



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E  
SISTEMAS

Rogério Antônio Casagrande

**Redes IEEE 802.15.4 para Aplicações Móveis: Uma Arquitetura para  
Monitoramento de Grandezas Fisiológicas**

FLORIANÓPOLIS

2019

Rogério Antônio Casagrande

**Redes IEEE 802.15.4 para Aplicações Móveis: Uma Arquitetura para  
Monitoramento de Grandezas Fisiológicas**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Automação e Sistemas da  
Universidade Federal de Santa Catarina para a  
obtenção do título de Doutor em Engenharia de  
Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Alexandre Reinaldo  
de Moraes

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Barros Montez.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Casagrande, Rogério Antônio  
REDES IEEE 802.15.4 PARA APLICAÇÕES MÓVEIS: UMA  
ARQUITETURA PARA MONITORAMENTO DE GRANDEZAS FISIOLÓGICAS /  
Rogério Antônio Casagrande ; orientador, Ricardo Alexandre  
Reinaldo de Moraes, coorientador, Carlos Barros Montez,  
2019.  
183 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. RSSF. 3. Redes  
Corporais. 4. IEEE 802.15.4. 5. Fisioterapia. I. Moraes,  
Ricardo Alexandre Reinaldo de. II. Montez, Carlos Barros.  
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. IV.  
Título.

Rogério Antônio Casagrande

**Redes IEEE 802.15.4 para Aplicações Móveis: Uma Arquitetura para  
Monitoramento de Grandezas Fisiológicas**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Celso Alberto Saibel Santos, Dr.  
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Adão Boava, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi  
julgado adequado para obtenção do título de doutor em Engenharia de Automação e  
Sistemas.

---

Prof. Dr. Werner Kraus Júnior  
Coordenador do Programa

---

Prof. Dr. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes  
Orientador

Florianópolis, 2019.

Este trabalho é dedicado aos meus familiares.

## AGRADECIMENTOS

Por este curso de doutorado, há tanto a agradecer. Foram muitos os desafios e conquistas. Cada incentivo, contribuição ou mesmo crítica, foram importantes para o meu crescimento. Muitos momentos difíceis foram superados com o apoio da família, colegas, orientadores, e de Deus.

À Deus, agradeço pelo dom da vida, pela família abençoada que me concedeu, pelas oportunidades que a vida me deu, pelas pessoas que encontrei na jornada, pela saúde e proteção sempre iluminando o meu caminho.

À minha família, Casagrande e agregados, vocês são a minha fortaleza. À minha esposa Adriana pelo amor, companheirismo e compreensão nos momentos mais difíceis, e às minhas filhas Giulia e Isabeli, que são tudo para mim. Aos meus sogros, pelo incondicional apoio e carinho. Aos meus queridos pais Antônio e Carmela, meus eternos amores, que não puderam acompanhar de perto essa conquista por estarem junto de Deus, mas estiveram sempre comigo nessa jornada. Aos meus irmãos e irmãs, cunhados e cunhadas, sobrinhos e sobrinhas e demais familiares, como são importantes nesta vida. Em especial, minha madrinha Zaneide e cunhado Alírio (*in memoriam*), seus filhos, genros e netas que me acolheram em Florianópolis nas incontáveis viagens. Família, muito obrigado!

Aos meus colegas da UFSC em Florianópolis e Araranguá, da FEUP em Portugal, obrigado pela parceria. Aos acadêmicos bolsistas da UFSC de Araranguá, o meu agradecimento pelo suporte.

Ao meu Orientador, Ricardo Moraes, obrigado por aceitar o desafio de me orientar. Não teria conseguido se não fosse por sua atenção, paciência, apoio e dedicação. Você é um orientador exemplar, exigente e participativo, organizado e um excelente pesquisador. Um coautor de fato. Muito obrigado! Ao meu Coorientador Carlos Montez, outra pessoa incrível. Muito obrigado por aceitar o convite e por suas contribuições. Ao meu Supervisor na FEUP em Portugal, Francisco Vasques pela sua generosidade, apoio e contribuições. Ao colega professor Erico Leão da UFPI por sua contribuição significativa nos experimentos simulados. Vocês são parceiros incríveis!

À UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas pela oportunidade.

