



**THIAGO FLORIANO WYKRET**

**COEXISTÊNCIA EM REDES DE SENSORES  
SEM FIO: TÉCNICAS DE SELEÇÃO DINÂMICA DE  
CANAIS**

**LAVRAS - MG**

**2014**

**THIAGO FLORIANO WYKRET**

**COEXISTÊNCIA EM REDES DE SENSORES SEM FIO:  
TÉCNICAS DE SELEÇÃO DINÂMICA DE CANAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, área de concentração em Redes de Computadores e Sistemas Embarcados, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Luiz Henrique Andrade Correia

**LAVRAS - MG**

**2014**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e  
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Wykret, Thiago Floriano.

Coexistência em redes de sensores sem fio : técnicas de seleção dinâmicas de canais / Thiago Floriano Wykret. – Lavras : UFLA, 2014.

74 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Luiz Henrique Andrade Correia.

Bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Interferência. 3. Coexistência. 4. Redes sem fio. 5. Seleção de canal. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 004.6

**THIAGO FLORIANO WYKRET**

**COEXISTÊNCIA EM REDES DE SENSORES SEM FIO:  
TÉCNICAS DE SELEÇÃO DINÂMICA DE CANAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, área de concentração em Redes de Computadores e Sistemas Embarcados, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 27 de fevereiro de 2014.

Dr. Bruno Henrique Groenner Barbosa      UFLA

Dr. Carlos de Castro Goulart                UFV



Dr. Luiz Henrique Andrade Correia  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2014**

*À minha amada e companheira Bárbara, que esteve comigo em todos os momentos dando o apoio fundamental para que o sucesso fosse alcançado.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar a força e a determinação necessárias. À minha amada companheira Bárbara, por todo amor, incentivo e suporte dedicados a mim. Serei eternamente grato pelo amor e paciência incondicionais recebidos de você, que soube compreender meus momentos de ausência e de dificuldade em que fraquejei. Agradeço a você por todos os sacrifícios e as orações para que eu pudesse concluir este mestrado. Aos meus pais, Heron e Abadia, e minhas avós, Diva e Francisca, que sempre me apoiaram e incentivaram meus estudos. Ao meu orientador, Prof. Luiz Henrique, pelo tema da dissertação, pela paciência, pela enorme dedicação a este trabalho e por compreender a minha necessidade de dividir o tempo entre o mestrado e o trabalho na DGTI. Aos colegas e amigos da DGTI pela colaboração, principalmente Thiago Ramos, Anderson, Marcos, Clayton e Plínio que ficaram sobrecarregados para me ajudar. Agradeço ao Diretor da DGTI, Erasmo, por todo o incentivo e apoio. Aos amigos Antônio Rafael e Vladimir pelas várias horas de convivência e estudos, madrugadas na UFLA e por todo o apoio mútuo para que o sucesso fosse alcançado. À Universidade Federal de Lavras pelo apoio e incentivo, principalmente ao reitor Prof. José Roberto Scolforo que me proporcionou a oportunidade de cursar este mestrado. À Capes pelo imprescindível apoio financeiro.

## RESUMO

Devido ao desenvolvimento e à popularização de dispositivos móveis nos últimos anos, a demanda por comunicação sem fio tem aumentado cada vez mais. Uma ampla variedade de aplicações está sendo desenvolvida para redes sem fio, inclusive para redes de sensores sem fio (RSSF). No entanto, as redes de sensores sem fio e vários outros sistemas atuais de comunicação utilizam o mesmo espectro de frequências livres, o ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). A faixa de frequência de 2,4 GHz é amplamente utilizada em uma série de tecnologias sem fio (redes de sensores sem fio, redes WiFi, *Bluetooth*, telefones sem fio, etc.) que devem coexistir. A interferência de sinais eletromagnéticos, intencional ou não, representa uma grave ameaça à disponibilidade de serviços em redes sem fio (podendo até mesmo inviabilizar o funcionamento delas), sendo uma das principais causas da sua perda de desempenho. Este trabalho propõe a avaliação do comportamento de redes de sensores sem fio na presença de fontes de interferência em cenários reais, a prototipação de um nó sensor multirrádio como alternativa para mitigar os problemas de interferência e o desenvolvimento de dois protocolos de sensoriamento e decisão de espectro. Esses protocolos foram baseados no protocolo T-MAC (*Time-out-MAC*) e implementados no simulador Castalia, chamados de DSCMAC (*Dynamic Selection Channel MAC*) e DSCMAC-AHP (*Dynamic Selection Channel MAC - AHP*) que permitem a utilização oportunista do meio de transmissão. Os resultados dos experimentos práticos mostraram que a coexistência de RSSFs com outros dispositivos que operam na faixa de frequência de 2,4 GHz reduzem significativamente o desempenho dessas redes. A utilização do protótipo multirrádio, nos mesmos cenários e sob as mesmas condições de interferência dos nós tradicionais, proporcionou melhorias relevantes no desempenho da RSSF, atingindo taxas de entrega de pacotes superiores à 97%. As simulações dos métodos propostos mostraram que os protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP alcançaram taxas de entrega superiores ao T-MAC original, chegando à 63% e 59%, respectivamente.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio; Interferência; Coexistência; Redes Sem Fio, Seleção de Canal.

## ABSTRACT

Due to the development and popularization of mobile devices in recent years, the demand for wireless communications has increased more and more. A wide variety of applications is being developed for wireless networks, including wireless sensor networks (WSN). However, wireless sensor networks and many other current communication systems use the same spectrum of available frequencies, the ISM (Industrial, Medical and Scientific). The frequency range of 2.4 GHz is widely used in a number of wireless technologies (wireless sensor networks, WiFi, Bluetooth, cordless phones, etc..) that must coexist. The electromagnetic interference, intentional or not, represents a serious threat to availability of services in wireless networks (and may even derail the functioning of these networks), being a major cause of loss of performance in wireless networks. This work intends to evaluate the behavior of wireless sensor networks in the presence of interference sources in real scenarios, a multi-radio node prototype as an alternative to mitigate interference problems and the development of two protocols for sensing and decision spectrum. These protocols were based on the T-MAC protocol (Time-out-MAC) and implemented in Castalia simulator, called DSCMAC (Dynamic Selection Channel MAC) and DSCMAC-AHP (Dynamic Selection Channel MAC - AHP) which allow the opportunistic use of the transmission medium. The results of practical experiments showed that the coexistence of WSNs with other devices operating in the frequency range of 2.4 GHz reduce the performance of these networks. The use of multi- radio node prototype, in the same scenarios and under the same conditions of interference as the traditional nodes, provided significant improvements in the performance of WSN, with delivery rate of packets higher than 97%. Simulations of the proposed methods showed that DSCMAC and DSCMAC-AHP protocols achieved delivery rates above the original T-MAC, reaching 63% and 59%, respectively.

Keywords: Wireless Sensor Networks; Interference; Coexistence; Wireless Networks, Channel Selection.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sobreposição de frequências em redes IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.....	16
Figura 2	Estados de uma RSSF e de uma RSSFC(OLIVEIRA, 2011). ....	22
Figura 3	Disposição geral dos dispositivos durante a realização dos experimentos práticos de interferências de sinais. ....	34
Figura 4	Rede de sensores sem fio (nós sensores A e B) operando sem interferência eletrônica. ....	35
Figura 5	Rede de sensores sem fio (nós sensores A e B) sofrendo interferência de outra (nós sensores C e D).....	36
Figura 6	Rede de sensores sem fio sofrendo interferência de uma rede WLAN IEEE 802.11. ....	36
Figura 7	Rede de sensores sem fio sofrendo interferência de uma rede <i>Bluetooth</i> .....	37
Figura 8	Rede de sensores sem fio sofrendo interferência de um forno de micro-ondas.....	37
Figura 9	Protótipo de nó sensor multirrádio. ....	38
Figura 10	Ciclo adaptativo do protocolo T-MAC. ....	43
Figura 11	Mecanismo de ajuste dinâmico e em tempo real da periodicidade do processo de escolha do melhor canal. ....	46
Figura 12	Cenário com os nós sensores para as simulações com 4 fluxos simultâneos. ....	47
Figura 13	Resultado de testes preliminares para determinação do valor de $\alpha$ . ....	49
Figura 14	Número de pacotes perdidos (sem interferência eletrônica). ....	51
Figura 15	Número de pacotes perdidos (RSSF sofrendo interferência de outra RSSF). ....	53
Figura 16	Número de pacotes perdidos (RSSF sofrendo interferência de uma WLAN).....	54
Figura 17	Número de pacotes perdidos (RSSF sofrendo interferência de uma rede <i>Bluetooth</i> ).....	55
Figura 18	Número de pacotes perdidos (RSSF sofrendo interferência de um forno de micro-ondas).....	56
Figura 19	Valores de RSSI em uma RSSF sob interferência (intervalo de confiança omitido).....	56
Figura 20	Taxa média de entrega de pacotes (%). ....	60

Figura 21	Latência (ms). .....	61
Figura 22	Número médio de trocas de canais ( <i>handoffs</i> ). .....	62
Figura 23	Número médio de retransmissões de pacotes perdidos. ....	63
Figura 24	Consumo de energia ( <i>mJ</i> ). .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Taxa de entrega de pacotes do protótipo multirrádio. ....	58
Tabela 2	Consumo de energia para a rede com baixa densidade. ....	65
Tabela 3	Consumo de energia para a rede com alta densidade. ....	65

## LISTA DE SIGLAS

AHP	<i>Analytical Hierarchical Process</i>
AODV	<i>Ad Hoc On-Demand Distance Vector</i>
CRAW	<i>Cognitive Resource Allocator for Wireless sensor networks co-existence</i>
DSCMAC	<i>Dynamic Selection Channel MAC</i>
DSA	<i>Dynamic Spectrum Allocation</i>
DSAP	<i>Dynamic Spectrum Access Protocol</i>
EWMA	<i>Exponentially Weighted Moving-Average</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
G-McMAC	<i>Generic Multi-channel MAC protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientifical and Medical</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
RC	<i>Rádio Cognitivo</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RSSF	<i>Rede de Sensores Sem Fio</i>
RSSFc	<i>Rede de Sensores Sem Fio Cognitivas</i>
RTT	<i>Round-Trip Time</i>
SBC	<i>Sociedade Brasileira de Computação</i>
SINR	<i>Signal Interference Noise Ratio</i>
T-MAC	<i>Time-Out-MAC</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
UFLA	<i>Universidade Federal de Lavras</i>
UFV	<i>Universidade Federal de Viçosa</i>
ZoneS	<i>Zone-based Sensing</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Contextualização .....	13
1.2	Definição do Problema .....	15
1.3	Motivação .....	17
1.4	Objetivo geral .....	18
1.4.1	Objetivos específicos .....	18
1.5	Contribuições do trabalho.....	19
1.6	Organização do trabalho .....	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	21
2.1	Redes de Sensores Sem Fio .....	21
2.2	Redes de Sensores Sem Fio Cognitivas .....	21
2.3	Interferência de sinais e coexistência .....	22
2.4	Trabalhos Relacionados.....	25
3	METODOLOGIA .....	32
3.1	Tipo de pesquisa .....	32
3.2	Procedimentos metodológicos .....	32
3.3	Experimentos em cenários reais .....	33
3.3.1	Metodologia para a avaliação do comportamento de RSSF sob interferência de sinais .....	33
3.3.2	Cenário 1: RSSF sem interferências .....	34
3.3.3	Cenário 2: RSSF interferindo em outra RSSF.....	35
3.3.4	Cenário 3: WLAN IEEE 802.11 interferindo em uma RSSF.....	35
3.3.5	Cenário 4: Rede <i>Bluetooth</i> interferindo em uma RSSF	36
3.3.6	Cenário 5: Forno de micro-ondas interferindo em RSSF .....	37
3.4	Protótipo de nó sensor multirrádio .....	38
3.4.1	Definição das métricas dos experimentos práticos ....	40
3.5	Experimentos em ambientes simulados .....	40
3.5.1	Cenários de simulações .....	46
3.5.1.1	Modelo de mobilidade .....	48
3.5.2	Definição das métricas avaliadas nas simulações.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	51
4.1	Resultados dos experimentos práticos .....	51
4.1.1	Cenário 1: RSSF sem interferência .....	51
4.1.2	Cenário 2: RSSF interferindo em outra RSSF.....	52
4.1.3	Cenário 3: WLAN interferindo em uma RSSF .....	53

4.1.4	Cenário 4: <i>Bluetooth</i> interferindo em uma RSSF .....	54
4.1.5	Cenário 5: Forno de micro-ondas interferindo em uma RSSF.....	55
4.1.6	Avaliação do RSSI .....	55
4.1.7	Avaliação geral do protótipo de nó sensor multirrádio	57
4.2	Resultados das simulações .....	59
4.2.1	Taxa de entrega de pacotes .....	59
4.2.2	Latência .....	61
4.2.3	Trocas de canais ( <i>Handoffs</i> ) .....	62
4.2.4	Número de retransmissões .....	63
4.2.5	Consumo de energia .....	63
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	66
	REFERÊNCIAS.....	69

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

Nos últimos anos, com os constantes avanços na tecnologia de redes sem fio e a crescente popularização de dispositivos móveis, uma variedade de aplicações para esse tipo de rede tem sido desenvolvida. Essas aplicações destinam-se desde ao sensoriamento remoto, ao desenvolvimento de ambientes inteligentes (por exemplo, ambientes industriais, automação de prédios e residências), à detecção de eventos e à coleta de informações, bem como à educação, à saúde e ao entretenimento. Como essas redes estão se tornando cada vez mais comuns, a comunicação sem fio está recebendo atenção cada vez maior no cenário das comunicações digitais (TOSCANO; BELLO, 2008; LASORTE; RAJAB; REFAI, 2012). Com o sucesso alcançado e com o objetivo de atender às demandas crescentes de aplicações que necessitam de dispositivos sem fio, o desenvolvimento das redes sem fio tem sido foco de muitos estudos (HOWITT; GUTIERREZ, 2003; REZHA; SHIN, 2014).

Outra classe de redes surgiu há alguns anos, chamada de rede de sensores sem fio (RSSF). Esse tipo específico de redes consiste em nós individuais capazes de interagir com o ambiente no qual estão inseridos por meio de sensoriamento ou controlando parâmetros físicos. Geralmente esses nós precisam colaborar entre si para conseguirem cumprir suas tarefas as quais, na maioria dos casos, um nó individualmente é incapaz de fazer. Em essência, os nós de uma rede de sensores sem fio possuem capacidade de processamento (ainda que reduzida) e realizam sensoriamento e comunicação sem fios. Apesar do fato de essas redes também frequentemente incluírem atuadores, o termo “redes de sensores sem fio” tornou-se comumente aceito.

