal e um vetor de alocação de rede (NAV - *Network Allocation Vector*) para detecção de portadora virtual. Caso o protocolo identifique uma colisão o protocolo utiliza um algoritmo de *Binary Exponential Backoff*, que aguarda um tempo aleatório para a próxima transmissão. São formados agrupamentos (*clusters*) virtuais entre nós que têm o mesmo ciclo de operação.

O protocolo S-MAC consegue reduzir substancialmente o consumo de energia, conseguindo reduzir para até 16% do consumido no protocolo MAC padrão 802.11, porém o atraso de envio dos quadros aumenta consideravelmente, visto que o nó passa maior parte do tempo em repouso.

### 2.1.2 Protocolo T-MAC

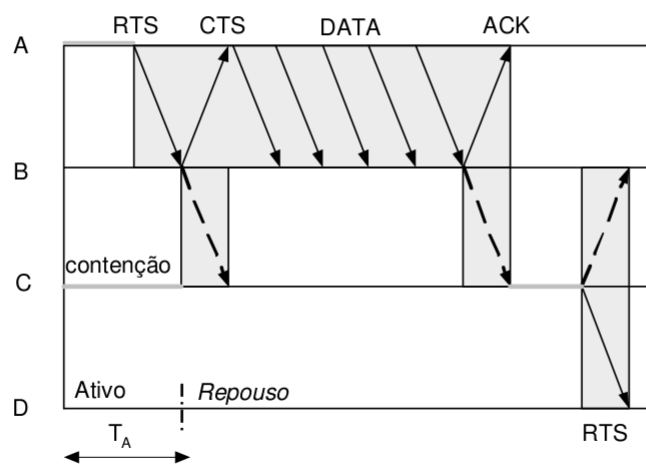
O protocolo *Time-out-MAC* (T-MAC) [Dam e Langendoen 2003] foi desenvolvido para aplicações que necessitam de uma latência sem variações, mas que possuem baixa taxa de envio de dados. Baseado em contenção, o protocolo T-MAC emprega reserva de canal, e detecção de portadora física e virtual. Assim como no S-MAC, são formados agrupamentos virtuais.

O protocolo T-MAC utiliza ciclos de operação dinâmicos, estes ciclos são adaptativos a variação de carga da rede. Um temporizador controla o ciclo de operação, ao término do tempo, o rádio é colocado em repouso. Quando mensagens existem mensagens para ser enviadas e o rádio está em repouso, as mensagens são armazenadas e enviadas durante o início do tempo ativo.

São usados quadros de reserva de canal, *Request To Send* (RTS), e quadros de confirmação de canal livre, *Clear To Send* (CTS), para evitar colisões. Quando



um quadro RTS ou CTS é recebido, o temporizador de ciclo de operação ( $T_A$ ) é renovado para que haja tempo de completar a transmissão.



**Figura 2:** Funcionamento do protocolo T-MAC.

A figura 2 ilustra o funcionamento do protocolo T-MAC, o nó tem uma mensagem a transmitir, e envia um quadro RTS. O nó B recebe a mensagem e responde com um CTS, que chega a C, que ao receber o CTS entra em estado de contenção. O quadro CTS também chega a A, que envia todas as mensagens que estão em seu *buffer*. Neste caso o nó D dorme antes de C enviar um RTS.

O T-MAC consegue ser mais eficiente em energia que o S-MAC, mas é extremamente limitado em largura de banda não sendo recomendado para aplicações sensíveis a este requisito. [Dam e Langendoen 2003]

### 2.1.3 Protocolo B-MAC

Polastre et al. propuseram um protocolo MAC chamado de Berkeley-MAC (B-MAC), um protocolo configurável para RSSFs. O B-MAC é por essência um protocolo simples, ele é composto por um núcleo pequeno que concentra as funcionalidades modularizadas. Com isso o B-MAC consegue suportar uma grande variedade de aplicações. Polastre et al. (2004), mostraram que esta arquitetura é eficaz e útil para RSSFs.

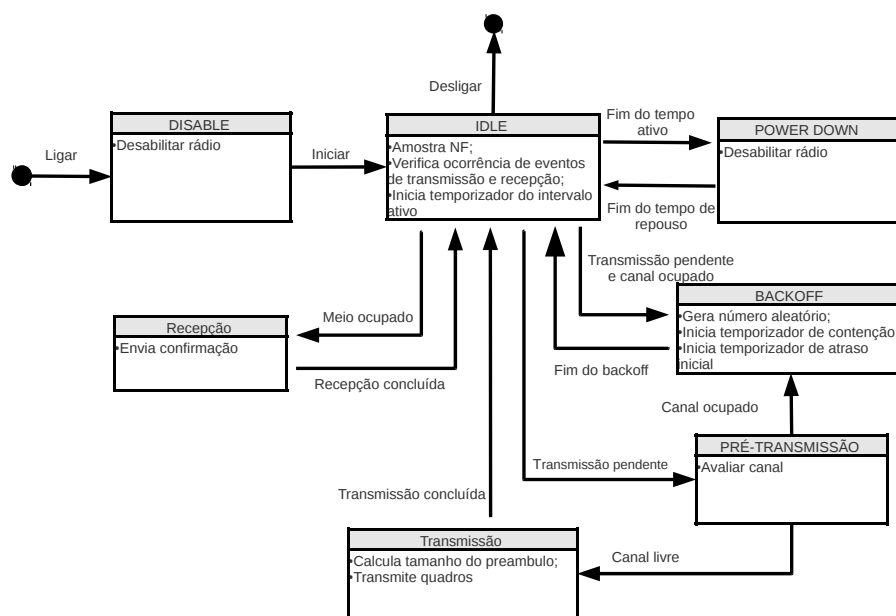
O protocolo B-MAC é norteado por seis características essenciais para um protocolo MAC:

- Operação em baixa potência: reduz o consumo de energia, aumentando o tempo de vida da rede.
- Prevenção de colisões: aumenta a vazão da rede, evita retransmissões e economiza energia através de períodos de *backoff*.
- Operação simples e intuitiva: facilita a personalização do protocolo para a aplicação específica.
- Código pequeno: ocupa pouca memória, um fator escasso dos nós sensores, e permite maior utilização da memória pela aplicação.
- Tolerância a mudanças.
- Escalável para grande número de nós.

O protocolo B-MAC implementa controle CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), avaliação de canal livre, atraso de transmissão (*backoff*) e quadros de

confirmação, sendo possível desabilitar e regular parâmetros destes mecanismos pela aplicação.

O protocolo B-MAC controla os estados do rádio como mostrado na Figura 3 [Correia et al. 2006]. O rádio está inicialmente desligado (estado DISABLED), quando ativado, o rádio vai para o estado IDLE. Neste estado, o rádio avalia o canal e aguarda ocorrência de eventos de transmissão ou recepção. Este estado tem um limite de tempo de duração, que é o tempo de atividade do nó, caso nada ocorra neste tempo, o rádio vai para o estado POWER DOWN, e o rádio é desabilitado por um tempo até que retorna ao estado IDLE.



**Figura 3:** Máquina de estados do Protocolo B-MAC.

Quando é detectada uma transmissão pendente no estado IDLE, e o canal é avaliado como livre, o rádio passa para o estado de PRÉ-TRANSMISSÃO onde o canal é novamente avaliado. Esta segunda avaliação diminui a probabilidade de colisões em casos onde vários nós tentam transmitir ao mesmo tempo.

Quando é amostrado um sinal maior que o ruído do meio, é provável que algum nó esteja transmitindo uma mensagem, então o rádio é colocado no estado de RECEPÇÃO.

Os protocolos apresentados não utilizam totalmente o espectro, deixando faixas livres e utilizando canais que podem estar com baixa qualidade. Para resolver este problema surgiram as Redes de Sensores Sem Fio Cognitivas, que são apresentadas a seguir.

## **2.2 Redes de Sensores Sem Fio Cognitivas**

Redes de Sensores Sem Fio Cognitivas (RSSFCs) são redes distribuídas de nós sensores com rádio cognitivo, que identificam eventos e de maneira colaborativa comunicam suas leituras dinamicamente em um canal livre, de maneira a satisfazer as necessidades da aplicação.

Esta seção apresenta o paradigma de RSSFCs, seus desafios, benefícios e sua arquitetura.