À UNESC (Universidade do Extremo Sul Catarinense), por permitir os afastamentos necessários para conclusão deste doutorado. Aos colegas do Curso de

Ciência da Computação e do Departamento de Tecnologia da Informação pela compreensão e apoio na minha ausência.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro para a realização de parte deste curso no exterior, no formato de doutorado sanduíche.

À FEUP (Faculdade de Engenharia do Porto/Portugal) pela oportunidade de intercâmbio.

Enfim, a todos que contribuíram de uma forma ou de outra para esta conquista, meu muito obrigado! Tudo está justo e perfeito! Deus abençoe a todos!

Não são os salões de mármore que dão a grandeza intelectual, mas sim a alma e o cérebro de um investigador.

Alexander Fleming

## RESUMO

Nos últimos anos, há uma notável expansão do uso das redes de sensores sem fio (RSSF). Entre as aplicações mais comuns destacam-se aquelas relacionadas com as áreas médica, militar, agricultura, meio ambiente e, mais recentemente, na automação industrial. Esta tese aborda, principalmente, as RSSFs aplicadas à saúde. A principal motivação é que diversos desafios tecnológicos precisam ser superados nesta área, os quais são muito similares aos encontrados na automação industrial. Dentre eles destacam-se: estruturação da rede e distribuição dos nodos, a construção de dispositivos eficientes, compactos, multifuncionais e baratos, a escalabilidade, além de tolerância a falhas e o consumo de energia. Além disso, outro importante aspecto está relacionado com a mobilidade, pois implica na utilização de comunicação multiponto e na troca de pontos de acessos (*handoff*) sem perda da qualidade de comunicação exigida pela aplicação. Estas questões abrem possibilidades de pesquisa sobre novas arquiteturas e protocolos de comunicação. Dentro deste contexto, esta tese está focada em fornecer uma arquitetura de comunicação baseada no padrão IEEE 802.15.4 que suporte a comunicação de nodos móveis em ambientes abertos, e que contemple requisitos de qualidade de serviço para, por exemplo, aplicações de monitoramento e supervisão de pacientes em reabilitação. Este trabalho tem o objetivo de implementar melhorias no mecanismo de *handoff* do padrão IEEE 802.15.4, possibilitando a livre movimentação de nodos móveis em uma determinada área enquanto, por exemplo, os sinais fisiológicos de pacientes são monitorados. Avaliações demonstram que o uso de novas estratégias de associação, bem como, uma adequada configuração de parâmetros da rede, melhoram significativamente a sua eficiência. As principais contribuições desta tese são: uma revisão sistemática da literatura sobre reabilitação de pacientes e as tecnologias de comunicação; um estudo e avaliação experimental sobre interferência entre redes sem fio; uma proposta de uma arquitetura para monitoramento de dados fisiológicos baseada no padrão IEEE 802.15.4; o desenvolvimento de um protótipo de eletromiógrafo sem fio e uma aplicação de monitoramento; uma revisão sistemática da literatura sobre o *handoff* e a proposição de melhorias no mecanismo de associação e na configuração adequada de parâmetros do mecanismo CSMA/CA.

**Palavras-chave:** RSSF. Redes Corporais. IEEE 802.15.4. Fisioterapia.

## ABSTRACT

In recent years, there has been a notable expansion of the use of wireless sensor networks (WSNs). Among the most common applications are those related to the medical, military, agriculture, environment and, more recently, industrial automation. This doctoral thesis mainly addresses the WSNs applied to healthcare. The main motivation is that several technological challenges need to be overcome in this area which are very similar to those found in industrial automation. These include: network structuring and node distribution, design of efficient, compact, multifunctional and inexpensive devices, scalability, routing, fault tolerance, and energy consumption. In addition, another important aspect is related to patient mobility, since it implies the use of multi-hop communication and the change of handoff points without loss of communication quality demanded by the application. These issues open up possibilities for research on new architectures and communication protocols. Within this context, this thesis focuses on providing a communication architecture based on the IEEE 802.15.4 standard that supports the communication of mobile nodes in open environments, and which contemplates the quality of service requirements, for example, on monitoring and supervision applications of patients in rehabilitation process. This work aims to implement improvements in the handoff mechanism of the IEEE 802.15.4 standard, which allow the free movement of mobile nodes in a given coverage area of the network, while, for example, the physiological patient signals are monitored. Experimental and simulation experiments demonstrate that the use of new association strategies as well as an adequate setup of network parameters significantly improve their efficiency. The main contributions of this thesis are: a systematic review of the literature on patient rehabilitation and communication technologies; an experimental study and evaluation on interference between wireless networks; a proposal and experimental validation of an architecture for the monitoring of physiological data based on the IEEE 802.15.4 standard; the development of a wireless equipment of electromyography prototype and a signal monitoring application; a systematic review of the handoff literature and the proposition of improvements in the mechanism of association and an adequate configuration of CSMA/CA mechanism parameters.