Essas redes têm capacidade para suportar uma grande quantidade de diferentes aplicações do mundo real, além de serem alvo de diversas pesquisas sendo um problema desafiador para a engenharia devido a sua grande flexibilidade (KARL; WILLIG, 2005).

No entanto, as redes de sensores sem fio e vários outros sistemas atuais de comunicação utilizam o mesmo espectro de frequências livres, o ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Em meados da década de 1980, a *Federal Communications Commission* (FCC), órgão regulador da área de telecomunicações e radiodifusão dos Estados Unidos, padronizou o uso do espectro de rádio não licenciado nas bandas ISM de 433 MHz a 434 MHz (faixa de 433 MHz), 902 MHz a 928 MHz (faixa de 900 MHz), 2400 MHz a 2483,5 MHz (faixa de 2,4 GHz) e 5725 MHz a 5850 MHz (faixa de 5,8 GHz). Os transmissores de rádio podem compartilhar o espectro ISM em uma base secundária, desde que usem a modulação por espectro espalhado e níveis de potência abaixo de 1 W (RAPPAPORT, 2009). A faixa de frequência de 2,4 GHz é amplamente utilizada em uma série de aplicações comuns (redes WiFi, redes de sensores, *Bluetooth*, telefones sem fio, etc.) que devem coexistir (ANGRISANI *et al.*, 2008).

A coexistência entre essas redes deve ser controlada de forma a permitir o compartilhamento de espectro entre diferentes dispositivos de rede. Em geral, o compartilhamento do espectro é controlado por protocolos MAC (*Medium Access Control*). Entretanto, as diferenças entre os níveis de potência, a ausência de sincronização e a incompatibilidade das camadas físicas prejudicam a eficácia do protocolo MAC tradicional e tornam a coexistência entre redes heterogêneas um grande desafio (ZHANG *et al.*, 2012). Uma questão fundamental para redes sem fio é a sua suscetibilidade a interferên-



cias de sinais e o fato de sua implantação geralmente ocorrer em áreas com o espectro poluído.

O problema da interferência entre diferentes tipos de redes sem fio tem se tornado objeto de pesquisa pela comunidade científica. O IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*) publicou, em 2003, um documento com recomendações práticas sobre o problema da interferência entre redes sem fio. Além disso, o IEEE possui desde 2004 um grupo técnico consultivo, chamado de IEEE 802.19 (*Wireless Coexistence Technical Advisory Group* - TAG), para tratar as questões de coexistência entre redes sem fio não licenciadas, desenvolvendo políticas e procedimentos para assegurar a coexistência entre essas redes (SHELLHAMMER, 2004). Paralelamente aos esforços do IEEE, diferentes formas de viabilizar a coexistência pacífica entre redes sem fio (em especial, RSSFs) têm sido abordadas na literatura atual (LEWANDOWSKI *et al.*, 2010; FILIN *et al.*, 2011; CORREIA *et al.*, 2012; HAYASHI, 2012; ZHANG; SURESH; STOLERU, 2013), uma vez que a interferência é um dos fatores limitadores no desempenho de sistemas que utilizam rádios.

## 1.2 Definição do Problema

As interferências de rádio, intencionais ou não, representam uma grave ameaça à disponibilidade de serviços em redes de sensores sem fio, podendo até mesmo inviabilizar o funcionamento dessas redes. Se várias redes sem fio operam na mesma área, a confiabilidade do sistema diminui de maneira drástica, especialmente se as redes utilizam rádios com alocação estática de canais (FERRARI *et al.*, 2008a). Os efeitos típicos de inter-

ferência são perda de pacotes de dados, atrasos na transmissão, perda de comunicação e degradação na vazão dos dados (TOSCANO; BELLO, 2008).

O principal objetivo deste trabalho é introduzir capacidades cognitivas em redes de sensores sem fio buscando reduzir ou anular os efeitos negativos da coexistência com outras redes da mesma natureza. Para tal, será necessário o desenvolvimento de técnicas que possibilitem a coexistência pacífica entre elas. Essas técnicas são baseadas no uso oportunista do espectro de frequência e na reconfiguração dinâmica dos rádios dos dispositivos da rede. O desenvolvimento de técnicas para a seleção do melhor canal disponível é de grande importância para alcançar a coexistência entre redes. Um cenário no qual há nós pertencentes a redes de diferentes padrões (ZigBee e WiFi) é apresentado na Figura 1 (CORREIA *et al.*, 2012). Nessa situação, as redes são divididas em canais cujos intervalos de frequência (de 5 MHz para IEEE 802.15.4 e de 22 MHz para IEEE 802.11) se sobrepõem na maior parte do espectro analisado. Por exemplo, a frequência mais baixa do canal 2 do padrão IEEE 802.11 é também a frequência mais baixa do canal 12 do padrão IEEE 802.15.4.

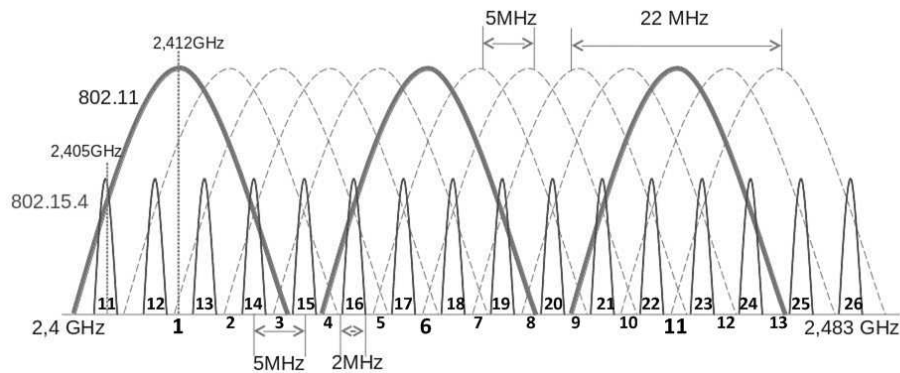


Figura 1 Sobreposição de frequências em redes IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.

### 1.3 Motivação

A Sociedade Brasileira de Computação (SBC) organizou em 2006 um evento com o objetivo de gerar um conjunto de Cinco Grandes Desafios para a Computação no Brasil em um período de 10 anos. Dentre os desafios propostos, um se ajusta melhor a este trabalho: Desenvolvimento tecnológico de qualidade – sistemas disponíveis, corretos, seguros, escaláveis, persistentes e ubíquos. Em se tratando especificamente de redes sem fio, há inúmeras aplicações atuais que dependem diretamente desse tipo de rede. Dessa forma, as redes sem fio precisam estar sempre disponíveis e não apresentarem falhas; devem funcionar de forma prevista e serem escaláveis e seguras. Como as redes de sensores sem fio transmitem dados, uma questão importante é a qualidade da informação obtida ao longo do tempo. A proliferação de tipos e usos desses dispositivos exige cada vez mais atenção ao desenvolvimento de sistemas confiáveis (CARVALHO *et al.*, 2006). Para que isso seja possível, é imprescindível a aplicação de técnicas para permitir a coexistência evitando a interferência.

O grupo técnico IEEE 802.19 tem trabalhado desde 2010 na criação e aprimoramento do padrão IEEE 802.19.1 (KASSLIN, 2010). O objetivo desse padrão é permitir que os dispositivos que utilizam a família de padrões IEEE 802 para redes sem fio possam usufruir do espectro de frequências de maneira mais eficaz. A intenção do grupo IEEE 802.19 é que o padrão IEEE 802.19.1 seja útil também para redes e dispositivos sem fio que não utilizem a família de padrões IEEE 802 (SHELLHAMMER, 2004).

Atualmente, RSSFs estão sendo utilizadas cada vez mais e por uma grande variedade de aplicações, bem como outros tipos de redes sem fio. Essa elevada densidade de sinais aponta para a saturação do espectro ISM,

causando interferências mútuas entre as redes sem fio. Uma das principais causas de redução no desempenho de RSSFs é a interferência. A degradação devido à interferência pode resultar em perda de pacotes, retransmissões, instabilidade do enlace e comportamento inconsistente dos protocolos (AHMED; KANHERE; JHA, 2010). Um grande problema enfrentado nas implantações de redes de sensores sem fio é a coexistência com outras redes sem fio em ambientes sem coordenação. A falta de um canal livre de interferência (ou interferência mínima) para a comunicação reduz a capacidade de transferência de dados e faz com que ocorram colisões. Logo, evitar a interferência (que tende a ser cada vez maior) entre redes sem fio vem se tornando uma questão de extrema importância (ANSARI; MÄHÖNEN, 2010).

#### **1.4 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de técnicas que possibilitem a coexistência pacífica entre RSSFs por meio de uso oportunista do espectro de frequências, com a utilização de nós sensores com múltiplos rádios. Para que o objetivo fosse alcançado foi necessário, antes de tudo, analisar o comportamento de redes de sensores sem fio em cenários reais de interferência e ambientes de simulação. Além da implementação da solução em simulador, um protótipo de nó sensor multirrádio foi avaliado como alternativa para tentar mitigar os problemas de coexistência em RSSFs.

##### **1.4.1 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar o comportamento de RSSFs em cenários reais de interferência e de ruído, bem como os efeitos da coexistência dessas redes com outros dispositivos que utilizam o mesmo espectro de frequências.
  - Realizar experimentos em plataforma real de diferentes situações de interferência envolvendo redes de sensores sem fio e outros dispositivos que utilizam a faixa de frequência de 2,4 GHz (outras RSSFs, WLANs, redes *Bluetooth* e fornos de micro-ondas).
- Desenvolver e avaliar um protótipo de nó sensor multirrádio que permita o uso oportunista do espectro de frequências.
- Propor e desenvolver novos protocolos MAC que reduzam os efeitos negativos da coexistência de RSSFs com outros dispositivos sem fio por meio da utilização de técnicas de sensoriamento do espectro e decisão do melhor canal de operação disponível. Por questões de custo e escalabilidade, esses novos protocolos MAC foram desenvolvidos e avaliados em ambientes de simulação.

## 1.5 Contribuições do trabalho

A primeira contribuição deste trabalho é a avaliação do comportamento de RSSFs na presença de diferentes fontes de interferências em cenários reais. Devido à necessidade de ambientes reais de experimentação, essa avaliação é escassa e este trabalho ajuda a preencher essa lacuna na literatura. Outra importante contribuição foi o desenvolvimento e avaliação de um protótipo de nó sensor multirrádio com capacidade de sensoriamento de espectro e escolha do melhor canal disponível. A avaliação do protótipo mostrou resultados promissores, alcançando taxas de entregas superiores

aos modelos tradicionais de nós sensores. Por fim, este trabalho apresentou, por meio de simulações, dois novos protocolos MAC que permitem aos nós sensores a utilização oportunista do espectro de frequências com a capacidade de avaliar o meio e decidir qual é o melhor canal de operação.

## **1.6 Organização do trabalho**

No Capítulo 2, são apresentados os principais conceitos e aplicações de redes de sensores sem fio. Além disso, esse capítulo mostra as principais causas de interferência nesse tipo de rede, bem como algumas das soluções que têm sido propostas na literatura atual. A metodologia utilizada neste trabalho é apresentada no Capítulo 3, juntamente com as informações sobre o processo dos experimentos e das simulações realizados. Os resultados e discussões são mostrados no Capítulo 4. Já no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais deste trabalho.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo serão apresentados conceitos de redes de sensores sem fio, redes de sensores sem fio cognitivas, interferências de sinais e os principais problemas da coexistência dessas redes com outros dispositivos que compartilham o mesmo meio de transmissão. Além disso, serão apresentados trabalhos relacionados ao assunto abordado.

### **2.1 Redes de Sensores Sem Fio**

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) pode ser definida tipicamente como sendo uma rede composta, em geral, por um grande número de nós sensores espalhados em uma área a ser monitorada. Essas redes são compostas de nós com recursos computacionais e energéticos limitados. Com redes de sensores sem fio (RSSFs), dados e informações podem ser sensoriados, coletados e enviados a um cliente, ou comandos podem ser enviados aos nós para controlar os objetos e ambientes monitorados. As redes de sensores sem fio permitem uma ligação entre o mundo físico e o mundo virtual, bem como com os seres humanos. Esse tipo de rede tem atraído grande atenção devido a sua aplicabilidade em campos como aeronáutica militar, indústria, transporte, agricultura, cidades inteligentes, logística, engenharia biomédica, monitoramento de ambientes, resposta a desastres e antiterrorismo (LI; BAO; SHEN, 2011).

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

As redes de sensores sem fio cognitivas (RSSFCs) podem ser definidas como uma rede de sensores sem fio baseadas em rádios cognitivos.

Os rádios cognitivos proveem a capacidade de compartilhar o espectro de forma oportunista. Um rádio cognitivo (RC) é definido formalmente como um rádio apto a alterar os parâmetros de seu transmissor de acordo com a interação com o meio ambiente (AKAN; KARLI; ERGUL, 2009). A Figura 2 mostra os diferentes estados das RSSFs e das RSSFCs. É possível observar que além dos três estados inerentes a uma RSSF, existe o estado de sensoriamento do espectro, no qual as oportunidades de transmissão são identificadas (OLIVEIRA, 2011).

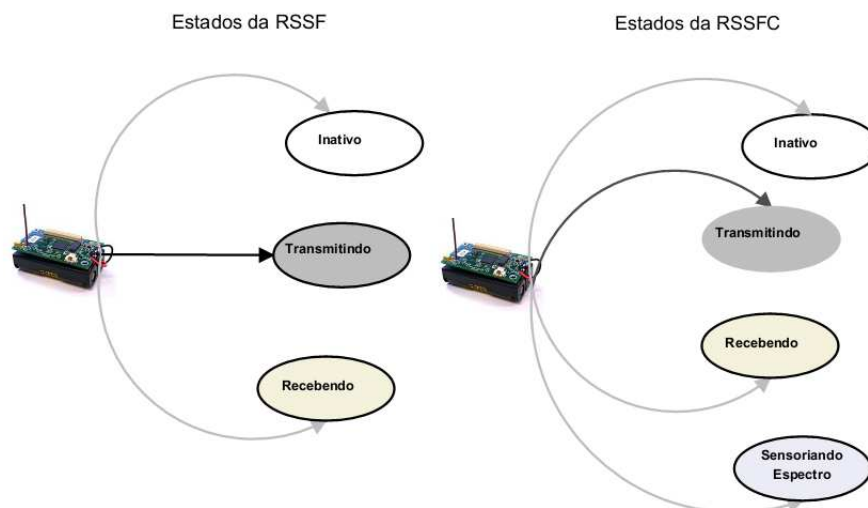


Figura 2 Estados de uma RSSF e de uma RSSFC(OLIVEIRA, 2011).