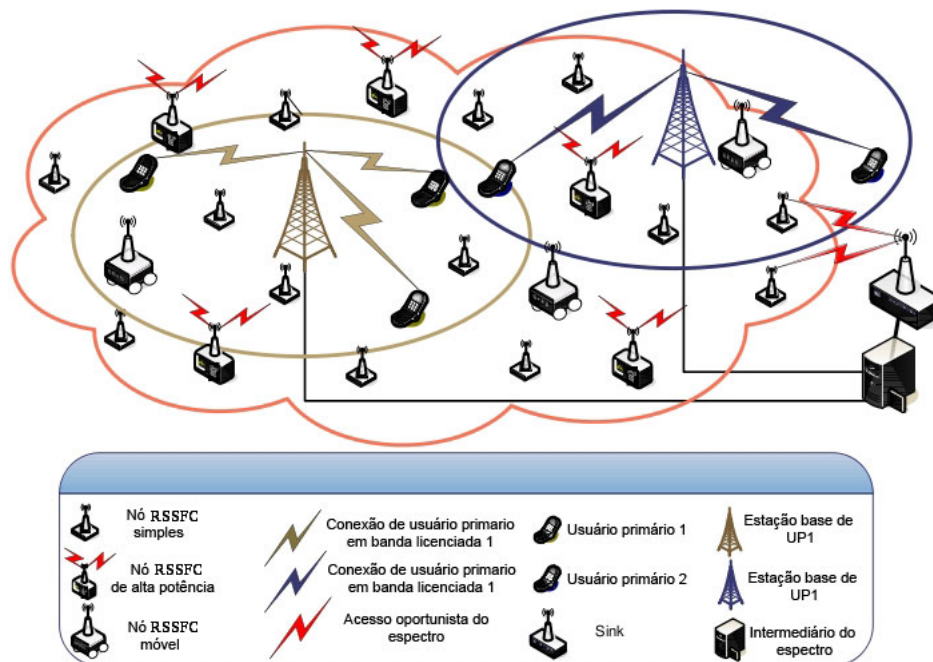
### **2.2.1 Benefícios**

O benefícios das RSSFCs são prevenção de colisões, melhor uso do espectro, economia de energia e uso de redes concorrentes. Cada um destes benefícios são descritos abaixo:

- Evitar colisões: algum evento da rede faz com que os nós próximos transmitam mensagens simultaneamente, na abordagem de rádios não cognitivos isto geraria colisões, mas nas RSSFCs a utilização da cognição consegue evitar colisões. Rádios cognitivos têm a capacidade de avaliar o espectro e encontrar canais livres. os rádios cognitivos conseguem realizar transmissões nestes canais livres ajustando dinamicamente seus parâmetros.
- Melhor uso do espectro: a dinâmica do canal de transmissão, faz com que os nós transmitam em todos os canais. Em uma RSSFs que utiliza apenas um canal os outros canais estão livres, sendo desperdiçados.
- Economia de energia: O uso de apenas um canal, acarreta colisões. Essas colisões necessitam de retransmissões de quadros, com isso energia é consumida. A capacidade de evitar colisões das RSSFCs economiza energia.
- Uso de redes concorrentes: em uma área podem coexistir várias redes, nas RSSFs que não usam rádios cognitivos uma rede interfere na outra, mas com o uso de RSSFCs as redes podem coexistir sem que uma interfira na outra.

### 2.2.2 Arquitetura de uma RSSFC

A Figura 4 [Akan, Karli e Ergul 2009, Adaptada] mostra uma arquitetura de RSSFC. Nesta arquitetura de rede, as informações coletadas sobre o ambiente vão em direção a uma estação base, chamada de *sink* em conexões multi-saltos. Na Figura 4 uma RSSFC é sobreposta a duas redes de usuários primários os nós sensores que podem ser de diversos tipos, conseguem coexistir com os usuários primários identificando as faixas do espectro livres e usando apenas estas.



**Figura 4:** Arquitetura de uma RSSFC.

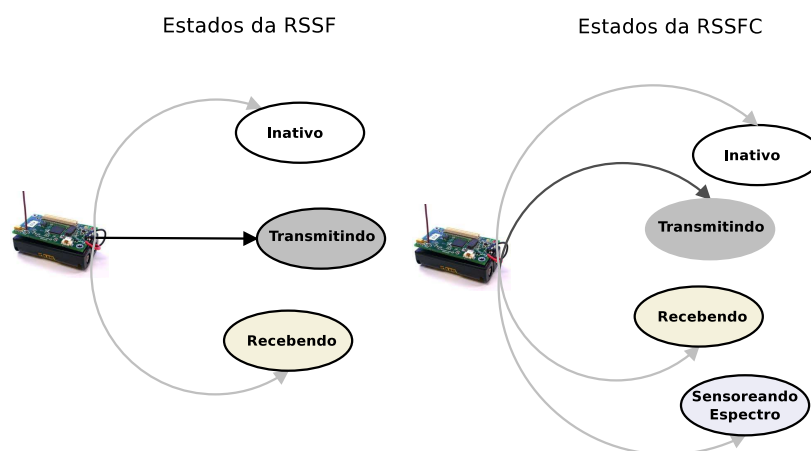
A principal função dos nós RSSFCs é ler informações do ambiente, mas esses também fazem a avaliação do espectro. Dependendo da disponibilidade do espectro, os nós transmitem as informações lidas do ambiente, de maneira oportunista para o próximo salto da rede, até a informação alcançar o *sink*. Além de informações do ambiente, são enviadas também informações de controle para o *sink* como informações de topologia e de alocação de espectro.

Em geral, uma RSSFC pode ser definida como uma rede distribuída de nós sensores sem fio baseadas em rádio cognitivos. Essas RSSFC detectam sinais de eventos, colaboram entre si comunicando as suas leituras de forma dinâmica,

em faixas de frequências disponíveis, por meio de múltiplos saltos, para satisfazer os requisitos de uma aplicação específica [Akan, Karli e Ergul 2009].

As RSSFC possuem desafios semelhantes aos da Redes de Rádios Cognitivos (RRC) e as estratégias envolvidas nas propostas são similares às das RRC. Em uma RSSF, cada nó envia e recebe dados ou está em estado ocioso. No entanto, em um RSSFC, haveria outro estado chamado de estado sensoriamento do canal no qual os nós sensores fariam a detecção do espectro a fim de encontrar oportunidades ou buracos no espectro.

A Figura 5 mostra os diferentes estados para ambas as redes. Entre as várias tarefas para cada nó sensor, a transmissão e recepção de dados são tarefas que mais consomem energia.

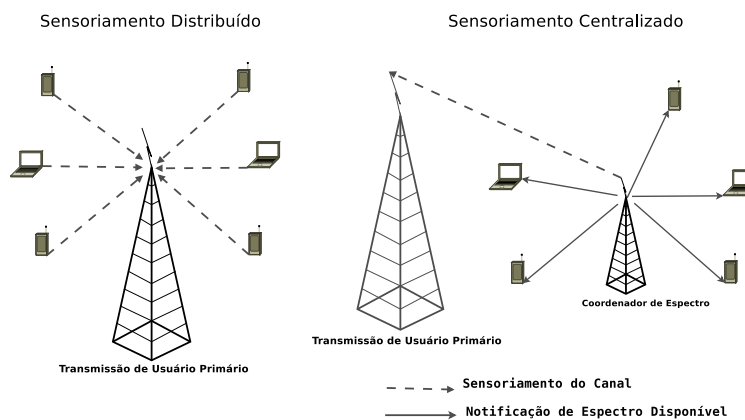


**Figura 5:** Estados de uma RSSFC.

Note que na figura 5 além dos três estados convencionais de uma RSSF, temos o estado de sensoriamento do espectro, em que as oportunidades de trans-

missão em outras frequências são identificadas. As tarefas de detecção do espectro em uma RSSFC podem ser realizadas por estratégias distribuída ou centralizada.

Numa estratégia distribuída, cada sensor concorre com outros sensores pelo acesso ao espectro disponível [Cavalcanti et al. 2008]. Assim, cada nó deve ter a capacidade de sensorear o canal por completo, e determinar uma política para maximizar seus benefícios, tais como o número de transmissões ao longo do tempo.