**Keywords:** WSN. WBAN. IEEE 802.15.4. Physiotherapy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Supervisão de Reabilitação e Monitoramento. ....	27
Figura 2 – Arquitetura WBAN. ....	28
Figura 3 – Topologias estrela e ponto a ponto. ....	49
Figura 4 – Topologia de agrupamento em árvore. ....	50
Figura 5 – Arquitetura de um dispositivo LR-WPAN. ....	51
Figura 6 – Canais IEEE 802.15.4 em ISM. ....	52
Figura 7 – Estrutura do superquadro. ....	55
Figura 8 – Sequência de mensagens para associação. ....	57
Figura 9 – Sequência de mensagens para associação FastA. ....	60
Figura 10 – Frequência dos canais. ....	65
Figura 11 – FHSS de 2 e 4 níveis. ....	66
Figura 12 – DSSS com DBPSK e DQPSK. ....	67
Figura 13 – OFDM com modulação 16-QAM. ....	68
Figura 14 – AFH na presença de Wi-Fi. ....	70
Figura 15 – Cenário de Testes. ....	85
Figura 16 – Taxa de Perda de Pacotes. ....	88
Figura 17 – Taxa de perda dos nodos z1 e z6. ....	89
Figura 18 – Atraso fim-a-fim. ....	90
Figura 19 – Potência do sinal recebido. ....	90
Figura 20– Arquitetura <i>multi-hop</i> para WBAN. ....	96
Figura 21 – Cenário de testes. ....	99
Figura 22 – Um nodo emissor. ....	101
Figura 23 – Avaliação de RSSI. ....	109
Figura 24 – Taxonomia de classificação dos mecanismos. ....	113
Figura 25 – Escalonamento <i>bottom-up</i> . ....	131
Figura 26 – Velocidade do nodo móvel. ....	134
Figura 27 – Associação antecipada. ....	136
Figura 28 – Cenário de comunicação. ....	140
Figura 29 – Taxa média de pacotes recebidos. ....	146
Figura 30 – Tempo médio de nodos móveis desconectados. ....	148
Figura 31 – Atraso fim-a-fim. ....	149

Figura 32 – Taxa média de pacotes recebidos.....	150
Figura 33 – Tempo médio de nodos móveis desconectados.....	151
Figura 34 – Atraso fim-a-fim. ....	152
Figura 35 – Evolução da eletromiografia. ....	179
Figura 36 – Protótipo do EMG sem fio.....	180
Figura 37 – Aplicação de eletromiografia sem fio. ....	181
Figura 38 – Monitoramento de EMG sem fio. ....	182
Figura 39 – Experimento comparativo entre os eletromiógrafos. ....	183

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Síntese da RSL.....	44
Tabela 2 – Parâmetros da Camada Física LR-WPAN.....	53
Tabela 3 – Comparativo dos padrões IEEE 802.11.....	64
Tabela 4 – Classes de Potência. ....	70
Tabela 5 – Parâmetros da Rede IEEE 802.15.4.....	86
Tabela 6 – Parâmetros da Rede IEEE 802.11n.....	87
Tabela 7 – Canais sobrepostos e não sobrepostos.....	91
Tabela 8 – Parâmetros da Rede IEEE 802.15.4.....	100
Tabela 9 – Três nodos emissores.....	102
Tabela 10 – Resultados da revisão sistemática. ....	127
Tabela 11 – Exemplo de cálculo de SD e SO.....	142
Tabela 12 – Intervalo de ativação dos nodos móveis.....	144
Tabela 13 – Parâmetros de configuração da rede.....	145
Tabela 14 – Resultado do procedimento de seleção de fontes.....	174
Tabela 15 – Resultado da Busca nas Fontes.....	177