### 2.3 Interferência de sinais e coexistência

Devido aos avanços recentes na tecnologia sem fio, uma ampla gama de padrões está sendo desenvolvida para um conjunto diversificado de usuários (POLLIN *et al.*, 2008). E a maioria das tecnologias sem fio em uso atualmente foi desenvolvida sem qualquer tipo de cooperação. Geralmente, isso significa que os padrões sem fio não são incompatíveis, mas compartilham



o mesmo meio e competem entre si por esse espectro. A maioria dos fabricantes considera os outros sistemas de comunicação como fonte de ruído. Dessa forma, é difícil assegurar a coexistência contando com a colaboração entre sistemas de diferentes fabricantes. Neste contexto, a coexistência destas redes pode ser um problema devido à interferência em vários canais. A coexistência representa a capacidade de sistemas sem fio de modificar seu comportamento com o objetivo de eliminar qualquer interferência mútua. Por exemplo, RSSFs na mesma área podem mudar suas características de acesso ao meio para evitar colisões. Claramente, a mudança de comportamento é possível, pois os sistemas envolvidos têm condições de detectar a presença de outros dispositivos sem fio próximos (FERRARI *et al.*, 2008b).

Várias aplicações comerciais em RSSFs estão sendo desenvolvidas para automação e vigilância de ambientes residenciais e empresariais. Esses locais podem já estar sob a cobertura de WLANs (*Wireless Local Area Networks*) ou possuírem dispositivos elétricos, tais como fornos de micro-ondas, operando na vizinhança. A radiação a partir desses dispositivos causa interferências e perdas de pacotes em RSSFs, chegando a 92% (CHOWDHURY; AKYILDIZ, 2009a).

A interferência é um dos fatores limitadores no desempenho de sistemas que utilizam rádios. A reutilização de frequência implica que, em determinada área de cobertura, existem vários usuários que utilizam o mesmo conjunto de frequências. A interferência entre os sinais desses usuários é chamada de interferência do co-canal. A interferência resultante de sinais adjacentes em frequência ao sinal desejado é chamada de interferência do canal adjacente. A interferência do canal adjacente resulta de

filtros receptores imperfeitos, os quais permitem que frequências vizinhas vazem para a banda de passagem (RAPPAPORT, 2009).

O controle da interferência é uma questão importante em qualquer sistema multiusuário. A interferência diminui a taxa de usuários compartilhando o mesmo espectro. Um dos mais promissores sistemas multiusuários é o rádio cognitivo (RC). Os usuários de rádio cognitivo podem ser classificados em dois tipos: o usuário primário (*Primary User* - PU) que possui licença para acessar o espectro, e o usuário secundário (*Secondary User* - SU) que possui permissão para utilizar o espectro sob a condição de não causar interferência no receptor do usuário primário (ABDELHAMID; EL-SABROUTY; ELRAMLY, 2012). O paradigma de rádios cognitivos é a utilização oportunista de canais licenciados por usuários secundários sem causar qualquer interferência nos usuários proprietários de licenças (CANBERK; OKTUG, 2012).

O sensoriamento de espectro é uma tecnologia essencial para redes de rádios cognitivos. O principal objetivo do sensoriamento de espectro é fornecer mais oportunidades de acesso ao espectro aos usuários de RCs sem interferir nas operações de usuários licenciados. Dessa forma, as redes de rádios cognitivos são responsáveis por detectar a transmissão de redes de usuários primários e evitar interferência a eles. Assim, a precisão no sensoriamento é considerada como um dos fatores mais importantes para determinar o desempenho de redes de RCs. O sensoriamento de espectro permite que usuários não licenciados se adaptem ao ambiente para detectar faixas do espectro não utilizadas sem causar interferência em usuários primários da rede (LEE; AKYILDIZ, 2008).

As soluções para o problema da coexistência podem ser classificadas de duas maneiras distintas: colaborativas e não colaborativas. A tecnologia de colaboração em uma rede de sensores sem fio permite que os nós da rede se comuniquem e cooperem na execução de uma tarefa específica sendo baseada na troca de informações entre as redes existentes para negociar e minimizar a interferência mútua (CORREIA *et al.*, 2012). Como os nós sensores geralmente possuem limitação de recursos energéticos, computacionais e de sensoriamento, a colaboração é muito importante para determinadas aplicações de RSSFs. De acordo com (LI; BAO; SHEN, 2011), existem três tipos básicos de colaboração em redes de sensores sem fio: cooperação, na qual todos os nós trabalham cooperativamente de acordo com seu próprio grau de contribuição no objetivo da rede, por exemplo sensoriamento cooperativo; competição, o que significa que um mesmo recurso é compartilhado pelos dispositivos que compõem a rede e auto-organização, cujo estado de cooperação é controlado e aprimorado no instante do sensoriamento. Por outro lado, quando não é possível a troca de informações entre as redes, os mecanismos são não colaborativos. Dessa forma, alguns mecanismos para possibilitar a coexistência têm sido utilizados, como a sincronização de redes, acesso dinâmico ao canal (*Dynamic Spectrum Allocation* - DSA) e rádios cognitivos.

#### **2.4 Trabalhos Relacionados**

Em (OLIVEIRA, 2011) foi proposta uma adaptação cognitiva do protocolo T-MAC e a utilização de mecanismos distribuídos de alocação dinâmica de canais e decisão de espectro. As adaptações propostas pelo autor deram origem a dois mecanismos distribuídos de seleção dinâmica de

canais, chamados de CogTMAC e AhpTMAC. O primeiro método realiza a escolha do melhor canal em função da força do sinal recebido ou RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). Já o segundo, além do RSSI, considera parâmetros como SINR (*Signal Interference Noise Ratio*), ruído base e atraso fim a fim, escolhendo o melhor canal disponível com a técnica de AHP (*Analytical Hierarchical Process*). Ambos os métodos foram adicionados ao protocolo T-MAC do simulador Castalia (BOULIS, 2010). As simulações mostram que as adaptações cognitivas do protocolo T-MAC apresentaram um desempenho de até 69% mais pacotes entregues do que a versão original do protocolo.

Mecanismos de coexistência colaborativos podem explorar a capacidade de sincronização das redes de sensores sem fio. Nesse caso, o gerenciamento de canais é feito por meio de troca de mensagens de enlace entre uma entidade de arbitragem e coordenadores das RSSF. Considera-se que os coordenadores possuem interfaces sem fio e cabeadas para se comunicarem com o árbitro através de uma rede *Ethernet*. Os resultados apontam para um aumento no tempo de vida dos nós da rede e a possibilidade de coexistência de redes (FERRARI *et al.*, 2008c). Em (BRIK *et al.*, 2005) é apresentado um protocolo de acesso dinâmico ao espectro (*Dynamic Spectrum Access Protocol - DSAP*) baseado em coexistência colaborativa com coordenação centralizada. Esse protocolo é destinado a regiões geográficas limitadas, visando a reduzir o congestionamento e minimizar a interferência ajustando os canais usados pelos nós clientes de acordo com informações do coordenador da rede. O gerenciamento e a coordenação dos nós são baseados em informações prévias dos canais utilizados na região. Os nós coordenadores utilizam duas interfaces de modo a possuir um canal comum

para a comunicação com os nós clientes. Os resultados apresentados mostram que o DSAP reduz a interferência e melhora a vazão da rede. Apesar disso, a escolha errada do canal comum ou a dinamicidade do ambiente pode inviabilizar a comunicação entre os nós.

Segundo (AKAN; KARLI; ERGUL, 2009), com os avanços da tecnologia dos rádios cognitivos é possível aplicar modelos de acesso dinâmico ao canal às redes de sensores sem fio. Isso permite o uso eficiente do espectro de frequências e a coexistência de RSSFs. Para isso, os RC exploram o espectro de frequências de modo oportunista, ajustando os parâmetros de transmissão (frequência, potência de transmissão e codificação). Outras abordagens para rádios cognitivos afirmam que esse tipo de rádio deve ser capaz, além da reconfigurabilidade programada, aprender e adaptar-se às condições do ambiente, de modo a reconfigurar de forma inteligente os parâmetros de transmissão.

Diferentes formas de viabilizar a coexistência pacífica entre redes sem fio (em especial, RSSFs) têm sido abordadas na literatura. Em (FERRARI *et al.*, 2008b), é proposto um controlador central para alocar os recursos de rede de acordo com os pedidos dos coordenadores de diferentes RSSFs. O objetivo é permitir a coexistência de redes diferentes com o mínimo de troca de informações. Nesse caso, o controlador central deve conhecer todas as necessidades de todas as RSSFs e, assim, criar um mapa para auxiliar na alocação dos recursos. Esse controlador proposto trabalha no nível MAC e, por isso, é chamado de “MetaMAC”. Ao organizar todos os nós localizados na mesma área de interesse, o MetaMAC se comunica apenas com os coordenadores das redes de sensores sem fio, que continuam a gerenciar as suas próprias sub-redes.

Em (NETHI; NIEMINEN; JANTTI, 2011), é proposta uma abordagem para controle de acesso ao meio multicanal, projetada especificamente para RSSFs industriais, chamada de *Generic Multi-channel MAC protocol* (G-McMAC). O G-McMAC possui bom desempenho em termos de atraso e taxa de transferência, bem como apresenta robustez em relação à interferência e permite a coexistência. Além disso, o G-McMAC é flexível, escalável e facilmente implementável para várias aplicações. Segundo os autores, os resultados teóricos indicam que o G-McMAC supera outras soluções existentes. Os resultados de simulação de um ambiente industrial real mostram que o G-McMAC é utilizável em aplicações industriais de redes de sensores sem fio.

O problema da coexistência de redes de sensores sem fio para aplicações industriais foi abordado em (FERRARI *et al.*, 2008a). Na verdade, se várias RSSFs operam na mesma área, a confiabilidade do sistema diminui de maneira rápida, especialmente se as RSSFs utilizam rádios com canais estáticos. A coexistência entre RSSFs em ambientes industriais é causa de preocupação crescente devido ao uso generalizado de tecnologias em banda de 2.4 GHz. A arquitetura proposta é baseada em uma abordagem colaborativa que explora a capacidade de sincronização de algumas RSSFs para melhorar a coexistência utilizando técnicas de colaboração.

O CRAW (*Cognitive Resource Allocator for Wireless sensor networks coexistence*) é uma proposta para fornecer, de maneira dinâmica, recursos para RSSFs (FERRARI *et al.*, 2008b). O CRAW deve aumentar o desempenho através da distribuição cognitiva de segmentos de tempo e frequência para os coordenadores, a fim de evitar ou minimizar o congestionamento. Um servidor CRAW armazena informações atualizadas sobre

todas as redes na área controlada e pode agir alocando os recursos disponíveis.

Em (CHOWDHURY; AKYILDIZ, 2009a), é proposto um algoritmo que permite classificar uma fonte desconhecida de interferência baseado em medições de energia do canal. Além disso, os autores propõem um esquema de escolha de canal de transmissão e agendamento de pacotes para RSSFs para detectar as características dos dispositivos interferentes e reduzir as perdas relacionadas à interferência.

Uma análise experimental de problemas de coexistência entre os padrões de WLAN (*Wireless Local Area Network*) e de RSSF dentro de um ambiente real é feita em (ANGRISANI *et al.*, 2008). Como RSSFs e WLANs podem ocupar as mesmas frequências, o risco de interferência de canal é muito elevado sempre que uma RSSF opera próxima a uma WLAN ativa. Esse cenário foi testado e os resultados mostraram que uma WLAN pode degradar consideravelmente o desempenho de uma RSSF operando em sua proximidade. Já em (HOWITT; GUTIERREZ, 2003), foi analisado o impacto da coexistência de uma rede IEEE 802.15.4 e uma rede IEEE 802.11b. A análise do trabalho sugere que, assumindo a gestão de frequências automatizada ou manual, é razoável concluir que a rede IEEE 802.15.4 normalmente tem pouco ou nenhum impacto sobre o desempenho do padrão IEEE 802.11b, mesmo que a estação IEEE 802.11b esteja localizada próxima a um cluster IEEE 802.15.4 com um elevado nível de atividade. O trabalho (POLLIN *et al.*, 2008) também concentrou-se na coexistência de IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4 na banda ISM. Segundo os autores do trabalho, a maioria dos estudos assume que uma rede IEEE 802.15.4 pode prejudicar uma rede IEEE 802.11 apenas quando a primeira não utilizar a técnica

*listen-before-send*. No entanto, os resultados apresentados contradizem esta suposição. O estudo aponta uma degradação considerável no desempenho da rede IEEE 802.11 quando coexiste com redes IEEE 802.15.4.

Um estudo recente apresenta uma nova abordagem para melhorar o desempenho do sensoriamento de espectro concentrando-se na detecção de energia (KOZAL; MERABTI; BOUHAFS, 2012). Os autores propõem um algoritmo de detecção de energia de limiar ótimo e apresentam modelos matemáticos e simulações realizadas. No modelo proposto, os autores consideram que existe um terminal cognitivo que precisa detectar o sinal de um usuário primário usando um detector de energia. Nesse esquema, somente a potência transmitida de um sistema primário é conhecida, portanto, primeiro essa potência será detectada, e então comparada com o limiar pré-definido para determinar se a faixa de frequência está disponível ou não. Outra proposta recente é o método *Zone-based Sensing (ZoneS)* (ACAR *et al.*, 2012). Esse método é baseado na detecção cooperativa distribuída que contorna os problemas surgidos entre nós distantes. O método concentra-se principalmente na detecção de energia e detecção cooperativa distribuída para aumentar o desempenho do método de detecção de energia sob condições de baixo SNR. No método proposto, a célula secundária é dividida em várias zonas de áreas aproximadamente iguais e cada zona decide se a frequência está ociosa ou não dentro de sua área, por meio da fusão de resultados de detecção de usuários secundários na zona. Segundo os autores, os resultados do método ZoneS comparados ao caso de célula inteira (sem divisão por zonas) é melhor em termos de confiabilidade de detecção, uma vez que com múltiplas zonas cooperando na célula, a perda de detecção e as probabilidades de colisão diminuem significativamente.



Em (CANBERK; OKTUG, 2012), é proposta uma classificação baseada na utilização do espectro para verificar a disponibilidade de canais de usuários primários. O esquema proposto leva em consideração o comportamento dos usuários primários e tenta estimar a disponibilidade dos canais classificando-os de acordo com a QoS dos canais de usuários primários. Conforme resultados apresentados, o espectro disponível é utilizado mais efetivamente com esta proposta do que o esquema tradicional. Já (SALLARVAN; KURT, 2012), avalia métodos de detecção e combinação de sinal para detecção de espectro com múltiplas antenas em redes de rádios cognitivos. Segundo os autores, o ganho obtido nos métodos de sensoriamento de espectro através da utilização de múltiplas antenas no receptor é melhor observado quando um modelo de atenuação gradual, tal como *Rayleigh*, é utilizado no modelo do canal.