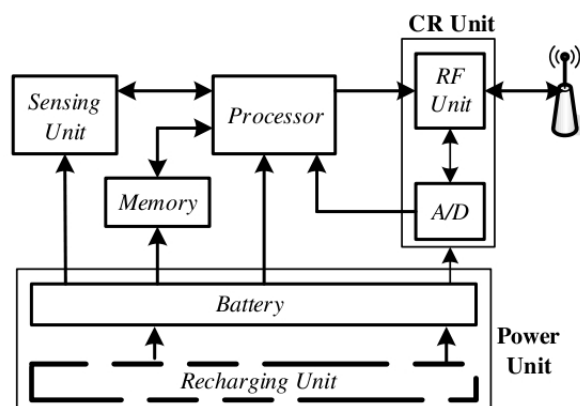
**Figura 6:** Sensoriamento centralizado e distribuído numa RSSFC.

Num esquema centralizado, as oportunidades de espectro são detectadas por uma única entidade chamada coordenador da rede [Gao et al. 2007]. A Figura 6 mostra a comparação entre um esquema de sensoriamento distribuído e um esquema centralizado. No primeiro esquema (distribuído), a detecção do espectro é feita por cada nó, enquanto que no segundo (centralizado) uma estação coordena a detecção do espectro.



### 2.2.3 Arquitetura de um nó RSSFC

A estrutura de um nó RSSFC é formada de unidade de sensoriamento, unidade de processamento, unidade de memória, unidade de energia e unidade de rádio cognitivo como mostrado na Figura 7 [Akan, Karli e Ergul 2009]. A principal diferença entre um nó RSSFC e um nó sensor de uma RSSF normal é a presença de uma unidade de rádio cognitivo, esta unidade tem a capacidade de adaptar dinamicamente seus parâmetros de comunicação de acordo com variações do espectro.



**Figura 7:** Arquitetura de um nó RSSFC.

Os nós RSSFC tem as mesmas limitações de hardware de uma RSSF normal trazendo limitações a unidade de rádio cognitivo. A principal limitação é que o rádio não pode analisar uma faixa muito grande do espectro levando em conta seu baixo poder de processamento, menor potência de transmissão e menor antena.

### 2.3 Modelo de Interferência a Dois Saltos

A interferência é uma das principais causas de degradação de desempenho em redes sem fio. Logo, para melhorar o desempenho destas redes, é necessário ter algum conhecimento de como os enlaces de uma rede podem interferir entre si e em que medida.

Num cenário de redes de sensores sem fio, o desempenho de uma rede pode ser sensivelmente afetado pela interferência entre os nós. Dessa forma, dois enlaces interferentes entre si não podem realizar suas transmissões se estiverem utilizando o mesmo canal. Sendo assim, será adotado na adaptação do protocolo MAC um modelo de interferência a dois saltos, nos moldes do proposto em [Padhye et al. 2005].

No modelo proposto, dois enlaces só serão considerados interferentes se estiverem a dois saltos de distância um do outro. A escolha desse modelo é adequada pois os rádios dos nós só podem se comunicar com um vizinho (a um salto) por vez.

Assim os vizinhos a um salto não devem ser considerados interferentes, uma vez que a interferência entre eles é tratada por mecanismos de contenção baseados no envio de pacotes de controle RTS e CTS, enviados no canal comum de controle e disponíveis no protocolo MAC adotado.

O modelo proposto é importante no mecanismo de alocação de canais, pois este procura mitigar as interferências, e usa o modelo como base para isso.

Para avaliações e testes do mecanismo de alocação dinâmica de canais, é interessante o uso de ambientes de simulação, que conseguem em tempo reduzido

obter resultados aproximados do funcionamento de RSSFs. Com isso é possível realizar maior quantidade de testes em cenários diversificados.

## 2.4 Simulação em RSSF

As redes de sensores sem fio, foram projetadas para usar milhares de nós. Logo, torna-se bastante complexo, ou até mesmo inviável, construir um modelo analítico para uma RSSF que, nesse caso, poderia levar a uma análise simplista com confiança limitada [Egea-Lopez, Vales-Alonso e Martinez-Sala 2005].

Logo, a simulação é essencial para o estudo de RSSF. No entanto, ela exige um modelo apropriado com base em pressupostos sólidos e um arcabouço adequado que facilite a implementação. Além disso, os resultados da simulação dependem do cenário específico em estudo (ambiente), hardware e pressupostos da camada física, que geralmente não são precisos o suficiente para captar o comportamento real de uma RSSF, comprometendo a credibilidade dos resultados [Egea-Lopez, Vales-Alonso e Martinez-Sala 2005].

Assim, de maneira resumida, pode-se dizer que simuladores constituem poderosas ferramentas de análise de desempenho que tem como vantagens:

- Flexibilidade e facilidade necessárias para o estudo das RSSF;
- Possibilidade de alterar parâmetros, adicionar/adaptar módulos nas diferentes camadas;
- Possibilidade de mudar o comportamento do modelo e fazer previsões quanto ao comportamento do sistema;
- Controle do tempo de simulação, acelerando o acontecimento de eventos;

- Possibilidade de verificação do desempenho de algoritmos e protocolos, validando-os antes de serem implementados em uma plataforma específica.

Além das vantagens elencadas acima, a simulação geralmente requer menos abstração do modelo, já que quase todos os detalhes possíveis das especificações do sistema podem ser colocados no modelo de simulação para melhor descrever o sistema real.

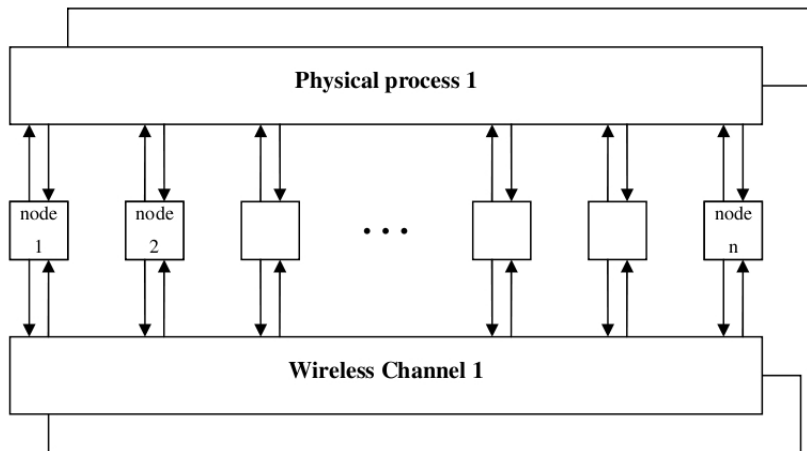
A seguir será apresentado o simulador Castalia [Boulis 2010], utilizado nas simulações feitas neste trabalho.

#### 2.4.1 Castalia

O Castalia é um simulador baseado no *framework* de simulação OMNeT++ [OMNet++ Website]. Este *framework* é extensível, modular e baseado em componentes, o que facilita para desenvolvedores criarem extensões deste.

O OMNeT++ usa como base módulos e mensagens. Os módulos são unidades básicas que se comunicam através de mensagens, que ao serem recebidas executam um trecho de código.

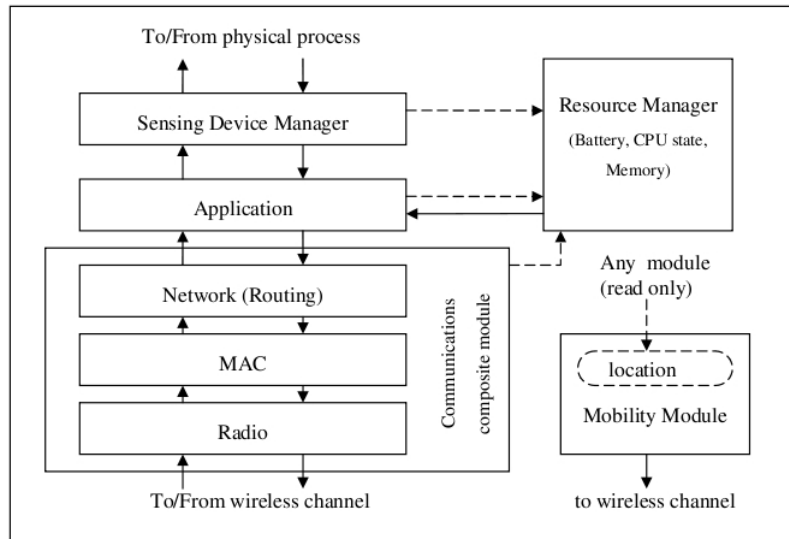
A arquitetura do simulador Castalia é composta de nós (*node*), canal (*Wireless Channel*), e processo físico (*Physical Process*). A Figura 8 mostra a ligação destes, feita através de mensagens. Os nós não se comunicam diretamente, o canal é intermediário a esta conexão. O canal é responsável por avaliar se um nó receberá uma mensagem ou não. O processo físico é responsável por criar ambientes de simulação para medições dos sensores. Podem coexistir mais de um canal e processo físico, caso o usuário necessite [Boulis 2009].