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G/4G/5G	Geração de Telefonia Móvel
6LoWPAN	IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks
ACK	Acknowledgment
AP	Access Point
AVC	Acidente Vascular Cerebral
BER	Bit Error Rate
BI	Beacon Interval
BO	Beacon Order
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Contention-Free Period
CH	Cluster Head
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CPS	Cyber-Physical System
ECG	Eletrocardiograma
ED	Energy Detection
EEG	Eletroencefalograma
EMG	Eletromiografia
FFD	Full-Function Device
FQDA	Fuzzy Quantitative Decision Algorithm
GPRS	General Packet Radio Services
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GSR	Galvanic Skin Response
GTS	Guaranteed Time Slot
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IOT	Internet of Things
ISM	Industrial Scientific and Medical
LQI	Link Quality Indicator
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad hoc Network

MICROSD	Micro San Disk
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
NM	Nodo móvel
NSF	National Scientific Foundation
OMNET++	Simulador
PAN	Personal Area Networks
PER	Packet Error Rate
PHY	Camada Física de Protocolo
POS	Personal Operation Space
PS	Personal Server
QOS	Quality-of-Service
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced-Function Device
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SBC	Sociedade Brasileira de Computação
SD	Superframe Duration
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SO	Superframe Order
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra-Wide Band
VANT	Veículo Aéreo não tripulado
WBAN	Wireless Body Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WOT	Web of Things
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1	INTRODUÇÃO.....	21
1.2	CONTEXTO DA PESQUISA .....	26
1.3	PROBLEMA E JUSTIFICATIVA .....	30
1.4	OBJETIVOS .....	33
<b>1.4.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>33</b>
<b>1.4.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>33</b>
1.5	CONTRIBUIÇÕES DA TESE .....	34
1.6	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	35
<b>2</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS .....</b>	<b>37</b>
2.1	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA (RSL) .....	37
2.2	RSL SOBRE APLICAÇÕES DE REABILITAÇÃO DE PACIENTES .....	38
<b>2.2.1</b>	<b>Formulação das Questões .....</b>	<b>38</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Perguntas da Pesquisa .....</b>	<b>38</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Plano de Extração.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Análise dos Dados.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Síntese da RSL.....</b>	<b>43</b>
2.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	45
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>46</b>
3.1	APRESENTAÇÃO .....	46
3.2	REDES DE SENSORES SEM FIO.....	46
3.3	O PADRÃO IEEE 802.15.4.....	48
<b>3.3.1</b>	<b>Topologias .....</b>	<b>49</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Arquitetura .....</b>	<b>50</b>
3.3.2.1	A Camada Física .....	51
3.3.2.2	A subcamada de Controle de acesso ao Meio .....	53

<b>3.3.3</b>	<b>Acesso ao canal.....</b>	<b>54</b>
<b>3.3.4</b>	<b>O Protocolo CSMA/CA .....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.5</b>	<b>O mecanismo de associação.....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.6</b>	<b>O mecanismo de desassociação.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3.7</b>	<b>O adendo IEEE 802.15.4e .....</b>	<b>60</b>
3.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	61
<b>4</b>	<b>INTERFERÊNCIA ENTRE REDES SEM FIO .....</b>	<b>62</b>
4.1	APRESENTAÇÃO .....	62
4.2	PADRÕES DE REDES SEM FIO .....	62
<b>4.2.1</b>	<b>Os Padrões IEEE 802.11 WLAN .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Os Padrões IEEE 802.15 WPAN.....</b>	<b>68</b>
4.2.2.1	O Padrão IEEE 802.15.1 .....	69
4.2.2.2	O Padrão IEEE 802.15.3 (HR-WPAN).....	71
4.2.2.3	O Padrão IEEE 802.15.6 (WBAN).....	72
4.3	COEXISTÊNCIA ENTRE PADRÕES DE REDES SEM FIO .....	74
4.4	TRABALHOS CORRELATOS .....	76
4.5	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.....	83
<b>4.5.1</b>	<b>Cenário .....</b>	<b>84</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>87</b>
4.5.2.1	Redes IEEE 802.15.4 em ambiente livre de interferência .....	87
4.5.2.2	Redes IEEE 802.15.4 em canal sobreposto .....	88
4.5.2.3	Redes IEEE 802.15.4 em canal não sobreposto .....	91
4.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	91
<b>5</b>	<b>ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO E TESTES.....</b>	<b>94</b>
5.1	APRESENTAÇÃO .....	94
5.2	TRABALHOS RELACIONADOS.....	94
5.3	ARQUITETURA MULTI-HOP PARA WBANs .....	96