Devido ao expressivo crescimento das comunicações sem fio na última década e a dependência cada vez maior de aplicações móveis de voz e de multimídia no dia-a-dia, a necessidade de mais recursos de espectro tem aumentado. Ao permitir o uso oportunista do espectro por usuários secundários, poderosos e flexíveis sistemas sem fio, capazes de dar suporte ao crescimento e às mudanças de demanda no tráfego, podem ser obtidos (KOZAL; MERABTI; BOUHAFS, 2012).

No próximo capítulo serão apresentados detalhes da metodologia adotada para a realização deste trabalho, assim como informações sobre os procedimentos de experimentação e simulação, bem como as métricas analisadas.

### **3 METODOLOGIA**

Este capítulo descreve o tipo de pesquisa, a metodologia de trabalho para que os objetivos fossem alcançados, assim como os cenários de experimentação e de simulação, além das métricas analisadas.

#### **3.1 Tipo de pesquisa**

A pesquisa desenvolvida neste trabalho pode ser classificada quanto à sua natureza como sendo aplicada, com objetivos de caráter exploratório e com utilização de procedimentos experimentais (JUNG, 2004).

#### **3.2 Procedimentos metodológicos**

Este trabalho possui, basicamente, quatro grandes etapas. A primeira delas é a aquisição dos requisitos essenciais para o desenvolvimento e evolução do trabalho. Nessa etapa ocorreu a definição do assunto abordado, a pesquisa bibliográfica e análise da documentação disponível encontrada, permitindo a obtenção de conhecimento sobre redes de sensores sem fio e suas características. A segunda etapa é a realização de testes em ambientes reais para avaliar o comportamento de redes de sensores sem fio sob interferência de outras redes e dispositivos sem fio, obedecendo a métricas que serão descritas posteriormente. Em seguida, um protótipo de nó sensor com múltiplos rádios foi avaliado para ser utilizado como alternativa para mitigar os problemas causados pela coexistência de redes de sensores sem fio. A última etapa consiste no desenvolvimento de algoritmos e técnicas para ambiente de simulação com o intuito de tratar o problema de interferência

em redes de sensores sem fio, permitindo a sua coexistência pacífica com os demais utilizadores do espectro de frequência de 2,4 GHz.

### **3.3 Experimentos em cenários reais**

Os experimentos práticos realizados neste trabalho têm o objetivo de avaliar o comportamento de redes de sensores sem fio em ambientes reais e na presença de fontes de interferência. Além disso, os resultados desses experimentos podem contribuir para reduzir a escassez de trabalhos que realizam esse tipo de abordagem.

#### **3.3.1 Metodologia para a avaliação do comportamento de RSSF sob interferência de sinais**

Para analisar e avaliar o comportamento de redes de sensores sem fio na presença de fontes de interferência externas, foram preparados cinco cenários de experimentação reais. Esses cenários contam com (i) uma RSSF operando sem a presença de interferências eletrônicas, (ii) uma RSSF em operação sofrendo interferências de outra rede de sensores sem fio, (iii) de uma rede WLAN IEEE 802.11b, (iv) de rede *Bluetooth* IEEE 802.15 e (v) de um forno de micro-ondas. Todos os equipamentos utilizados, assim como a RSSF alvo da interferência, operam no espectro de frequência de 2,4 GHz.

Nos experimentos foram utilizados nós sensores IEEE 802.15.4 equipados com rádios TI-Chipcon CC2420 para percorrer os canais disponíveis em intervalos de 5 MHz. O RSSI foi medido nos rádios dos nós sensores receptores, coletados os pacotes e calculada a taxa de entrega. Nesse experimento, os nós sensores enviaram 2000 pacotes a cada bateria de testes. Esse processo foi repetido para todos os canais disponíveis (do 11 ao 26)

para RSSFs. No total, foram realizadas 5 rodadas de testes para cada um dos 16 canais dos nós sensores. Inicialmente, foram realizados testes em uma rede de sensores sem fio operando livre de interferências externas; apenas os nós da rede estavam em funcionamento.

Para a realização dos experimentos, os nós sensores ficaram separados entre si por uma distância de 1 m, e os dispositivos interferentes foram dispostos perpendicularmente em relação aos nós sensores com a distância de 1 m, conforme mostra a Figura 3.

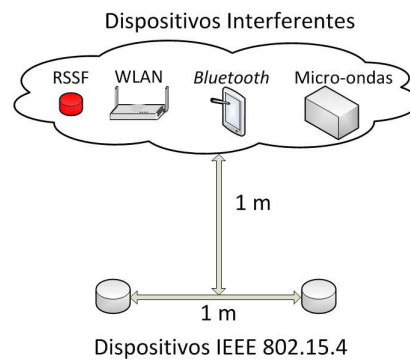


Figura 3 Disposição geral dos dispositivos durante a realização dos experimentos práticos de interferências de sinais.

### 3.3.2 Cenário 1: RSSF sem interferências

O objetivo deste cenário é avaliar uma comunicação livre de interferências eletrônicas, como mostrado na Figura 4. A RSSF desse experimento operou em todos os canais disponíveis (do 11 ao 26) para que todos fossem avaliados sem a presença de outros dispositivos sem fio. O ambiente escolhido para a realização deste experimento foi uma sala-cofre que oferece proteção eletromagnética. A proposta desse experimento foi avaliar possíveis

interferências do ambiente e também servir como padrão para comparação com os demais cenários com interferências.



Figura 4 Rede de sensores sem fio (nós sensores A e B) operando sem interferência eletrônica.

### 3.3.3 Cenário 2: RSSF interferindo em outra RSSF

Este cenário foi composto por duas redes de sensores sem fio diferentes operando no mesmo ambiente. Todas as redes desse experimento são compostas por nós sensores MicaZ (equipados com rádios Chipcon CC2420). A rede de sensores sem fio interferente operou sempre no canal 19, enquanto a outra do mesmo tipo alvo da interferência utilizou todos os canais disponíveis (do canal 11 ao 26). O objetivo desse experimento é analisar o quanto uma rede de sensores sem fio pode afetar a operação de outra rede similar. A Figura 5 representa o cenário descrito.

### 3.3.4 Cenário 3: WLAN IEEE 802.11 interferindo em uma RSSF

Os dispositivos da rede WLAN (*Access Point* 2,4 GHz, *laptop* e *smartphone*) enviam pacotes continuamente a uma taxa de 54 Mbps e operam no canal 2. A Figura 6 mostra o cenário descrito nessa parte do experimento.

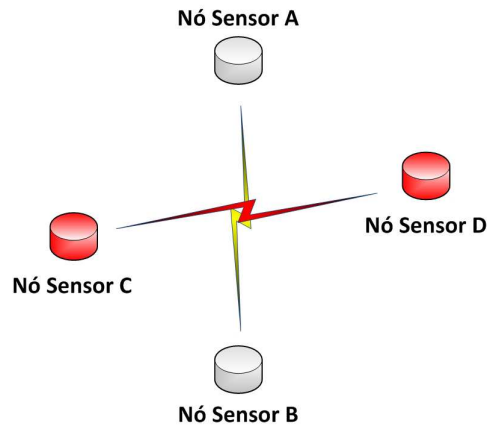


Figura 5 Rede de sensores sem fio (nós sensores A e B) sofrendo interferência de outra (nós sensores C e D).

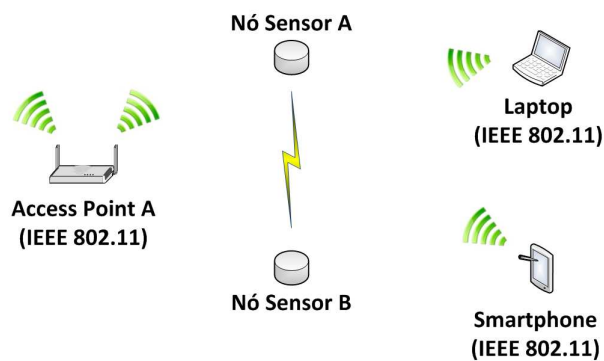


Figura 6 Rede de sensores sem fio sofrendo interferência de uma rede WLAN IEEE 802.11.

### 3.3.5 Cenário 4: Rede *Bluetooth* interferindo em uma RSSF

Para esse cenário foram utilizados, além da rede de sensores sem fio, um *laptop* e um *smartphone* formando uma rede *Bluetooth* IEEE 802.15 realizando transferência contínua de dados, conforme mostra a Figura 7.

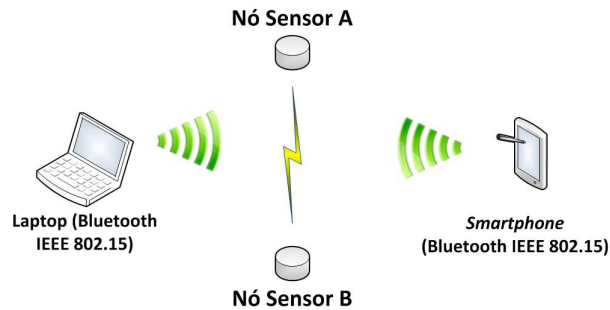


Figura 7 Rede de sensores sem fio sofrendo interferência de uma rede *Bluetooth*.

### 3.3.6 Cenário 5: Forno de micro-ondas interferindo em RSSF

Este experimento consiste de uma rede de sensores sem fio sofrendo interferência de um forno de micro-ondas operando com potência de 1 KW. O objetivo desse experimento é avaliar o comportamento de redes de sensores sem fio sob interferência de dispositivos que operam na frequência de 2,4 GHz, porém sem transmissão de dados. A Figura 8 representa o cenário do experimento descrito nessa seção.

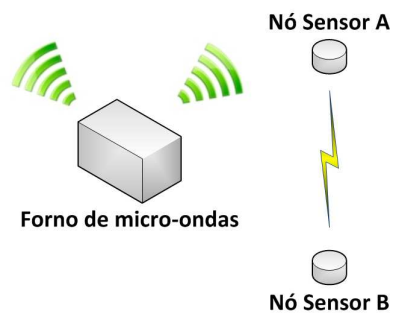


Figura 8 Rede de sensores sem fio sofrendo interferência de um forno de micro-ondas.

### 3.4 Protótipo de nó sensor multirrádio

Um protótipo de nó sensor com múltiplos rádios, mostrado na Figura 9, foi construído utilizando-se dois nós sensores: um MicaZ e um Mica2. Para facilitar a construção do protótipo, o nó sensor MicaZ utiliza o seu próprio rádio (Chipcon CC2420) e o rádio do nó sensor Mica2 (Chipcon CC1000). Desse forma, foi possível criar um nó sensor multirrádio e multifrequência, uma vez que o rádio Chipcon CC2420 opera na faixa de 2,4 GHz e o rádio CC1000 opera na faixa de 900 MHz. Sendo assim, o protótipo proposto neste trabalho é um nó sensor multifrequência e multicanal, podendo escolher qual é a melhor frequência de operação (2,4 GHz ou 900 MHz) e o melhor canal em um determinado momento (16 canais no rádio CC2420 e 3 canais no rádio CC1000).

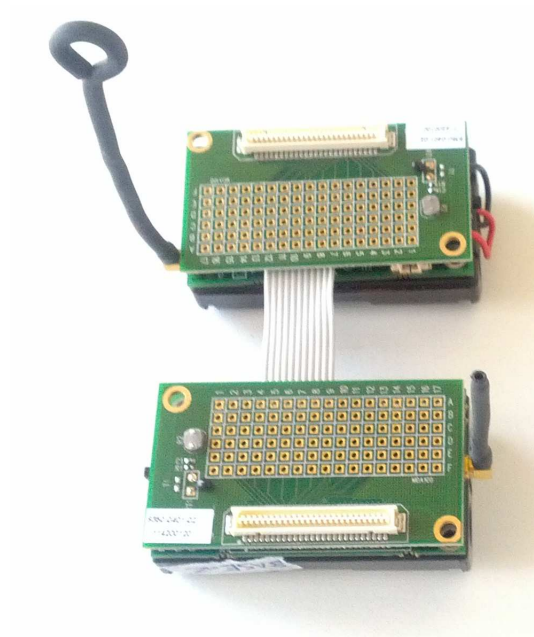


Figura 9 Protótipo de nó sensor multirrádio.



Além das duas opções de frequências, o protótipo possui a característica de sensoriamento de espectro e seleção dinâmica de canais. Assim, o nó sensor com múltiplos rádios verifica qual é o canal com o menor nível de ruído (por meio do RSSI) e passa a utilizá-lo. Antes que o canal seja alterado, o protótipo envia mensagens para os outros nós da rede para comunicar o canal escolhido, conforme mostrado no Algoritmo 1.

```

1 escolheMelhorCanal(CanalMicaZ, CanalMica2, VList, canalEscolhido);

   /* Verificar o melhor canal em 2,4 GHz */
2 para cada Canali ∈ CanalMZ hacer
3   | se Canali.RSSI ≥ melhorCanalMicaZ.RSSI então
4   |   | melhorCanalMicaZ ← Canali;
   /* Verifica o melhor canal em 900 MHz */
5 para cada Canalj ∈ CanalMica2 hacer
6   | se Canalj.RSSI ≥ melhorCanalMica2.RSSI então
7   |   | melhorCanalMica2 ← Canalj;
   /* Escolhe o melhor canal */
8 se melhorCanalMicaZ.RSSI ≥ melhorCanalMica2.RSSI então
9   | canalEscolhido ← melhorCanalMicaZ;
10 senão
11   | canalEscolhido ← melhorCanalMica2;
   /* Notifica a escolha aos vizinhos */
12 para cada Vi ∈ listaVizinhos hacer
13   | notificaVizinho(Vi, canalEscolhido);
   /* Verifica o estado do enlace */
14 se semComunicacao = verdadeiro então
15   | canalEscolhido ← 11;
16 Retorna canalEscolhido;

```

**Algoritmo 1:** Escolha do melhor canal baseada no RSSI.

O algoritmo de escolha do melhor canal seleciona o canal na faixa de 2,4 GHz com o melhor RSSI (linhas 2-4). O mesmo é feito para a frequência

de 900 MHz (linhas 5-7). Então, o algoritmo compara os canais escolhidos em cada uma das frequências e escolhe o melhor deles (linhas 8-11). Se ocorrer algum problema que impeça os nós sensores vizinhos de selecionar o mesmo canal, os nós sensores devem selecionar o canal 11 para que a comunicação entre eles seja restabelecida (linhas 14-15). Essas técnicas, empregadas no desenvolvimento do algoritmo, foram inspiradas por (CORREIA *et al.*, 2012).