**Figura 8:** Arquitetura do simulador Castalia

O nó é um módulo composto, ele apresenta uma estrutura de camadas baseada no modelo *Open Systems Interconnection* (OSI). Na figura 9 [Boulis 2009] são usadas setas sólidas quando um módulo é ligado a outro através de mensagens, e são usadas setas tracejadas quando os nós são ligados através de chamadas de métodos.

Todos os submódulos do nó estão ligados com o *Resource Manager*, um módulo que é responsável por controlar e guardar informações úteis como estado do processador (CPU), bateria, e memória. Outro módulo presente no nó é o *Mobility Module*, um módulo que cuida da posição do nó e da movimentação deste.



**Figura 9:** Estrutura de um nó

### 3 MAD-Channel

Nesta seção será apresentado o mecanismo de alocação dinâmica de canais. A alocação dinâmica de canais tem como objetivo escolher o canal mais adequado para cada nó e coordenar as comunicações entre os nós que estão em diferentes canais.

A alocação dinâmica de canais faz parte da cognição de espectro. A cognição de espectro pode ser dividida em quatro etapas [Akyildiz, Lee e Chowdhury 2009], trazendo estas etapas para o escopo de RSSFCs temos a seguinte divisão:

1. Sensoriamento do espectro: um nó RSSFC deve identificar as porções do espectro livres.
2. Decisão do espectro: uma vez definidas as porções livres do espectro deve ser escolhido o melhor canal para a transmissão.
3. Compartilhamento do espectro: o uso do espectro deve ser coordenado para evitar que dois nós usem canais interferentes.
4. Mobilidade do espectro: quando uma faixa do espectro é requisitada por um usuário primário, a RSSFC deve liberar esta faixa.

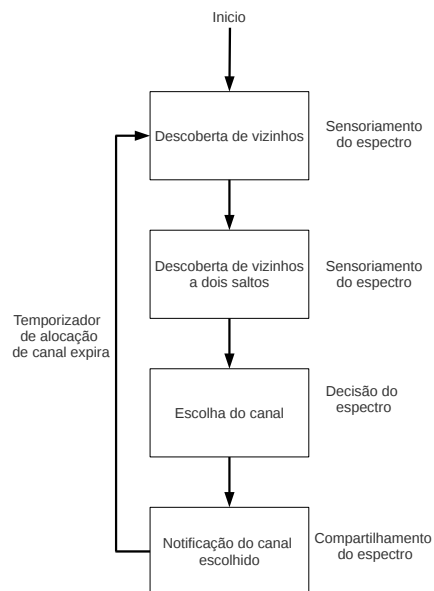
Todas estas etapas necessitam de uma quinta função, o controle de canal comum (CCC) que tem como objetivo sincronizar os canais por onde serão enviadas mensagens.

O MAD-Channel foi criado a partir desta divisão visando atender as três primeiras etapas, sensoriamento, decisão e compartilhamento do espectro. O

mecanismo funciona de uma maneira totalmente distribuída, cada nó faz a escolha do canal localmente e notifica aos seus nós interferentes que o canal está ocupado.

O MAD-Channel é dividido em quatro etapas, cada etapa realiza uma função na divisão proposta por Akyildiz [Akyildiz, Lee e Chowdhury 2009].

1. Descoberta de vizinhos;
2. Descoberta de vizinhos a dois saltos;
3. Escolha do canal;
4. Notificação do canal escolhido;



**Figura 10:** Fluxograma do MAD-Channel.



A figura 10 ilustra o funcionamento do mecanismo e a relação das etapas do MAD-Channel com o proposto por Akyildiz. Ao ser ligado, cada nó encontra os seus vizinhos, e logo após a sua lista de vizinhos a dois saltos estas duas etapas se enquadram em sensoreamento do espectro já que são pre-requisitos para a identificação dos canais disponíveis. Tendo estas duas listas, cada nó escolhe um canal, nesta etapa é realizada decisão de espectro. Após escolhido o canal, este deve ser notificado como ocupado na rede caracterizando o compartilhamento do espectro. Para o CCC é usado um mecanismo de sincronização de canais.

Nas seções 3.1 a 3.4 serão descritos detalhadamente os algoritmos para cada uma das etapas do algoritmo.

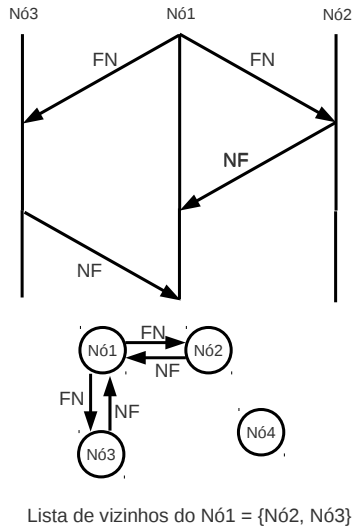
### 3.1 Sensoreamento do espectro

A primeira etapa do mecanismo é a descoberta de vizinhos, nesta fase é montada a lista de vizinhos a um salto ( $LVN_i$ ). Esta etapa é iniciada logo após o nó ser ligado.

A Figura 11 ilustra o procedimento de descoberta de vizinhos. Ao iniciar o procedimento o nó 1 envia uma mensagem  $FN$  em *broadcast* para seus vizinhos imediatos. Os nós 2 e 3 ao receberem uma mensagem  $FN$  enviam uma mensagem  $NF$  como resposta. Quando o nó 1 recebe esta mensagem  $NF$ , este adiciona o remetente na sua lista de vizinhos. O processo é formalizado no algoritmo 1.

Quando a lista de vizinhos estiver montada, o mecanismo entra na segunda fase, que é a descoberta de vizinhos a dois saltos.

O modelo de interferência apresentado na seção 2.3, considera que dois nós são interferentes se são separados por dois saltos de distância na RSSF con-



**Figura 11:** Procedimento de descoberta de vizinhos.

---

**Função** DescobreVizinhos ( $N_i$ )

---

/\* Procedimento para obter a lista vizinhos de um determinado  $N_i$  \*/  
 /\*  $LVN_i$ : Lista de vizinhos a 1 *hop* do nó  $i$  \*/  
 /\*  $N_i, N_j$ : Dois nós vizinhos quaisquer \*/  
 /\* NosRSSF: Conjunto dos nós sensores \*/

**1 início**

2  $LVN_i \leftarrow \emptyset$ ;

3 **para cada**  $N_j \in NosRSSF$  **faça**

4  $N_i$  Envia broadcast para  $N_j$ ;

5 **se**  $N_j$  Responde broadcast para  $N_i$  **então**

6  $LVN_i \leftarrow LVN_i \cup N_j$ ;

7 **fim se**

8 **fim para cada**

9 **retorna**  $LVN_i$

10 **fim**

---

siderada. Dessa forma, é necessário um procedimento de descoberta de vizinhos a dois saltos.

Diferente do método de obtenção de vizinhos a um salto, o método de obtenção da lista de vizinhos a dois saltos (*LV2HN*) se inicia não no nó que cria a lista, mas sim em todos os seus vizinhos.

Ao iniciar a segunda etapa cada nó envia a sua lista de vizinhos em uma mensagem em *broadcast*, e ao receber esta mensagem o nó receptor utiliza esta lista para montar a sua lista de vizinhos a dois saltos. O algoritmo 2 define quais nós devem ser adicionados a lista de vizinhos a dois saltos.

---

**Função** ListadeVizinhos2Hops ( $N_i, LVN_i$ )

---

```

/* Procedimento para obter a lista vizinhos a dois
   hops de um determinado  $N_i$  */
/*  $LVN_i$ : Lista de vizinhos a 1 hop do n i */
/*  $N_i$ : Nós cujos vizinhos são os nós  $N_j$  */
/*  $N_j$ : Nó  $j \in LVN_i$  */
1 início
2    $LV2HN_i \leftarrow \emptyset$ ;
3   para cada  $N_j \in LVN_i$  faça
4      $LV2HN_i \leftarrow LV2HN_i \cup (LVN_j - LVN_i) - N_i$ ;
5   fim para cada
6   retorna  $LV2HN_i$ 
7 fim

```

---

Os nós a serem adicionados na lista de vizinhos a dois saltos devem ser os nós que estão presentes na lista recebida e ao mesmo tempo não estão na lista de vizinhos do nó que a recebeu, e também não é ele próprio.