5.4	EXPERIMENTOS PRÁTICOS .....	98
<b>5.4.1</b>	<b>Cenário .....</b>	<b>98</b>
5.4.1.1	Avaliação da taxa de transmissão .....	99
5.4.1.2	Cenário com um nodo emissor .....	101
5.4.1.3	Cenário com três nodos emissores .....	102
<b>5.4.2</b>	<b>Avaliação do processo de associação .....</b>	<b>103</b>
5.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	105
<b>6</b>	<b>MELHORIAS NO MECANISMO DE ASSOCIAÇÃO .....</b>	<b>108</b>
6.1	APRESENTAÇÃO .....	108
6.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	108
6.3	ESTADO DA ARTE .....	110
<b>6.3.1</b>	<b>Análise dos dados .....</b>	<b>110</b>
6.3.1.1	Alterações no processo de associação .....	113
6.3.1.2	CrITÉRIOS de seleção do coordenador mais adequado.....	118
6.3.1.3	Melhoria na conectividade entre o nodo e o coordenador .....	124
<b>6.3.2</b>	<b>SÍntese da RSL.....</b>	<b>126</b>
6.4	ESQUEMA PROPOSTO .....	129
<b>6.4.1</b>	<b>Formação da Rede.....</b>	<b>130</b>
6.4.1.1	Escalonamento .....	130
6.4.1.2	Tamanho do Intervalo de <i>Beacon</i> .....	131
6.4.1.3	Tamanho de <i>Buffers</i> .....	132
6.4.1.4	Alocação de superframe durations (SD).....	133
<b>6.4.2</b>	<b>Movimento do nodo.....</b>	<b>134</b>
<b>6.4.3</b>	<b>Antecipação da decisão de <i>handover</i>.....</b>	<b>135</b>
<b>6.4.4</b>	<b>Seleção adequada de parâmetros do CSMA/CA.....</b>	<b>137</b>
6.5	AVALIAÇÃO DA PROPOSTA .....	140
<b>6.5.1</b>	<b>Modelo da Rede .....</b>	<b>140</b>

<b>6.5.2</b>	<b>Análise Numérica.....</b>	<b>141</b>
<b>6.5.3</b>	<b>Simulação.....</b>	<b>143</b>
6.5.3.1	Cenário com velocidade de nodos de 1,4 m/s.....	146
6.5.3.2	Cenário com velocidade de nodos de 5 m/s.....	150
6.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	152
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>154</b>
7.1	REVISÃO DOS OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES.....	154
7.2	VISÃO GERAL DA PESQUISA .....	154
<b>7.2.1</b>	<b>Principais Contribuições .....</b>	<b>156</b>
7.3	TRABALHOS FUTUROS.....	157
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>159</b>
	<b>APÊNDICE A – Protocolo de busca sobre Reabilitação.....</b>	<b>172</b>
	<b>APÊNDICE B – Protocolo de busca sobre <i>Handover</i> .....</b>	<b>175</b>
	<b>APÊNDICE C – Protótipo de Eletromiógrafo sem fio.....</b>	<b>178</b>



## 1 APRESENTAÇÃO

Esta tese contribui para o avanço do estado da arte dos mecanismos de comunicação sem fio. Mais especificamente, entre as principais contribuições é apresentada uma proposta para a melhoria da mobilidade das redes de sensores sem fio. A pesquisa nesta tese foi desenvolvida em torno dos problemas de monitoramento automatizado de grandezas fisiológicas em seres humanos. Há inúmeras aplicações nesse campo de pesquisa, porém, optou-se por escolher aplicações relacionadas com o monitoramento de atletas ou pacientes em reabilitação devido aos desafios impostos por esse tipo de aplicação. Este capítulo apresenta uma introdução ao contexto de pesquisa desta tese, bem como os principais problemas tratados e os seus objetivos. As principais contribuições desse trabalho de pesquisa também são apresentadas.