### 3.4.1 Definição das métricas dos experimentos práticos

As métricas adotadas na coleta de dados dos experimentos para avaliação do comportamento de rede de sensores sem fio sofrendo interferência foram as seguintes:

- RSSI (*Received Signal Strength Indicator*): em sistemas sem fio IEEE 802, a RSSI pode ser considerada como uma medida de força relativa do sinal de rádio recebido em uma antena, em unidades arbitrárias. Portanto, o valor de RSSI mais alto (ou menos negativo em alguns dispositivos) representa o sinal mais forte.
- Número de pacotes perdidos: contagem da quantidade de pacotes perdidos durante o envio.
- Taxa de entrega de pacotes: para essa métrica foi considerada a razão entre o número de pacotes recebidos e o número de pacotes enviados.

### 3.5 Experimentos em ambientes simulados

Os algoritmos de decisão do melhor canal foram implementados e executados em um simulador de redes de sensores sem fio. O software

escolhido foi o Castalia, um simulador de RSSF e outras redes de dispositivos embarcados de baixa potência. O Castalia é baseado na plataforma OMNeT++ e pode ser utilizado por pesquisadores e desenvolvedores que queiram testar algoritmos distribuídos e/ou protocolos em ambientes com comportamento realístico (BOULIS, 2010). Para este trabalho foi utilizada a versão 3.0 adaptada por (OLIVEIRA, 2011), que realizou uma adequação no módulo do rádio, inserindo múltiplos modelos de rádio e um controlador de rádio responsável por selecionar que rádio estará ativo. Tal característica tem grande utilidade no processo de comutação entre os diferentes rádios para que os requisitos de banda e qualidade de serviço sejam atendidos. Essa adaptação permite que os nós sensores operem com dois rádios (CC2420 e CC1000, com faixas de frequências de 2,4 GHz e de 900 MHz, respectivamente).

Para essas simulações, foram desenvolvidas duas técnicas para sensoriamento de espectro e decisão do melhor canal utilizando-se nós sensores com múltiplos rádios. A primeira delas baseia sua escolha do melhor canal disponível na qualidade do sinal, por meio de medições de RSSI. Já a segunda técnica utiliza, além do RSSI, os parâmetros de relação sinal interferência ruído (SINR - *Signal Interference Noise Ratio*), o ruído base e a latência. Para analisar esses parâmetros foi utilizada a técnica chamada AHP (*Analytical Hierarchical Process*) (SAATY, 2000; SAATY, 2006). O método AHP utilizado neste trabalho calcula de forma automática os pesos dos parâmetros de classificação de canal por meio do conceito de entropia de *Shannon* proposto por (GE *et al.*, 2009). Para o cálculo dos pesos é utilizada uma matriz de parâmetros  $M_{C \times P}$ , na qual cada linha  $C$  é uma leitura referente aos parâmetros de um canal e  $P$  são as colunas referentes aos

parâmetros (ruído, RSSI, SINR, atraso) desses canais. Essas técnicas de seleção dinâmica de canais desenvolvidas neste trabalho foram chamadas de DSCMAC (*Dynamic Selection Channel MAC*) e DSCMAC-AHP (*Dynamic Selection Channel MAC - AHP*), respectivamente.

Os protocolos de escolha de canal para redes de sensores sem fio propostos neste trabalho são inspirados no protocolo T-MAC (*Time-out-MAC*) (DAM; LANGENDOEN, 2003). Esse protocolo é baseado em contenção, o que significa que dois ou mais nós sensores podem transmitir simultaneamente e com risco de perdas de pacotes devido à colisão. O T-MAC foi desenvolvido para aplicações dirigidas a eventos que possuem baixa taxa de entrega, insensibilidade à latência e com transmissão contínua ou periódica de dados. O objetivo principal do T-MAC é ser um protocolo energeticamente eficiente, considerando as possíveis limitações de hardware dos nós sensores e os padrões de comunicação de RSSF. A proposta do protocolo T-MAC é utilizar ciclos de atividade e repouso para diminuir o consumo de energia. Um temporizador ( $T_A$ ) é utilizado para controlar o tempo em que o nó fica ativo. A Figura 10 mostra um exemplo de ciclo do protocolo T-MAC (CORREIA *et al.*, 2005).

As mensagens recebidas durante o tempo de repouso são armazenadas e transferidas em rajadas de tamanho variável no início do tempo de atividade. O nó sensor escuta a rede, transmite e recebe dados durante seu tempo ativo. O temporizador determina o final do tempo ativo quando não ocorrem eventos durante um tempo  $T_A$ .

As adaptações feitas no T-MAC para este trabalho inseriram características cognitivas ao protocolo que, originalmente, não realiza troca de canais. A proposta é permitir que os nós sensores realizem sensoriamento

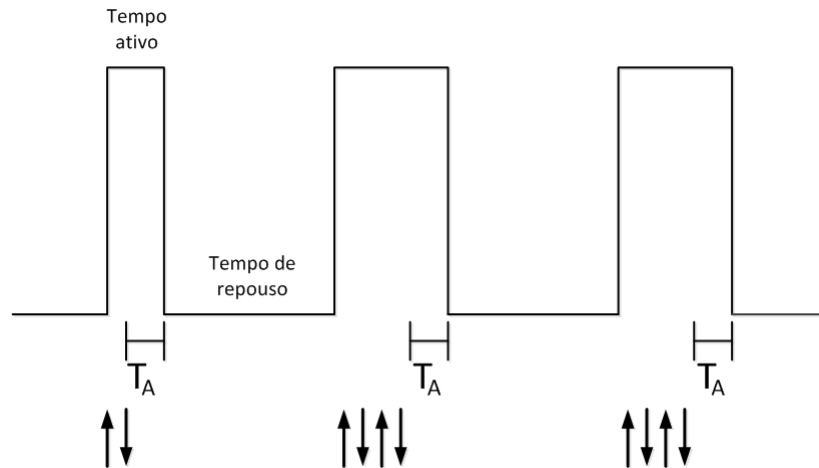


Figura 10 Ciclo adaptativo do protocolo T-MAC.

de espectro e seleção do melhor canal disponível. Um dos critérios utilizados foi escolher o melhor canal disponível com base na força do sinal recebido (RSSI). A segunda abordagem utiliza, além do RSSI, o SINR, o ruído base e a latência para escolher o melhor canal com base no método de decisão AHP.

Além dos métodos de seleção dinâmica de canais, foi desenvolvida uma técnica que permite que os nós sensores ajustem dinamicamente o tempo entre cada seleção de canal de acordo com as condições da rede e a tolerância a falhas da aplicação. Para permitir essa variação no tempo entre cada seleção de canal, foi utilizada a função de amortização chamada EWMA (*Exponentially Weighted Moving-Average*) ou média móvel exponencialmente ponderada devido à sua simplicidade de cálculos e por não exigir o armazenamento de valores e parâmetros em memória. O EWMA é uma função em que os valores mais antigos são decrementados exponencialmente. Essa média é baseada em um fator  $\alpha$ , no qual  $0 < \alpha < 1$ . Assim, o EWMA evita variações bruscas no tempo entre seleções de canais (COR-

REIA, 2006). A técnica proposta neste trabalho consiste em alterar, em tempo real, o período entre cada seleção (e possível troca) de canal em cada nó sensor, caso a taxa de entrega de pacotes esteja momentaneamente inferior um limite pré-estabelecido. Esse mecanismo foi desenvolvido com base no EWMA e inspirado no método do protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*) usado para estimar o tempo total de transmissão de ida e volta (RTT - *Round-Trip Time*) em uma determinada conexão (KUROSE; ROSS, 2012), sendo descrito pela Equação 1:

$$t_{novo} = (1 - \alpha) \times t_{atual} + \alpha \times t_{mediato} \quad (1)$$

na qual,  $t_{novo}$  é o novo tempo calculado para periodicidade do processo de escolha do melhor canal,  $t_{atual}$  é o tempo atual de periodicidade do processo de escolha do melhor canal,  $t_{mediato}$  é o tempo decorrido entre a execução de um processo de escolha do melhor canal e a ocorrência de perdas significativas ( $t_{mediato} = t_{falha} - t_{decorrido}$ ). O valor de  $\alpha$  é um fator utilizado para indicar o tipo de abordagem a ser adotada. Assim, quanto menor o valor de  $\alpha$ , mais conservadora será a abordagem, ou seja, no caso de ocorrência de falha, o  $t_{mediato}$  terá uma menor influência no cálculo do  $t_{novo}$ . De maneira análoga, quanto maior o valor de  $\alpha$ , maior será a influência do  $t_{mediato}$  no valor do  $t_{novo}$ . A Figura 11 mostra o funcionamento desse mecanismo de ajuste dinâmico e em tempo real da periodicidade do processo de escolha do melhor canal disponível para a operação.

Caso sejam detectados  $n$  ciclos sem perdas superiores ao limite pré-estabelecido, o  $t_{atual}$  deve retornar ao valor um padrão ( $t_{padrao}$ ) e deve permanecer com esse valor até que as falhas superem o limiar, conforme mostra o Algoritmo 2.

```

1 calculaTempoDeEscolha
2 (alpha, falhaTolerada, taxaEntrega, tAtual, tImed, tNovo, tPadrao);
   /* Verifica se a taxa de entrega está abaixo do
      limite */
3 se taxaEntrega < falhaTolerada então
   /* Calcula o novo tempo */
4   tNovo = (1 - alpha) * tAtual + (alpha * tImed);
   /* O tempo atual é atualizado */
5   tAtual = tNovo;
   /* A variável que armazena o número de ciclos sem
      falha é zerada */
6   semFalhasSucessivas = 0;
7 senão
   /* A variável que armazena o número de ciclos sem
      falha é incrementada */
8   semFalhasSucessivas ++;
   /* Verifica se a não ocorrência de falhas chegou ao
      valor determinado */
9 se semFalhasSucessivas ≥ n então
   /* O tempo atual é atualizado */
10  tAtual = tPadrao;
11 Retorna tAtual;

```

**Algoritmo 2:** Calcula o tempo entre duas escolhas de melhor canal.

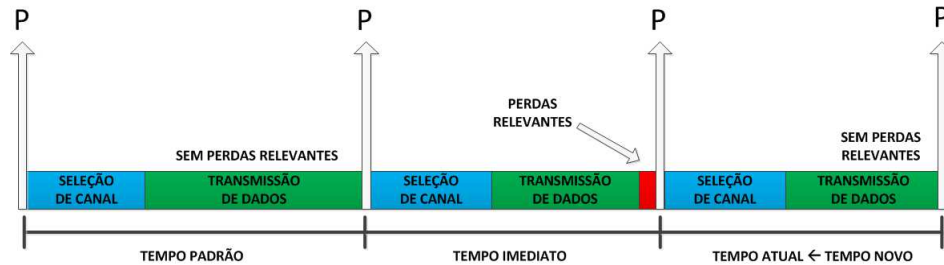


Figura 11 Mecanismo de ajuste dinâmico e em tempo real da periodicidade do processo de escolha do melhor canal.

O algoritmo de cálculo do tempo entre escolhas de canal verifica se a taxa de entrega de pacotes está inferior ao limite mínimo tolerado (linha 3). Caso esteja, o valor do novo tempo é calculado (linha 4) e, em seguida, atribuído à variável de tempo atual (linha 5). Além disso, a variável que armazena o número de ciclos sem falhas recebe o valor zero (linha 6). Porém, se a taxa de entrega ainda permanecer superior ao limite mínimo tolerado, a variável que armazena o número de ciclos sem falhas é incrementada em uma unidade (linha 8). Em seguida, o algoritmo verifica se o número de ciclos sem falhas chegou a um determinado valor (linha 9). Caso tenha chegado, o valor o tempo atual é atualizado para o tempo padrão escolhido (linha 10).

### 3.5.1 Cenários de simulações

Durante as simulações, diversas composições de cenários foram testadas e avaliadas. Devido a questões de custo e escalabilidade, os ambientes de simulação avaliados são mais complexos do que os ambientes de experimentação reais. Nas simulações foram utilizados 18 nós sensores equipados com dois rádios cada (CC2420 e CC1000) que ficaram distribuídos conforme



mostra a Figura 12. Cada nó sensor utiliza transceptores *half-duplex*, logo só pode transmitir ou receber em um canal de cada vez. Além disso, apenas um rádio pode ser ativado por vez em cada dispositivo da rede. O alcance de cada um dos nós é de 250 m. O protocolo de roteamento utilizado pelos nós sensores foi o AODV (*Ad Hoc On-Demand Distance Vector*). O tempo definido para a simulação foi de 500 s com tráfego periódico de dados entre os nós da rede (pacotes enviados periodicamente a cada 2 s).

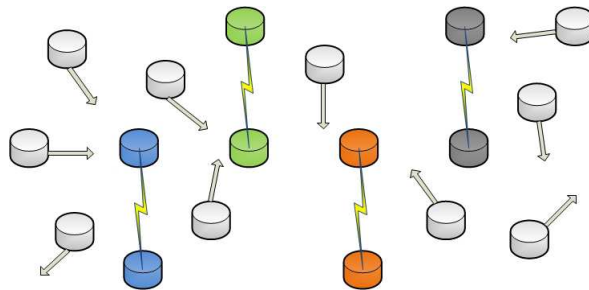


Figura 12 Cenário com os nós sensores para as simulações com 4 fluxos simultâneos.

Utilizando esses parâmetros como base, foram feitas combinações considerando-se:

- Densidade da rede:
  - Baixa: área sensoreada de 75 m x 30 m.
  - Alta: área sensoreada de 50 m x 20 m.
- Níveis de ruído de canal:
  - Baixo: -100 dBm.
  - Médio: -95 dBm.
  - Alto: -92 dBm.

- Número de fluxos simultâneos:
  - De 1 a 4 fluxos simultâneos: os nós que realizavam um estabelecimento de fluxo permaneceram estáticos, enquanto os demais nós da rede podiam se mover livremente dentro da área sensoreada.

Além dos parâmetros citados anteriormente, para todos os cenários de simulação, foram adotados  $\alpha$  com o valor de 0.5 e taxa de perdas de pacotes tolerável com o valor de 20%. Tais valores foram obtidos de maneira empírica por meio de testes de simulação preliminares. O gráfico da Figura 13 mostra esses valores obtidos para o cenário em que a rede era de alta densidade e com alto ruído. Os valores de  $\alpha$  testados foram 0,25, 0,50 e 0,75. O protocolo utilizado para o teste foi o DSCMAC. Os valores de  $\alpha$  e da taxa de perdas podem ser substituídos de acordo com a necessidade da aplicação e sua tolerância à perda de pacotes.