Tendo montada a lista de vizinhos a dois saltos começa a terceira fase do algoritmo que é a escolha do canal.

### 3.2 Decisão do espectro

Na terceira fase cada nó deve escolher o canal que irá transmitir. Esta escolha pode ser baseada em métricas do enlace. A métrica utilizada será o *Received Signal Strength Indication* (RSSI). Esta métrica foi escolhida por ser a métrica mais simples de ser obtida, e com isso diminuir o número de operações que devem ser evitadas no cenário de RSSF. Apesar de ser facilmente obtido, este simboliza o estado de um canal quanto a sua qualidade.

O algoritmo 3 verifica entre a lista de canais disponíveis qual o canal que possui o menor RSSI e este canal é escolhido pelo nó.

---

**Função** *escolheCanal* (*listaDeCanais*)

---

```

/* Escolhe o canal a ser usado. */
/* melhorCanal: armazena o melhor canal */
/* listaDeCanais: Lista de canais do nó */
/* Cada canal possui um atributo RSSI que indica o
   valor de potência no receptor */
1 início
2   para cada  $C_i \in listaDeCanais$  faça
3     se  $C_i$  estiver livre então
4       se  $C_i.RSSI \leq melhorCanal.RSSI$  então
5          $melhorCanal = C_i$ 
6       fim se
7     fim se
8   fim para cada
9   retorna melhorCanal
10 fim

```

---

Este canal deve então ser notificado como ocupado na rede, procedimento feito na próxima etapa do mecanismo.

### 3.3 Compartilhamento do espectro

Como caracterizado no modelo de interferência a dois saltos (Seção 2.3) os nós interferentes são os separados a dois saltos, portanto estes que devem ser notificados do canal escolhido.

Para a notificação são usadas mensagens de *broadcast* que atinjam dois saltos de distância do nó notificador. Mas para evitar que sejam feitos envios redundantes o nó notificador procura identificar interseções entre as listas de vizinhos dos seus nós vizinhos. Tal procedimento é descrito no algoritmo 4.

---

**Procedimento** ReencaminhaBroadcast ( $LVN_i$ ,  $LV2HN_i$ )

---

```

/* Procedimento que decide se um nó na lista  $LVN_i$ 
   reencaminhará broadcast */
/*  $Lista_{aux}$ : Lista de vizinhos a 1 hop do nó i */
/*  $noMaiorGrau(LVN_i)$ : Retorna o nó com maior grau de
   conectividade de lista. */
/*  $naoTodosMarcados(LVN_i)$ : retorna verdadeiro se
   todos os nós da lista estiverem marcados e falso
   senão. */
1 início
2    $NoMaiorGrau = noMaiorGrau(LVN_i)$ ;
3   enquanto  $naoTodosMarcados(LVN_i)$  ou
    $naoTodosMarcados(LV2HN_i)$  faça
4     Marca  $NoMaiorGrau$  como Reecaminhador de broadcast;
5     Marca todos os vizinhos de  $NoMaiorGrau$  como notificados;
6   fim enquanto
7 fim

```

---

A estratégia do algoritmo 4 é garantir que todos os nós a dois saltos sejam notificados do canal escolhido, tendo o mínimo de *broadcasts* possíveis.

Para isso são procurados os nós vizinhos que possuem o maior grau de conectividade (obtido através do tamanho de sua lista de vizinhos), este nó é então marcado como reencaminhador de *broadcast* na lista de vizinhos e todos os seus nós vizinhos são marcados como nós que já serão notificados na lista de vizinhos a dois saltos. O nó escolhido deve ser o de maior grau de conectividade pois este marcará o maior número de nós a dois saltos como notificados.

O processo repete até que todos os nós da lista de vizinhos a dois saltos sejam marcados como notificados ou quando todos os vizinhos sejam marcados como reencaminhadores de *broadcast*. Este ultimo caracteriza o pior caso do algoritmo que é quando todos os vizinhos deverão reencaminhar o *broadcast*.

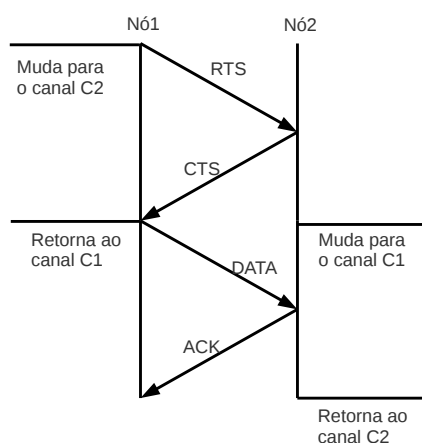
Tendo então quais são os nós que devem reencaminhar o *broadcast* o nó notificador envia uma mensagem do tipo NOTIFICACAO\_CANAL\_1\_HOP contendo o canal notificado e uma lista contendo os nós que devem reencaminhar esta mensagem. Ao receber uma mensagem deste tipo um nó verifica se está na lista de reencaminhadores de broadcast, caso esteja, este envia uma mensagem do tipo NOTIFICACAO\_CANAL\_2\_HOP contendo apenas o canal notificado. Quando um nó recebe esta mensagem, este marca o canal recebido como ocupado.

### **3.4 Controle de Canal Comum**

Em uma transmissão um nó irá transmitir em um canal alocado pelo mecanismo, mas este canal pode não ser o canal que o destino está escutando. Deve então ser empregado um mecanismo para sincronizar os nós afim de que o destino da mensagem escute no canal certo durante a transmissão.

Dessa forma, foi necessário adaptar o protocolo MAC, adicionando um mecanismo de sincronização de canal.

A figura 12 ilustra a sincronização dos canais.



**Figura 12:** Sincronização do canal de transmissão

Este mecanismo consiste em toda vez que um N1 enviar uma mensagem RTS, este verifica na lista de vizinhos o canal (C2) em que o destino (N2) está escutando e muda para esse canal no rádio

Ao enviar a mensagem de RTS, o N1 envia o canal C1 no qual será transmitida a mensagem, canal que é o escolhido pelo algoritmo 3. Ao receber o RTS o transmissor ativa um temporizador CHANGE\_CHANNEL\_TO\_TRANSMISSION e envia uma mensagem CTS.

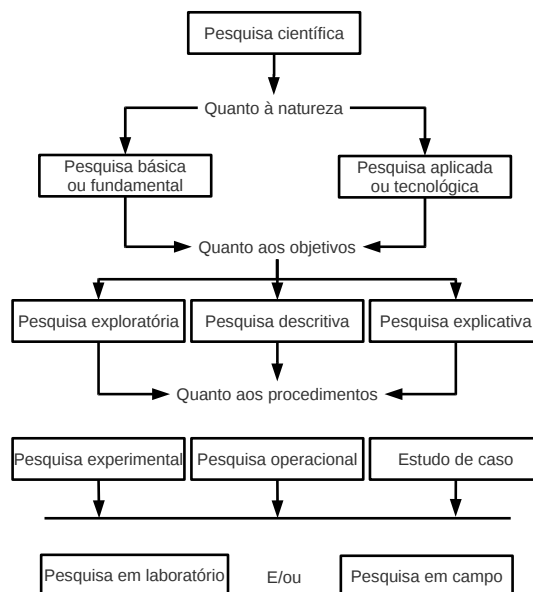
Ao receber o CTS o N1 retorna ao seu canal original (C1) de transmissão e envia o pacote. Ao receber o pacote o n1 receptor envia um ACK e retorna ao canal de origem (C2).



## 4 Metodologia

### 4.1 Classificação do Trabalho

Zambalde, Pádua e Alves (2008) propuseram uma classificação de tipos de pesquisa científica, classificando-a quanto a natureza, quanto aos objetivos e quanto aos procedimentos. A figura 13 mostra esta divisão.



**Figura 13:** Classificação dos tipos de pesquisa

Este trabalho pode ser classificado quanto a natureza aplicada pois se utiliza de conhecimentos básicos para geração de novas tecnologias. Quanto aos objetivos, esta pesquisa se encaixa como exploratória, já que tem como objetivo desenvolvimento de tecnologias. Quanto aos procedimentos, este trabalho é ex-

perimental por empregar simulações para avaliação e desenvolvimento do mecanismo.

## **4.2 Materias e Métodos**

### **4.2.1 Métricas Avaliadas**

Os resultados obtidos nesse trabalho se basearam nas seguintes métricas de avaliação de desempenho:

- Taxa média de entrega de pacotes: porcentagem média de pacotes entregues médios de toda a rede;
- Atraso fim a fim: tempo médio em milissegundos que uma mensagem demora a ser transmitida e decodificada corretamente no seu receptor de todas as mensagens transmitidas;
- Consumo de energia: energia total consumida pelo nó em mJoules;
- *Handoff*: número de vezes que todos os nós troca de canal nas iterações do mecanismo;

### **4.2.2 Cenários de Avaliação**

Os cenários avaliados combinam parâmetros de densidade de nós, com níveis de ruído base do canal. Com relação a densidade foram estabelecidos dois níveis de densidade, variando-se a área do cenário avaliado. Isso possibilita analisar o impacto que a alta e baixa densidade dos nós tem no mecanismo de alocação dinâmica do canal em termos de taxa média de entrega, troca de canais e consumo de energia.

Já o parâmetro ruído base do canal pode ser variado de acordo com três níveis baixo ( $-100dBm$ ), médio ( $-95dbm$ ) e alto ( $-92dBm$ ), possibilitando avaliar o impacto que esse parâmetro, em conjunto com a densidade nós, tem nas medidas citadas anteriormente. Estes valores foram escolhidos baseando-se em simulações que mostraram que ao diminuir o valor para menos de  $-100dBm$  o ruído base era tão baixo que não se diferenciava de  $-100dBm$ , e ao elevar o valor para mais que  $-92dBm$  nenhum dos dois protocolos conseguiam entregar um número significativo de pacotes para ser realizada uma análise.

Levando em consideração a combinação das métricas e cenários citados foi possível comparar o desempenho do protocolo proposto (usando o MAD-Channel) com o protocolo T-MAC disponível no simulador Castalia. Tais resultados são apresentados na seção 5.

### 4.2.3 Classe Geradora de Tráfego

Afim de avaliar o comportamento do mecanismo em diversos tipos de tráfego foi implementada uma classe geradora de tráfego.

A classe geradora de tráfego recebe como parâmetro o número de fluxos e o intervalo de transmissão, tem um temporizador chamado SEND\_PACKET que é ativado periodicamente de acordo com o parâmetro de intervalo de transmissão. Quando o temporizador SEND\_PACKET é ativado, são sorteados N fluxos aleatórios entre um par de nós vizinhos<sup>2</sup>. Estes fluxos devem produzir colisões

---

<sup>2</sup> Não foi considerado o envio de fluxos para nós que não são vizinhos, devido a limitações do simulador que não apresentou um algoritmo de roteamento adequado aos cenários que foram avaliados.

e contenções artificialmente, já que fazem com que nós enviemos mensagens ao mesmo tempo.

Em seguida são enviadas mensagens para esses nós indicando que estes devem iniciar o envio de pacotes. Ao receber a mensagem, o nó sorteia um vizinho e envia um pacote para ele.

#### **4.2.4 Metodologia de Simulação**

A fim de minimizar a aleatoriedade do sorteio de fluxos, foram realizadas trinta e três simulações de cada cenário definido, e os valores apresentados são a média destas simulações. Foram usados dezoito nós usando rádio CC2420, colocados no campo aleatoriamente seguindo uma distribuição uniforme. O tempo de simulação foi de quinhentos segundos.

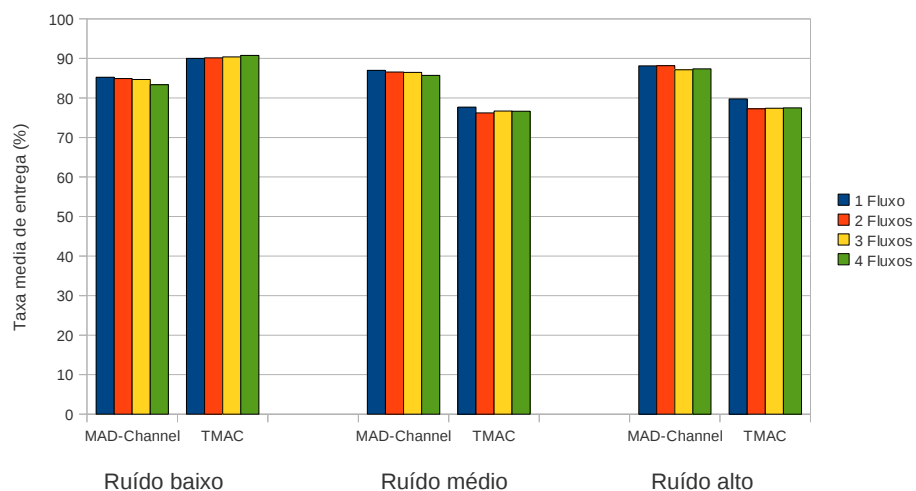
A classe geradora de tráfego envia pacotes a cada um segundo. O temporizador de alocação de canais era ativado com o tempo de trinta segundos.

## 5 Resultados e Discussão

### 5.1 Taxa Média de Pacotes Entregues

#### 5.1.1 Cenário de Baixa Densidade

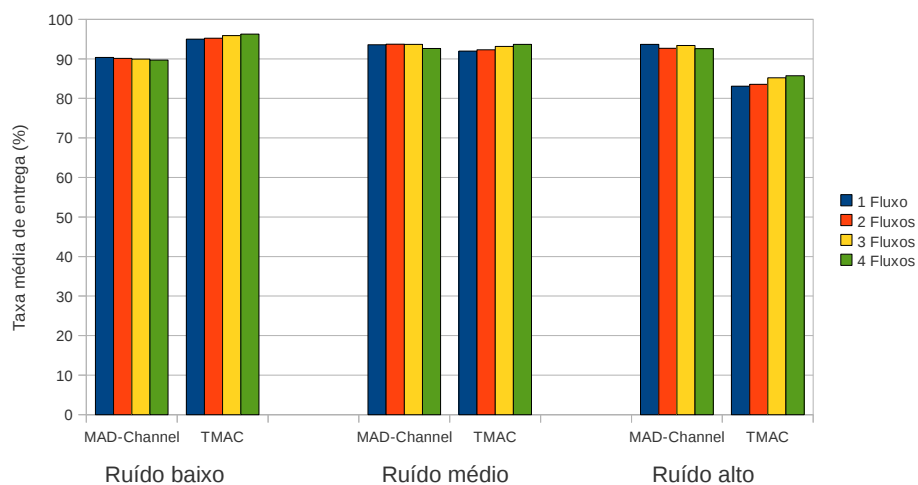
A Figura 14 mostra a taxa de entrega com baixa densidade dos nós. Como pode ser visto no gráfico, o T-MAC obtém melhores resultados do que o MAD-Channel quando o ruído base é baixo, obtendo aproximadamente 90% contra 86% entrega. Porém com o aumento do ruído base, o T-MAC diminui a taxa de entrega de pacotes, o que não ocorre com o MAD-Channel que se mantém próximo de 86% enquanto o T-MAC reduz a taxa de entrega para 78%. Não foi possível estabelecer um padrão quanto aos fluxos, estes sofrem influência da variação do sorteio da classe geradora de tráfego.



**Figura 14:** Taxa de entrega de pacotes em um cenário de baixa densidade de nós.

### 5.1.2 Cenário de Alta Densidade

A Figura 15 mostra a taxa de entrega com alta densidade de nós. Neste ocorre o mesmo fenômeno verificado com baixa densidade. O T-MAC obtém melhores resultados que o MAD-Channel quando o ruído base está no nível baixo, tendo aproximadamente 96% de entrega contra 90% do MAD-Channel. Com o aumento do ruído o T-MAC entrega apenas 86% enquanto o MAD-Channel se mantém próximo de 90%. Assim como no cenário de baixa densidade não foi possível estabelecer um padrão a respeito dos fluxos pelo mesmo motivo da seção 5.1.1.