### 3.5.1.1 Modelo de mobilidade

O modelo de mobilidade utilizado pelos nós sensores durante as simulações foi o *Random Walk*. Com esse modelo, os nós sensores deslocam-se partindo de sua posição inicial para uma nova posição, escolhendo aleatoriamente valores para a velocidade e a direção no percurso. Caso o nó móvel encontre uma borda, é refletido com o mesmo ângulo de incidência (GONÇALVES *et al.*, 2013). Para as simulações, a velocidade dos nós móveis variou aleatoriamente entre 2 *m/s* e 10 *m/s*.

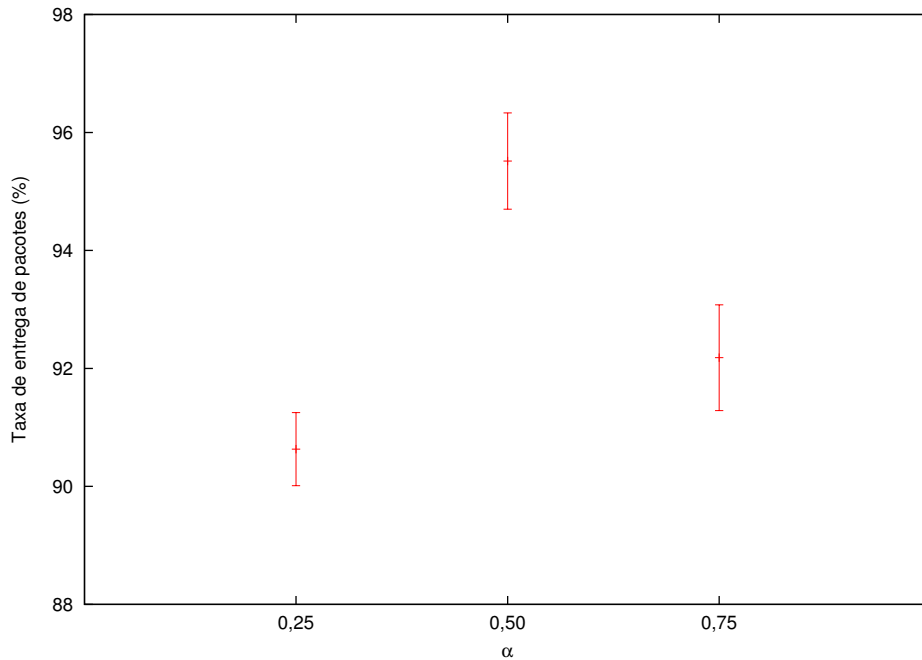


Figura 13 Resultado de testes preliminares para determinação do valor de  $\alpha$ .

### 3.5.2 Definição das métricas avaliadas nas simulações

Para todas as combinações de cenários de simulações, as seguintes métricas foram utilizadas:

- Taxa de entrega de pacotes: o valor será dado pela razão entre os pacotes enviados e os pacotes recebidos durante a execução das simulações.
- Latência (em *ms*): é tempo em que o pacote leva para sair do nó de origem e chegar ao nó destino.

- Troca de canal: também chamada de *handoff*, essa métrica indica o número de vezes em que, devido à interferência de sinais, os nós sensores trocaram seus canais de operação.
- Retransmissões de pacotes: determina o número de vezes em que foi necessário transmitir um pacote perdido.
- Consumo de energia (em  $mJ$ ): a eficiência energética dos protocolos testados é um dos critérios adotados neste trabalho.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos por meio dos experimentos práticos sobre o comportamento de redes de sensores sem fio sob interferência, a avaliação do protótipo de nó sensor multirrádio e os resultados das simulações dos protocolos propostos por este trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos e discussões sobre os experimentos práticos e as simulações realizados para este trabalho.

### 4.1 Resultados dos experimentos práticos

A seguir serão apresentados os resultados obtidos por meio da realização dos experimentos práticos sobre o impacto da interferência de sinais em RSSFs e as melhorias proporcionadas pelo uso da abordagem de múltiplos rádios no protótipo de nó sensor. Os resultados dos cenários descritos a seguir são referentes aos cenários apresentados na seção 3.3.

#### 4.1.1 Cenário 1: RSSF sem interferência

Neste cenário, mesmo com a RSSF operando sem a presença de interferências eletrônicas, os resultados mostram que ocorre perda de pacotes. O gráfico da Figura 14 mostra que as perdas foram mais significativas nos canais 18, 20 e 26, alcançando aproximadamente 4,2%, 3,8% e 3,1% (ou 85, 78 e 63 pacotes), respectivamente.

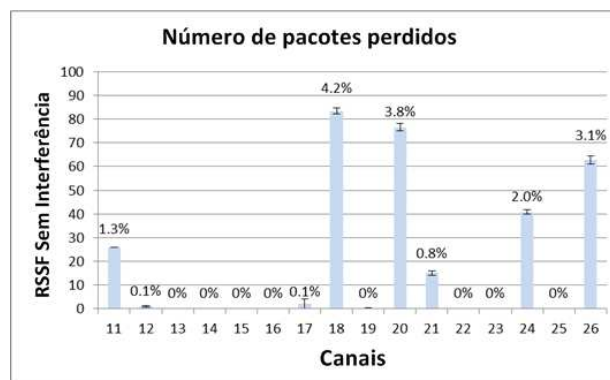


Figura 14 Número de pacotes perdidos (sem interferência eletrônica).

As perdas nesse cenário, ainda que sem fontes eletrônicas de interferência, podem ocorrer devido a, por exemplo, perdas de sincronização entre os nós, problemas de *multipath fading* e de perdas de caminho (*path loss*). No primeiro caso, se ocorrer uma falta de sincronia momentânea entre os nós da rede, eventuais perdas de pacotes podem ocorrer. O *multipath fading* são problemas causados pela refração do sinal e sua consequente divisão. Assim, as ondas eletromagnéticas chegam ao receptor por caminhos diferentes, fazendo com que ambas se anulem (CHEN *et al.*, 2005). Já a perda de caminho é considerada a diminuição da potência média do sinal do nó destino em função da distância em relação ao nó de origem. A *path loss* inclui todos os efeitos associados à distância, à altura das antenas dos nós e à interação das ondas eletromagnéticas propagadas com os objetos presentes nos arredores do percurso entre o nó de origem e o nó destino. Dessa forma, tal interação pode resultar em perdas de pacotes (RAPPAPORT, 2009).

#### 4.1.2 Cenário 2: RSSF interferindo em outra RSSF

Os resultados deste experimento mostram que a maior causa de perda de pacotes é a interferência co-canal. Como esperado, quando ambas as RSSFs operam no canal 19 (aumentando a probabilidade de ocorrência de colisões), a perda de pacotes é maior, chegando a aproximadamente 10%. Apesar de próximos ao canal da rede interferente, os canais 18 e 20 não sofreram perdas. Isso pode ser explicado pelo fato de não haver sobreposição de frequências dos canais das RSSFs, conforme mostrado anteriormente na Figura 1. Além disso, foram observadas perdas relevantes nos canais 12, 15 e 22. Outro fator que pode causar essas perdas é a imperfeição dos trans-

ceptores. A Figura 15 mostra a perda de pacotes que ocorreram em todos os canais.

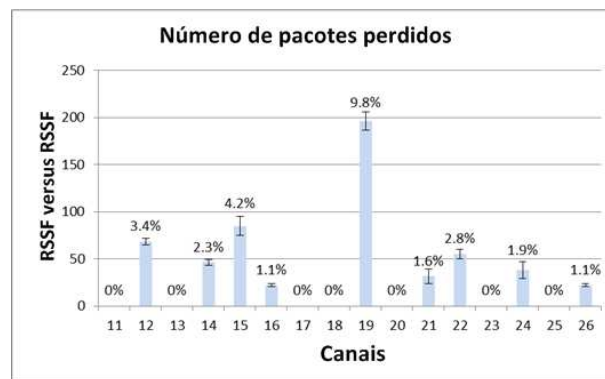


Figura 15 Número de pacotes perdidos (RSSF sofrendo interferência de outra RSSF).

#### 4.1.3 Cenário 3: WLAN interferindo em uma RSSF

Neste cenário, a interferência causada por uma WLAN em uma RSSF causou perdas de pacotes significativas. Os resultados mostram que os canais mais afetados foram 18, 16, 17 e 19, com perdas de pacotes de 27%, 22,6%, 21,8% e 18,5% (ou 542, 451, 436 e 370 pacotes), respectivamente.

Isto pode ser explicado devido à WLAN também utilizar uma frequência próxima à utilizada pelos canais da RSSF que sofreram as maiores degradações. Entre os canais 12 e 15, outras perdas significativas puderam ser observadas devido à proximidade com a frequência de operação da WLAN. A taxa de entrega nos canais 21 ao 25 foi de 100%, como mostra a Figura 16, uma vez que suas frequências estão a uma distância maior da frequência utilizada pela WLAN.

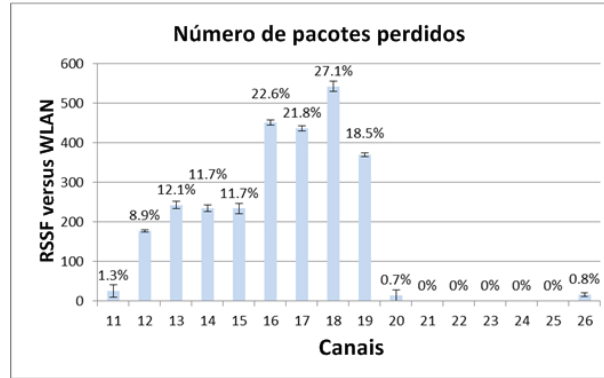


Figura 16 Número de pacotes perdidos (RSSF sofrendo interferência de uma WLAN).

#### 4.1.4 Cenário 4: *Bluetooth* interferindo em uma RSSF

Era esperado que o nível de interferência fosse praticamente zero, uma vez que dispositivos *Bluetooth* utilizam uma técnica conhecida como *frequency hopping*. Este método permite que os dispositivos sincronizados troquem rapidamente para qualquer um dos canais disponíveis, reduzindo a chance de interferência (MORSI; HUAGANG; QIANG, 2009). Contudo, durante o *frequency hopping*, podem ocorrer momentos em que os canais dos dispositivos *Bluetooth* coincidam com os canais da RSSF, ocasionando colisões e perdas de pacotes.

Sendo assim, no cenário 4, a rede de sensores sem fio sofreu perdas de pacotes em todos os canais, resultando em uma perda média de 3%. Os canais 14, 11 e 18 mostraram os piores resultados, perdendo 5,7%, 4,7% e 4,2% (ou 116, 93 e 89) dos pacotes, respectivamente, como mostrado na Figura 17.



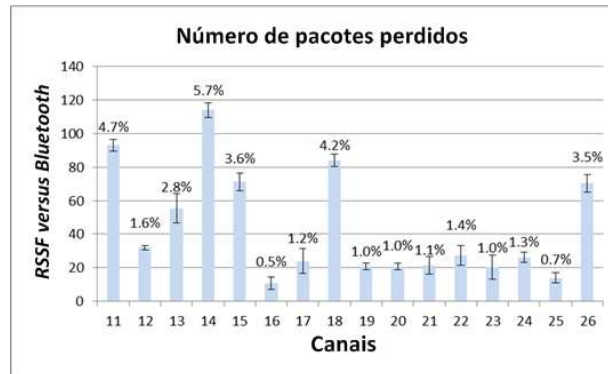


Figura 17 Número de pacotes perdidos (RSSF sofrendo interferência de uma rede *Bluetooth*).

#### 4.1.5 Cenário 5: Forno de micro-ondas interferindo em uma RSSF

A interferência do forno de micro-ondas foi detectada em todos os canais avaliados. Os canais 23, 19, 16 e 17 foram, nesta ordem, os mais penalizados, uma vez que suas frequências estão próximas à do dispositivo interferente. O pior desempenho foi observado no canal 23, que sofreu perdas de pacotes em torno de 23%. A Figura 18 mostra o número de pacotes perdidos para este cenário.

#### 4.1.6 Avaliação do RSSI

O RSSI é uma medida que representa a força do sinal recebido pela antena (WU *et al.*, 2008). Uma vez que redes de sensores sem fio operam com baterias, os rádios são projetados para transmitir dados em baixa potência (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). O RSSI foi coletado a vazio sem fontes de interferência e, posteriormente, foi medido para coletar valores de outras fontes de ruído/interferência sem considerar um enlace

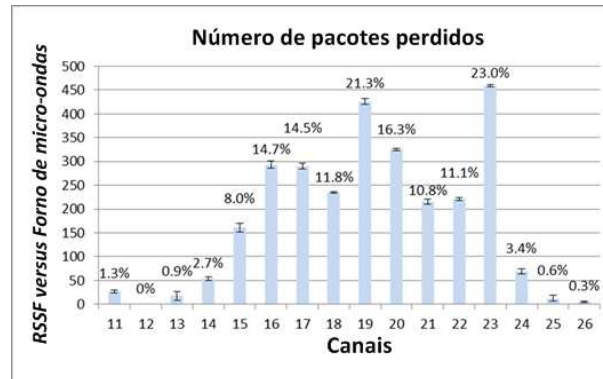


Figura 18 Número de pacotes perdidos (RSSF sofrendo interferência de um forno de micro-ondas).

ponto-a-ponto entre os nós. A Figura 19 mostra as leituras de RSSI para os cinco cenários apresentados anteriormente. O intervalo de confiança foi omitido devido ao seu tamanho reduzido.

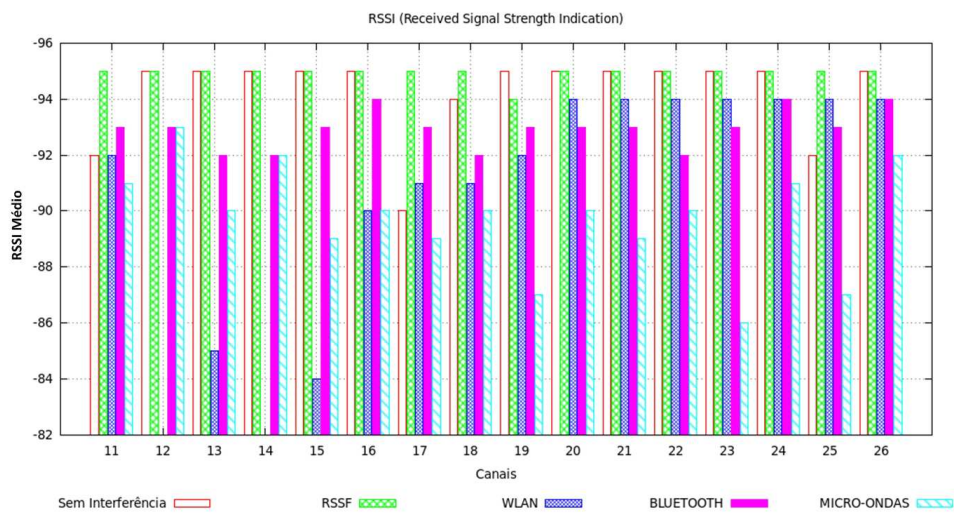


Figura 19 Valores de RSSI em uma RSSF sob interferência (intervalo de confiança omitido).

Para a interferência causada por uma RSSF em outra do mesmo tipo, o valor do RSSI não sofreu alteração significativa, permanecendo em torno de -95 dBm em todos os canais. No caso da interferência causada pela WLAN, o valor do RSSI diminuiu entre os canais 13 e 17, chegando a -83 dBm. Esta redução ocorre porque os dispositivos da WLAN têm uma potência de transmissão maior do que os nós sensores (CHOWDHURY; AKYILDIZ, 2009b). Em canais com frequência mais distante da fonte de interferência, o nível de RSSI permaneceu constante em aproximadamente -94 dBm. Os dispositivos *Bluetooth* transmitem seus dados a uma potência menor do que os dispositivos da WLAN (ZHANG *et al.*, 2012). Mesmo assim, o valor do RSSI diminuiu na presença de uma rede *Bluetooth*. Os resultados mostram que em todos os canais a média de RSSI é de -93 dBm.

Por muitos anos, acreditava-se que os fornos de micro-ondas não permitiam o vazamento de sinais eletromagnéticos. Porém, experimentos reais mostram que existem vazamentos. Além disso, esses dispositivos não são projetados para evitar a interferência em outros dispositivos eletrônicos e operam em altas potências (ZIN; JENU; PO'AD, 2011). A média de RSSI sob interferência do forno de micro-ondas foi de aproximadamente -90 dBm. Os valores extremos ocorreram no canal 12 (-93 dBm) e no canal 23 (-86 dBm).

#### **4.1.7 Avaliação geral do protótipo de nó sensor multirrádio**

Após conclusão empírica de que a interferência de sinais causa reduções relevantes no desempenho de redes de sensores sem fio, foi avaliado um protótipo de nó sensor com dois rádios, operando em 2,4 GHz e 900 MHz e permitindo que o nó sensor determine a melhor frequência de operação

e o melhor canal disponível. A avaliação do protótipo ocorreu de maneira similar à descrita no capítulo de metodologia e utilizando as mesmas fontes de interferência e as mesmas configurações. Os testes realizados com o protótipo de nó sensor com múltiplos rádios apresentaram resultados promissores. Para todas as situações de interferências de sinais avaliadas, a taxa de entrega foi de pelo menos 97%, como mostrado na Tabela 1. Os resultados mostram que a utilização de múltiplos rádios em diferentes faixas de frequência pode ajudar a mitigar os problemas de coexistência de redes de sensores sem fio com outros sistemas sem fio que utilizam a faixa de frequência de 2,4 GHz.

Tabela 1 Taxa de entrega de pacotes do protótipo multirrádio.

Fonte de Interferência	Taxa de entrega de pacotes (%)			IC
	2.4 GHz	900 MHz	Total	
RSSF	99.83	98.27	99.19	0.0809
WLAN	97.05	98.12	97.58	1.0865
<i>Bluetooth</i>	98.81	98.20	98.72	0.8125
Forno de micro-ondas	96.13	98.19	97.16	0.9495

A melhoria acontece devido a duas ações realizadas pelo protótipo. Primeiro, o nó sensor escolhe o melhor canal na faixa de frequência de 2,4 GHz, reduzindo a quantidade de interferência quando opera nessa faixa. Além disso, quando não existe um canal disponível em 2,4 GHz, o nó sensor pode utilizar o rádio de 900 MHz, também selecionando o canal com a menor interferência. A desvantagem de utilizar o rádio CC1000 é a sua largura de banda reduzida.

## 4.2 Resultados das simulações

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações dos cenários descritos no Capítulo 3. Foram realizadas 33 simulações para cada uma das possíveis combinações de parâmetros. Devido ao grande número de combinações geradas, serão apresentados os resultados para as simulações com redes de sensores sem fio com 4 fluxos, já que esta é a situação em que ocorrem os maiores níveis de interferência de sinais. O intervalo de confiança considerado foi de 99%. Nos cenários de baixa densidade e de alta densidade, os protocolos avaliados são representados na legenda dos gráficos por  $[protocolo] - B$  e por  $[protocolo] - A$ , respectivamente.

### 4.2.1 Taxa de entrega de pacotes

O gráfico da Figura 20 mostra o desempenho na entrega de pacotes dos três protocolos avaliados nas densidades baixa e alta e com os ruídos baixo, médio e alto.

O desempenho dos protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP na taxa de entrega de pacotes foi superior ao desempenho protocolo T-MAC em todas as situações avaliadas. Para as situações em que a rede apresentava baixa densidade, os protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP obtiveram ganhos discretos em relação ao protocolo T-MAC: 2,2% e 2,9% quando o ruído era baixo e 11,4% e 8,9% quando o ruído era médio, respectivamente. Essa melhoria, apesar de discreta, ocorreu mesmo considerando que os protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP realizaram diversas trocas de canais, enquanto o T-MAC permaneceu no mesmo canal. Quando o ruído na rede foi alto, a melhoria na taxa de entrega de pacotes foi mais significativa, chegando a 63,1% para o DSCMAC e 58,9% para o DSCMAC-AHP. Esse aumento na

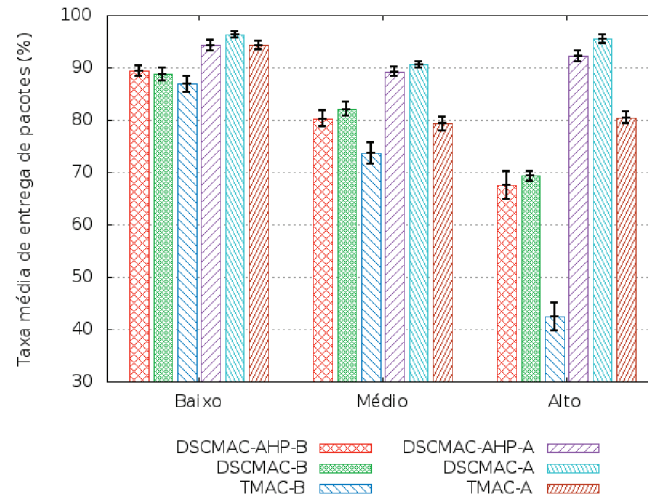


Figura 20 Taxa média de entrega de pacotes (%).

taxa de entrega de pacotes se deve ao fato da capacidade dos protocolos propostos de reagir a situações em que a qualidade do canal diminui. Assim, ao detectar níveis de interferência e perdas acima dos tolerados, os protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP escolhem outros canais em melhores condições, fazendo com que a taxa de entrega seja superior ao protocolo T-MAC que nunca realiza troca de canais.

Para os cenários em que a rede foi considerada de alta densidade e o ruído baixo, o protocolo DSCMAC apresentou um ganho de 2,1% em relação ao protocolo T-MAC. Já o protocolo DSCMAC-AHP, apresentou um resultado semelhante ao resultado do protocolo T-MAC para essa situação. Ainda considerando a rede com alta densidade, quando o ruído aumentou os protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP apresentaram um maior ganho em relação ao protocolo T-MAC, alcançando 14,2% e 12,4% quando o ruído foi médio e 18,7% e 14,5% quando o ruído foi alto. Os resultados mostram que, mesmo na pior situação avaliada (rede com alta densidade e alto ruído),

os protocolos propostos por este trabalho obtiveram melhores taxas de entrega de pacotes, já que possuem a habilidade de escolher o melhor canal disponível.

#### 4.2.2 Latência

Em relação à latência, o comportamento dos três protocolos avaliados foi semelhante. A maior diferença ocorreu no cenário em que a rede apresentou baixa densidade e alto ruído. O T-MAC obteve uma latência média inferior em 1,2% quando comparado ao DSCMAC. A diferença entre os valores obtidos para a latência dos três protocolos e em todos os cenários testados pode ser considerado desprezível, conforme mostrado pelo gráfico da Figura 21.

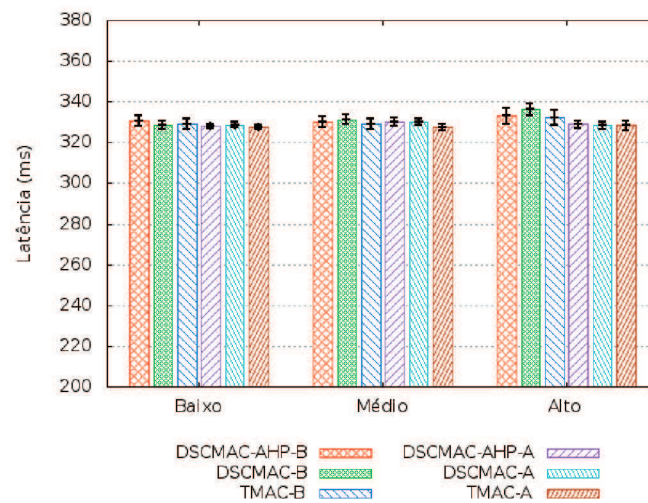


Figura 21 Latência (ms).

### 4.2.3 Trocas de canais (*Handoffs*)

O protocolo T-MAC não será avaliado nesta seção, já que não realiza troca de canais. Para todos os cenários avaliados, o protocolo DSCMAC realizou um maior número de trocas de canal. As maiores diferenças ocorreram nas situações em que a rede apresenta alto ruído. Quando a rede era de baixa densidade, o protocolo DSCMAC realizou até 87,3% trocas de canais a mais do que o protocolo DSCMAC-AHP. Já quando a rede era de alta densidade, o comportamento se repetiu. Contudo o DSCMAC realizou 39,4% mais trocas do que o protocolo DSCMAC-AHP, conforme mostra o gráfico da Figura 22. Esse maior número de trocas do protocolo DSCMAC-AHP pode ser explicado pelo fato de que ele considera um maior número de parâmetros no momento da decisão do melhor canal, enquanto o DSCMAC considera apenas o RSSI.

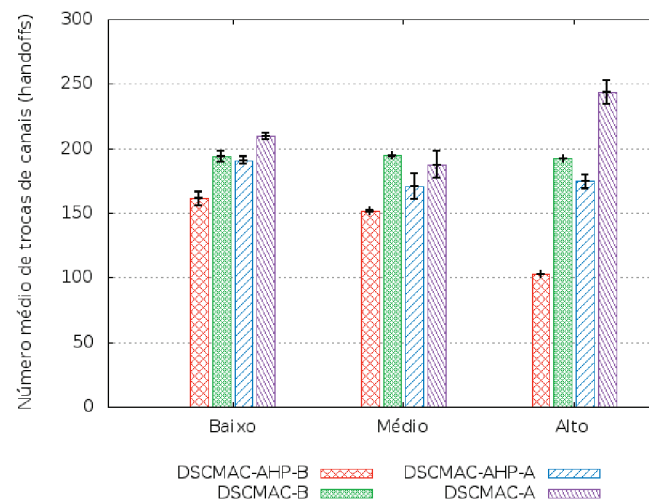


Figura 22 Número médio de trocas de canais (*handoffs*).



#### 4.2.4 Número de retransmissões

O número de retransmissões de pacotes perdidos dos protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP foi superior em todas as situações de densidade e ruído avaliadas e similares entre si. Como os protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP realizam seleção dinâmica e troca de canais, podem ocorrer momentos em que os nós da rede perdem o sincronismo, acarretando em perdas de pacotes e uma consequente retransmissão dos mesmos. Por isso, os protocolos propostos neste trabalho realizaram um maior número de retransmissões de pacotes perdidos, conforme mostra o gráfico da Figura 23.

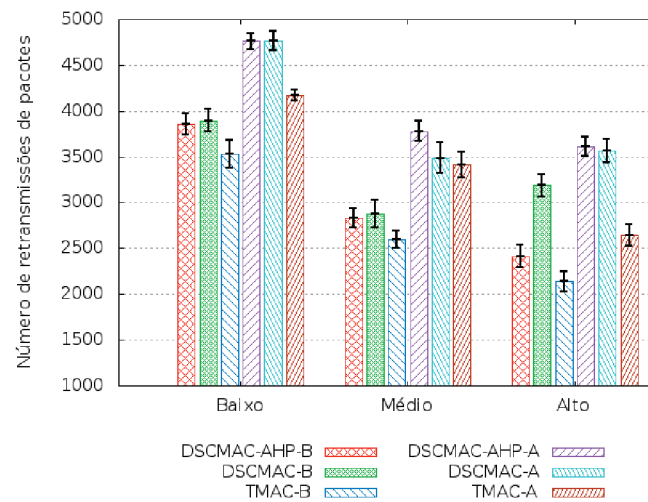


Figura 23 Número médio de retransmissões de pacotes perdidos.

#### 4.2.5 Consumo de energia

Como citado anteriormente, o principal objetivo do protocolo TMAC é ser eficiente no consumo de energia. Os resultados obtidos nas simulações mostram que, mesmo com as adaptações realizadas para os pro-

protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP, o consumo de energia não sofreu alterações significativas. Nos cenários em que o consumo dos protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP foi maior, a diferença foi em média 0,2%. A maior alteração ocorreu no cenário no qual a densidade da rede era alta e o ruído era alto. Nesse caso, o protocolo DSCMAC consumiu 0,6% mais energia do que o protocolo T-MAC, conforme mostra o gráfico da Figura 24. O fato dos protocolos DSCMAC e DSCMAC-AHP realizarem constantes seleções e trocas de canais pode explicar esse acréscimo no consumo energético do nó sensor.

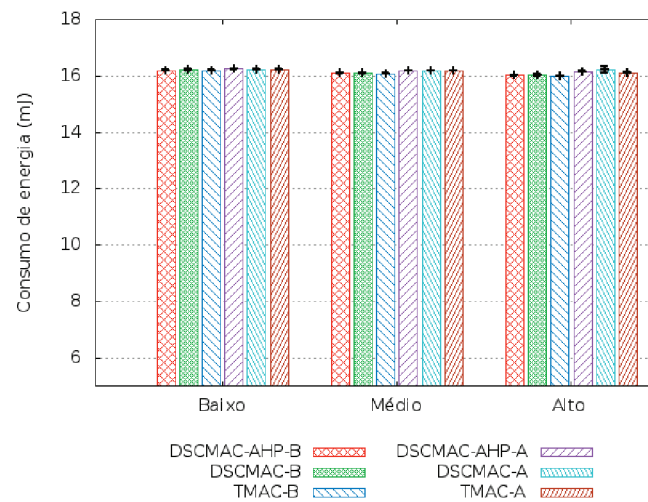


Figura 24 Consumo de energia ( $mJ$ ).