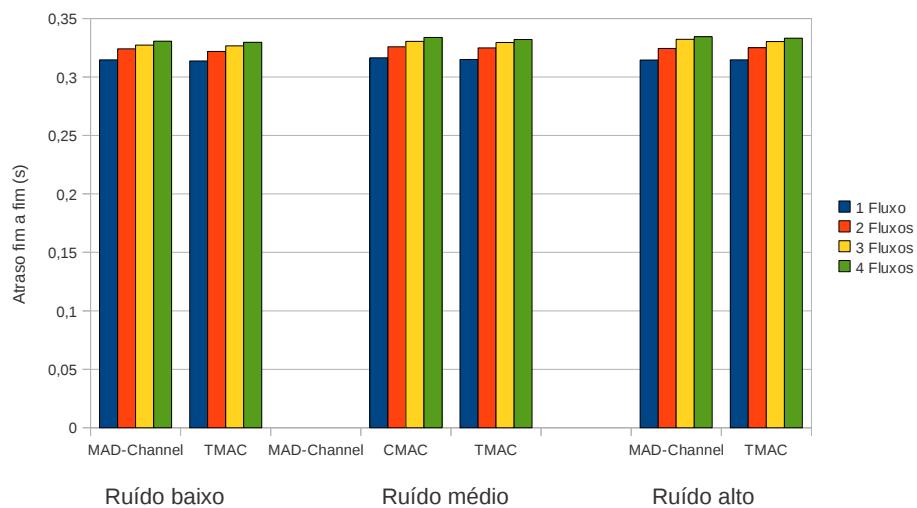


**Figura 15:** Taxa de entrega de pacotes em um cenário de alta densidade de nós.

## 5.2 Atraso fim a fim

### 5.2.1 Cenário de Baixa Densidade

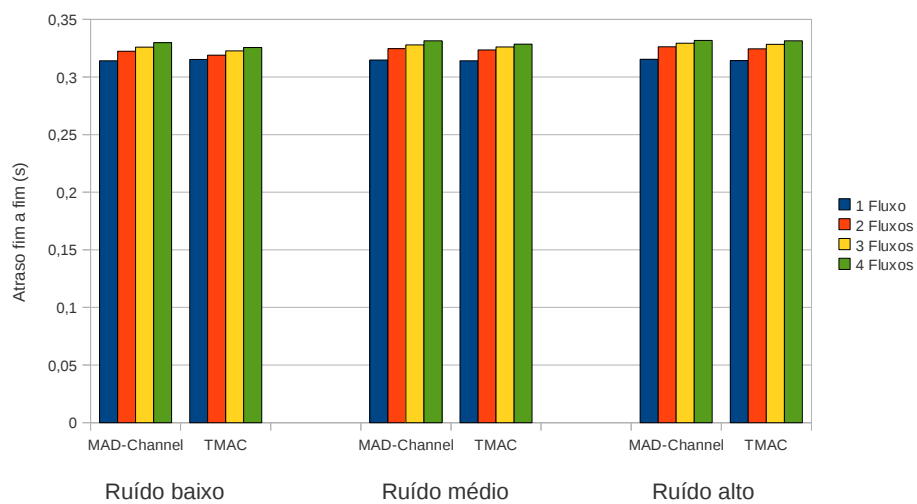
A Figura 16 mostra o atraso fim a fim para baixa densidade, como pode ser observado a métrica não sofre alteração considerável, as pequenas diferenças ocorridas são variações decorrentes dos fluxos sorteados pela classe geradora de tráfego. A medida que o número de fluxos aumenta, o atraso aumenta ligeiramente, isso ocorre por causa do número de contenções e colisões que aumentam a medida que o número de fluxos aumenta.



**Figura 16:** Atraso fim a fim em um cenário de baixa densidade de nós.

### 5.2.2 Cenário de Alta Densidade

A Figura 17 mostra o atraso fim a fim para alta densidade de nós, e assim como na Figura 16, de baixa densidade, não há diferença considerável dessa métrica nos dois protocolos comparados.



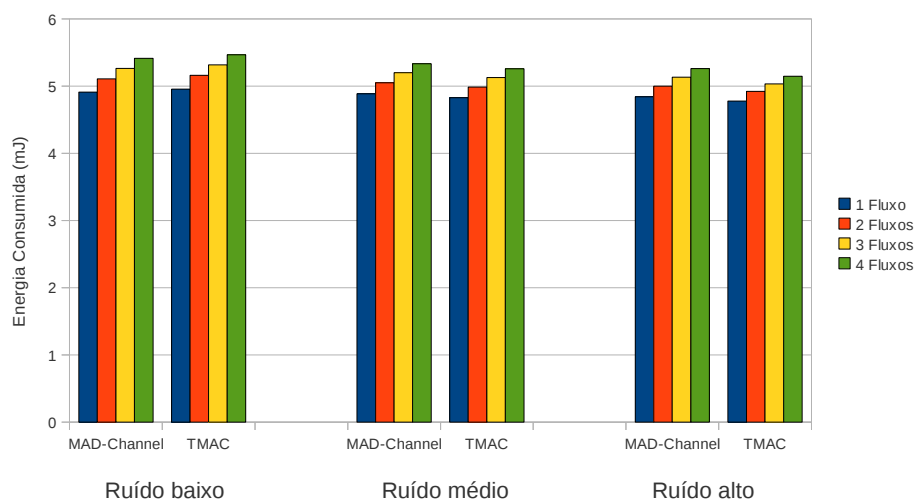
**Figura 17:** Atraso fim a fim de pacotes em um cenário de alta densidade de nós.



## 5.3 Consumo de energia

### 5.3.1 Cenário de Baixa Densidade

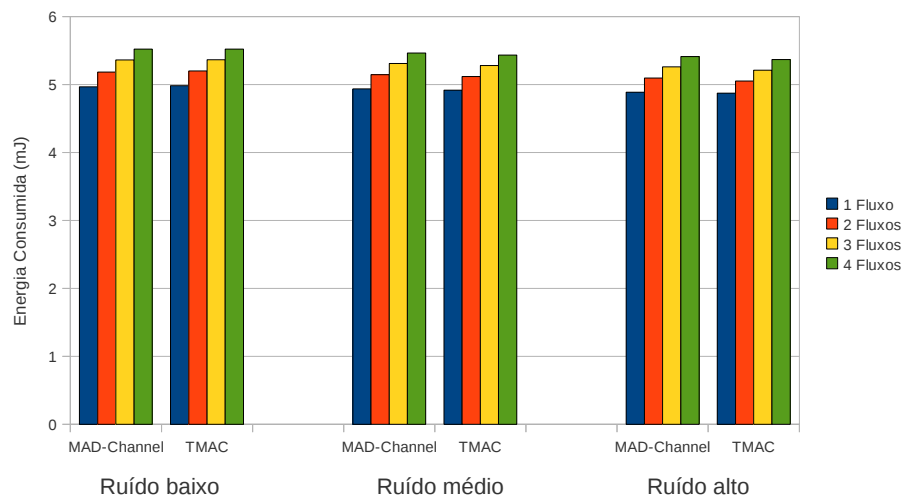
A Figura 18 mostra a energia consumida para baixa densidade de nós. Pode-se observar que T-MAC consumiu pouco a mais energia que o MAD-Channel para um cenário com ruído mais baixo, porém a medida que o ruído aumenta, o MAD-Channel passa a consumir mais energia. Podemos concluir que o consumo de energia está ligado com a taxa de entrega, já que o que mais consome energia é o que mais entrega pacotes.



**Figura 18:** Consumo de energia em um cenário de baixa densidade de nós.

### 5.3.2 Cenário de Alta Densidade

A Figura 19 mostra a energia consumida para alta densidade de nós. O resultado segue o padrão e apresenta gráficos parecidos com o cenário de baixa densidade.