As Tabelas 2 e 3 mostram que o aumento do consumo de energia dos nós para os protocolos propostos foi insignificante considerando-se a margem de erro máxima de  $\pm 0,04mJ$  em um intervalo de confiança de 99%.

No capítulo a seguir, serão apresentadas as conclusões finais a respeito deste trabalho.

Tabela 2 Consumo de energia para a rede com baixa densidade.

Consumo de energia (em $mJ$ ) - Baixa Densidade			
	Ruído Baixo	Ruído Médio	Ruído Alto
DSCMAC	$16,21 \pm 0,04$	$16,1 \pm 0,02$	$16,1 \pm 0,04$
DSCMAC-AHP	$16,19 \pm 0,01$	$16,09 \pm 0,01$	$16,01 \pm 0,04$
T-MAC	$16,19 \pm 0,02$	$16,08 \pm 0,01$	$15,99 \pm 0,02$

Tabela 3 Consumo de energia para a rede com alta densidade.

Consumo de energia (em $mJ$ ) - Alta Densidade			
Protocolos	Ruído Baixo	Ruído Médio	Ruído Alto
DSCMAC	$16,23 \pm 0,01$	$16,18 \pm 0,01$	$16,22 \pm 0,1$
DSCMAC-AHP	$16,24 \pm 0,01$	$16,19 \pm 0,01$	$16,16 \pm 0,03$
T-MAC	$16,22 \pm 0,03$	$16,19 \pm 0,01$	$16,12 \pm 0,02$

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram avaliados o comportamento das redes de sensores sem fio na presença de fontes de interferência em cenários reais, a prototipação de um nó sensor multirrádio como alternativa para mitigar os problemas de interferência e dois protocolos de sensoriamento e decisão de espectro, chamados DSCMAC e DSCMAC-AHP.

A análise dos resultados obtidos por meio dos experimentos práticos mostra que as interferências causadas pela coexistência de RSSFs com outros tipos de redes e dispositivos sem fio não devem ser negligenciadas. Os resultados obtidos em todos os cenários mostram que a concorrência pelo meio de transmissão entre RSSF e outras redes e dispositivos que operam na faixa de frequência de 2,4 GHz acarreta considerável perda de desempenho. Os maiores problemas nas RSSFs, observados durante os testes práticos, foram causados pela WLAN e pelo forno de micro-ondas. Contudo, os experimentos revelaram que as RSSFs podem sofrer com a interferência de quaisquer dispositivos que operem na mesma faixa de frequência.

Uma solução proposta para mitigar os problemas de interferências de sinais em redes de sensores sem fio é o uso de nós sensores com múltiplos rádios. O protótipo proposto mostrou que a utilização de diferentes faixas de frequências e a seleção dinâmica de canais permitem que as perdas de pacotes sejam consideravelmente reduzidas. As taxas de entrega, com o protótipo sob as mesmas condições de interferências que os nós tradicionais, atingiram valores superiores a 97% nos diferentes cenários analisados.

Além de experimentos práticos, foram propostas adaptações ao protocolo T-MAC para seleção dinâmica de canais em redes de sensores sem fio. Os métodos desenvolvidos, chamados de DSCMAC e DSCMAC-AHP,

permitem que os nós sensores escolham dinamicamente o melhor canal disponível. O DSCMAC considera o valor do RSSI em sua decisão de canal. Já o DSCMAC-AHP considera, além do RSSI, outros parâmetros da rede, tais como, ruído, SINR e atraso. Os dois protocolos desenvolvidos utilizam um mecanismo que permite variar o tempo dinamicamente entre cada seleção de canal. Dessa forma, em caso de falhas na rede, os nós sensores podem realizar nova seleção e alterar o tempo para que a próxima aconteça. Os resultados obtidos nas simulações mostraram que os novos protocolos, DSCMAC e DSCMAC-AHP, melhoraram a taxa de entrega do T-MAC em até 63% e 59%, respectivamente. Apesar das trocas de canais e de um número maior de retransmissões, os protocolos desenvolvidos mantiveram níveis de latência e consumo de energia similares.

Como propostas de trabalhos futuros, podem ser realizadas simulações em redes de sensores com um maior número de nós e testar a utilização dos protocolos desenvolvidos em outras aplicações de rede e outras plataformas, tais como redes veiculares. Além disso, podem ser realizados experimentos e simulações para avaliar os efeitos e os níveis de interferências na faixa de frequência de 900 MHz.



## REFERÊNCIAS

- ABDELHAMID, B.; ELSABROUTY, M.; ELRAMLY, S. Novel interference alignment in multi-secondary users cognitive radio system. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS, 12., 2012, Cappadocia. **Proceedings...** Cappadocia: ISCC, 2012. p. 785-789.
- ACAR, B. et al. Zone-based spectrum sensing in cognitive radio. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS, 12., 2012, Cappadocia. **Proceedings...** Cappadocia: ISCC, 2012. p. 696-701.
- AHMED, N.; KANHERE, S.; JHA, S. Mitigating the effect of interference in wireless sensor networks. In: IEEE CONFERENCE ON LOCAL COMPUTER NETWORKS, 35., 2010, Denver. **Proceedings...** Denver: IEEE, 2010. p. 160-167.
- AKAN, O.; KARLI, O.; ERGUL, O. Cognitive radio sensor networks. **Network, IEEE**, Montreal, v. 23, n. 4, p. 34-40, July/Aug. 2009.
- ANGRISANI, L. et al. Experimental study of coexistence issues between IEEE 802.11b and IEEE 802.15.4 wireless networks. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Montreal, v. 57, n. 8, p. 1514-1523, Aug. 2008.
- ANSARI, J.; MÄHÖNEN, P. Channel selection in spectrum agile and cognitive mac protocols for wireless sensor networks. In: ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON MOBILITY MANAGEMENT AND WIRELESS ACCESS, 8., 2010, New York. **Proceedings...** New York: ACM, 2010. p. 83-90.
- BOULIS, A. **Castalia, a simulator for wireless sensor networks and body area networks: user's manual**. Version 3.0. Athanassions Boulis: NICTA, 2010. 120 p.
- BRIK, V. et al. Dsap: a protocol for coordinated spectrum access. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1., 2005, Dubrovnik. **Proceedings...** Dubrovnik: IEEE, 2005. p. 611-614.
- CANBERK, B.; OKTUG, S. A channel availability classification for cognitive radio networks using a monitoring network. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS, 12., 2012, Cappadocia. **Proceedings...** Cappadocia: ISCC, 2012. p. 690-695.
- CARVALHO, A. C. P. L. F. et al. **Grandes desafios da pesquisa em computação no Brasil: 2006 - 2016**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. 26 p.

CHEN, X. et al. A survey on improving tcp performance over wireless networks. In: CARDEI, M.; CARDEI, I.; DU, D. Z. (Ed.). **Resource management in wireless networking**. Berlin: Kluwer Academic, 2005. p. 657-695.

CHOWDHURY, K.; AKYILDIZ, I. Interferer classification, channel selection and transmission adaptation for wireless sensor networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, 9., 2009, Galveston. **Proceedings...** Galveston: IEEE, 2009. p. 1-5.

CORREIA, L. et al. A framework for cognitive radio wireless sensor networks. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS, 12., 2012, Cappadocia. **Proceedings...** Cappadocia: ISCC, 2012. p. 611-616.

CORREIA, L. H. A. **Técnicas de controle de potência para protocolos MAC em redes de sensores sem fio**. 2006. 173 p. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CORREIA, L. H. A. et al. A taxonomy for medium access control protocols in wireless sensor network. **Annales des Telecommunications**, Paris, v. 60, n. 7/8, p. 944-969, 2005.

DAM, T. van; LANGENDOEN, K. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 1., 2003, New York. **Proceedings...** New York: ACM, 2003. p. 171-180.

FERRARI, P. et al. Coexistence of wireless sensor networks in factory automation scenarios. **Sensors & Transducers Journal**, Wageningen, v. 90, p. 48-60, Apr. 2008a.

FERRARI, P. et al. Synchronized wireless sensor networks for coexistence. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 17., 2008, Luxembourg. **Proceedings...** Luxembourg: ETFA, 2008. p. 656-663.

FILIN, S. et al. Performance evaluation of IEEE 802.19.1 coexistence system. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, 11., 2011, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto: ICC, 2011. p. 1-6.

GE, Y. et al. Adsd: an automatic distributed spectrum decision method in cognitive radio networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE INFORMATION NETWORKS, 1., 2009, Cancun. **Proceedings...** Cancun: ICFIN, 2009. p. 253-258.



GONÇALVES, L. et al. Estudo sobre a influência dos modelos de mobilidade em aplicações de pulverização de precisão auxiliadas por redes de sensores sem fio. In: WORKSHOP OF COMMUNICATION IN CRITICAL EMBEDDED SYSTEMS, 1., 2013, Brasília. **Proceedings...** Brasília: UnB, 2013. p. 44-57.

HAYASHI, H. Standardization of coexistence management for industrial wireless. In: SICE ANNUAL CONFERENCE, 50., 2012, Akita. **Proceedings...** Akita: Akita University, 2012. p. 693-696.

HOWITT, I.; GUTIERREZ, J. IEEE 802.15.4 low rate: wireless personal area network coexistence issues. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING, 3., 2003, Shanghai. **Proceedings...** Shanghai: WCNC, 2003. p. 1481-1486.

JUNG, C. F. **Metodologia para pesquisa e desenvolvimento**: aplicada a novas tecnologias, produtos e processos. Taquara: Axcel Books, 2004. 154 p.

KARL, H.; WILLIG, A. **Protocols and architectures for wireless sensor networks**. New York: J. Wiley, 2005. 526 p.

KASSLIN, M. **IEEE P802.19 wireless coexistence**: timeline document. Tokyo: IEEE, 2010. 9 p.

KOZAL, A.; MERABTI, M.; BOUHAFS, F. An improved energy detection scheme for cognitive radio networks in low snr region. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS, 12., 2012, Cappadocia. **Proceedings...** Cappadocia: ISCC, 2012. p. 684-689.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Computer networking**: a top-down approach. Upper Saddle River: Pearson Education, 2012. 896 p.

LASORTE, N.; RAJAB, S.; REFAI, H. Experimental assessment of wireless coexistence for 802.15.4 in the presence of 802.11g/n. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2012, Pittsburg. **Proceedings...** Pittsburg: EMC, 2012. p. 473-479.

LEE, W. Y.; AKYILDIZ, I. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, Montreal, v. 7, n. 10, p. 3845-3857, 2008.

LEWANDOWSKI, A. et al. Coexistence of 802.11b and 802.15.4a-ss: measurements, analytical model and simulation. In: VEHICULAR

TECHNOLOGY CONFERENCE, 71., 2010, Taipei. **Proceedings...** Taipei: VTC, 2010. p. 1-6.

LI, W.; BAO, J.; SHEN, W. Collaborative wireless sensor networks: a survey. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, 11., 2011, Anchorage. **Proceedings...** Anchorage: SMC, 2011. p. 2614-2619.

MORSI, K.; HUAGANG, X.; QIANG, G. Performance estimation and evaluation of Bluetooth frequency hopping selection kernel. In: JOINT CONFERENCES ON PERVASIVE COMPUTING, 2009, Taipei. **Proceedings...** Taipei: JCPC, 2009. p. 461-466.

NETHI, S.; NIEMINEN, J.; JANTTI, R. Exploitation of multi-channel communications in industrial wireless sensor applications: avoiding interference and enabling coexistence. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2011, Cancun. **Proceedings...** Cancun: WCNC, 2011. p. 345-350.

OLIVEIRA, E. E. **Protocolo de decisão do espectro para redes de sensores sem fio cognitivos**. 2011. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

POLLIN, S. et al. Harmful coexistence between 802.15.4 and 802.11: a measurement-based study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COGNITIVE RADIO ORIENTED WIRELESS NETWORKS AND COMMUNICATIONS, 3., 2008, Singapore. **Proceedings...** Singapore: CrownCom, 2008. p. 1-6.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 432 p.

REZHA, F.; SHIN, S. **Performance analysis of isa100.11a under interference from an IEEE 802.11b wireless network**. Disponível em: <<http://prezi.com/sju3hxq-kegj/untitled-prezi/>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

SAATY, T. **Fundamentals of the analytic hierarchy process**. Pittsburgh: RWS, 2000. 477 p.

SAATY, T. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy network processes. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 168, n. 2, p. 557-570, Jan. 2006.

SALARVAN, A.; KURT, G. Multi-antenna spectrum sensing for cognitive radio under rayleigh channel. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND

COMMUNICATIONS. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS, 12., 2012, Cappadocia. **Proceedings...** Cappadocia: ISCC, 2012. p. 780-784.

SHELLHAMMER, S. **IEEE 802.19 wireless coexistence TAG**. Montreal: IEEE, 2004. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/19/>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

TOSCANO, E.; BELLO, L. L. Cross-channel interference in IEEE 802.15.4 networks. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON FACTORY COMMUNICATION SYSTEMS, 7., 2008, Dresden. **Proceedings...** Dresden: WFCS, 2008. p. 139-148.

WU, R. H. et al. Study of characteristics of rssi signal. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY, 2008, Chengdu. **Proceedings...** Chengdu: ICIT, 2008. p. 1-3.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. **Computer Networks**, Amsterdam, v. 52, n. 12, p. 2292-2330, 2008.

ZHANG, W.; SURESH, M.; STOLERU, R. On modeling the coexistence of wifi and wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE AD-HOC AND SENSOR SYSTEMS, 10., 2013, Hangzhou. **Proceedings...** Hangzhou: MASS, 2013. p. 493-501.

ZHANG, Y. et al. A low-power high-efficiency demodulator in bluetooth low energy receiver. In: CONFERENCE ON PH.D. RESEARCH IN MICROELECTRONICS AND ELECTRONICS, 8., 2012, Stuttgart. **Proceedings...** Stuttgart: PRIME, 2012. p. 1-4.

ZIN, N. M.; JENU, M. Z. M.; PO'AD, F. A. Measurements and reduction of microwave oven electromagnetic leakage. In: IEEE INTERNATIONAL RF AND MICROWAVE CONFERENCE, 2011, Seremban. **Proceedings...** Seremban: RFM, 2011. p. 1-4.