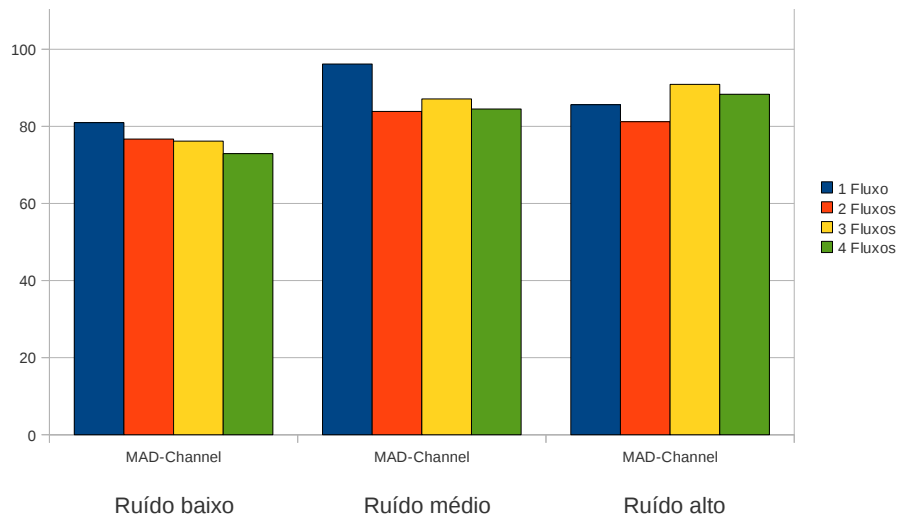


**Figura 19:** Consumo de energia em um cenário de alta densidade de nós.

## 5.4 Handoff

### 5.4.1 Cenário de Baixa Densidade

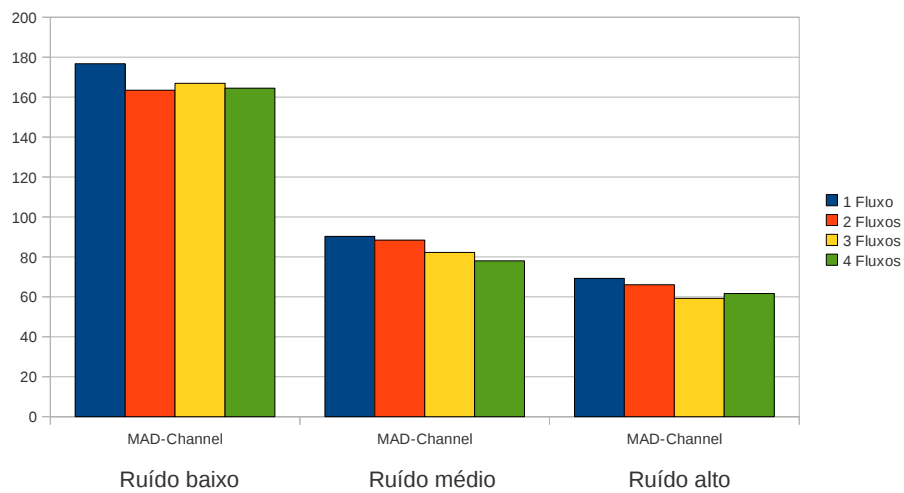
A Figura 20 mostra o *handoff* para baixa densidade de nós. A troca de canais se manteve próxima de 80 para todos os valores do ruído base.



**Figura 20:** *Handoff* em um cenário de baixa densidade de nós.

### 5.4.2 Cenário de Alta Densidade

A Figura 20 mostra o *handoff* para baixa densidade de nós. Diferente do cenário de baixa densidade, o MAD-Channel trocou de canais mais vezes no cenário de ruído baixo de 160 a 180 vezes, e a medida que o ruído aumentava o *handoff* o diminuía, chegando a 60 trocas no cenário de alto ruído.



**Figura 21:** *Handoff* em um cenário de alta densidade de nós.

## 6 Conclusões

O mecanismo de alocação dinâmica MAD-Channel foi simulado avaliado em diversos cenários variando densidade dos nós e ruído base, e comparado com o protocolo T-MAC.

As simulações mostraram que o MAD-Channel, no cenário de baixo ruído base, não consegue entregar mais pacotes que o protocolo T-MAC para altas e baixas densidades, entregando 86% contra 90% no cenário de baixa densidade de nós e 90% contra 96% no cenário de alta densidade de nós. Mas a medida que o ruído aumenta, o MAD-Channel mantém a taxa de entrega enquanto o T-MAC diminui as entregas de pacotes. No cenário com alto ruído o T-MAC entrega aproximadamente 78% contra 86% do MAD-Channel no cenário de baixa densidade, e com alta densidade de nós o T-MAC entrega aproximadamente 84% contra 90% do MAD-Channel.

Avaliando atraso fim a fim e consumo de energia, o MAD-Channel se mantém bem próximo ao do T-MAC, métricas que eram consideradas o forte deste protocolo.

Para trabalhos futuros são sugeridas implementações do MAD-Channel baseando-se em outros protocolos MAC, métodos mais complexos de classificação de canal na fase de escolha de canal e avaliação do mecanismo com redes multi-salto.

## 7 Referências Bibliográficas

- [Akan, Karli e Ergul 2009]AKAN, O.; KARLI, O.; ERGUL, O. Cognitive radio sensor networks. *Network, IEEE*, v. 23, n. 4, p. 34 –40, july-august 2009. ISSN 0890-8044.
- [Akyildiz, Lee e Chowdhury 2009]AKYILDIZ, I.; LEE, W.-Y.; CHOWDHURY, K. Spectrum management in cognitive radio ad hoc networks. *Network, IEEE*, v. 23, n. 4, p. 6–12, July-August 2009. ISSN 0890-8044.
- [Akyildiz et al. 2008]AKYILDIZ, I. et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *Communications Magazine, IEEE*, v. 46, n. 4, p. 40–48, April 2008. ISSN 0163-6804.
- [Akyildiz et al. 2006]AKYILDIZ, I. F. et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Comput. Netw.*, Elsevier North-Holland, Inc., New York, NY, USA, v. 50, n. 13, p. 2127–2159, 2006. ISSN 1389-1286.
- [Anatel 2009]ANATEL. *Atribuição de Faixas de Frequência no Brasil*. 2009. [Http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalRedireciona.do?codigoDocumento=98580](http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalRedireciona.do?codigoDocumento=98580). Acessado em Junho de 2011.
- [Boulis 2009]BOULIS, A. *Castalia: A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks. User's Manual*. [S.l.], 2009. Disponível em: <<http://castalia.npc.nicta.com.au/pdfs/Castalia>>.
- [Boulis 2010]BOULIS, A. *Castalia: A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks. User's Manual*. 2010. URL:

<http://castalia.npc.nicta.com.au/pdfs/Castalia>Acessada em 21/09/2010. Acesso em: 21/09/2010.

[Cavalcanti et al. 2008]CAVALCANTI, D. et al. Cognitive radio based wireless sensor networks. In: *Computer Communications and Networks, 2008. ICCCN '08. Proceedings of 17th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6. ISSN 1095-2055.

[Correia et al. 2006]CORREIA, L. H. A. et al. Ajustando a potência de transmissão em protocolos mac. In: *24º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 589–604.

[Dam e Langendoen 2003]DAM, T. van; LANGENDOEN, K. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. New York, NY, USA: ACM, 2003. (SenSys '03), p. 171–180. ISBN 1-58113-707-9. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/958491.958512>>.

[Egea-Lopez, Vales-Alonso e Martinez-Sala 2005]EGEA-LOPEZ, E.; VALES-ALONSO, J.; MARTINEZ-SALA, A. Simulation tools for wireless sensor networks. *Science*, p. 2–9, 2005. Disponível em: <<http://www.ait.upct.es/eegea/pub/spects05.pdf>>.

[FCC 2005]FCC. *ET Docket no. 03-108. Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies (Tech. Rep.)*. March 2005.

- [Gao et al. 2007]GAO, S. et al. Energy efficient adaptive modulation in wireless cognitive radio sensor networks. In: *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 3980–3986.
- [McHenry 2005]MCHENRY, M. A. *NSF spectrum occupancy measurements project summary*. 2005.  
[Http://www.sharedspectrum.com/inc/content/measurements/nsf/NSF\\_Project\\_Summary.pdf](http://www.sharedspectrum.com/inc/content/measurements/nsf/NSF_Project_Summary.pdf).  
Acessada em 21/01/2010. Acesso em: 21/01/2010.
- [OMNet++ Website]OMNET++ Website. <http://www.omnetpp.org/>.
- [Padhye et al. 2005]PADHYE, J. et al. Estimation of link interference in static multi-hop wireless networks. In: *Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement*. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2005. (IMC '05), p. 28–28. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1251086.1251114>>.
- [Polastre, Hill e Culler 2004]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: ACM, 2004. (SenSys '04), p. 95–107. ISBN 1-58113-879-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1031495.1031508>>.
- [Ye, Heidemann e Estrin 2004]YE, W.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 12, n. 3, p. 493–506, 2004. ISSN 1063-6692.



[ZAMBALDE, PÁDUA e ALVES 2008]ZAMBALDE, A. L.; PÁDUA, C. I. P. S.; ALVES, R. M. *O documento científico em Ciência da computação e Sistemas de Informação*. 2008.