### 1.1 INTRODUÇÃO

Muito se tem discutido e pesquisado na comunidade acadêmica sobre o emprego da computação móvel e ubíqua. A computação ubíqua e/ou pervasiva é considerada por muitos como o novo paradigma da computação para o século XXI que permitirá a união do mundo físico com o mundo da informação, gerando uma enorme gama de novas aplicações, protocolos e serviços, permitindo aos usuários interagir com objetos, máquinas, dados e aplicações de forma transparente em qualquer lugar a qualquer momento. O conceito de computação ubíqua introduzido por (WEISER, 1999) já era apontado pela NSF (*National Science Foundation*) como um dos grandes desafios da pesquisa em computação, conforme o relatório “Grandes Desafios da Pesquisa em Computação no Brasil 2006-2016” (SBC, 2006).

Dentre esses grandes desafios estava o desenvolvimento tecnológico de qualidade a partir de sistemas disponíveis, corretos, seguros, escaláveis, persistentes e ubíquos. A ideia de Weiser era a mudança do paradigma “um computador, muitas pessoas”, para “uma pessoa, muitos computadores”. A computação móvel explora a conectividade de dispositivos que se movem em torno do mundo físico e a

computação ubíqua explora a integração crescente de dispositivos computacionais com o mundo físico.

A computação ubíqua e móvel se expandiu devido à miniaturização e a conectividade sem fio. Se esta ubiquidade proporciona mais conforto e naturalidade nesta interação, também acarreta em problemas e, portanto, em novos desafios. Os sistemas precisam estar sempre disponíveis e não apresentarem falha, funcionando da forma prevista, serem escaláveis e seguros. A partir destas constatações abrem-se oportunidades de pesquisas relacionadas a arquitetura, modelos, protocolos, técnicas, dispositivos e padrões para o desenvolvimento de hardware de baixo custo, eficientes e multifuncionais além de uma inúmera quantidade de aplicações (BARBOSA, 2015).

Neste contexto, surgiram novas tendências que estão influenciando as tecnologias de automação, que são a Internet das Coisas (IoT: *Internet of Things*), os Sistemas Cyber-Físicos (CPS: *Cyber-Physical System*) e a Internet tátil. Esses conceitos não são inteiramente novos e surgiram no contexto das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) há vários anos. Porém, eles estão penetrando, recentemente, nos processos de automação e mudando a forma de se olhar para esses sistemas. A aplicação das ideias de CPS e IoT nesta área conduz para a definição do conceito de Indústria 4.0, onde 4.0 refere-se à quarta revolução industrial possibilitada pelas tecnologias da Internet para criar produtos inteligentes, uma produção inteligente e serviços inteligentes (WOLLSCHLAEGGER; SAUTER; JASPERNEITE, 2017). Esse termo foi criado, originalmente, na Alemanha, mas, rapidamente se tornou um chavão em escala global (DRATH; HORCH, 2014).

Para que a execução de tarefas em um ambiente de computação ubíqua seja feita de forma adequada, é necessário ter informações de contexto como, por exemplo, a localização dos dados e eventos relacionados com a aplicação em questão. Nesse caso, a partir da localização física de dados e eventos, é possível tratar o contexto. Na computação ubíqua, informações sobre o contexto devem ser obtidas por elementos sensores incorporados em dispositivos inteligentes e baratos, disponibilizados em larga escala, e interconectados pela Internet sem a utilização de fios.

Estudos recentes apontam que dentro de alguns anos haverá bilhões de dispositivos conectados à Internet, formando o que está sendo chamado de Web das

Coisas (WoT: *Web of Things*), quando os dispositivos que formam a IoT também estarão disponíveis na *World Wide Web* (BOTTA; DE DONATO; PERSICO; PESCAPÉ, 2016). A efetiva implantação da Indústria 4.0 e da WoT depende, entre outras coisas, do desenvolvimento das redes 5G, que é uma geração de redes que combinará as comunicações com e sem fios de provedores de acessos públicos e privados (AKPAKWU; SILVA; HANCKE; ABU-MAHFOUZ, 2018).

Da perspectiva dos sistemas de comunicação, a IoT e os CPSs dependem amplamente das redes de telecomunicações. Para lidar com a diversidade de sistemas de IoT sem fio, a tecnologia 5G precisará integrar diferentes tecnologias de redes, garantindo o mesmo nível de qualidade de serviço (QoS) oferecido pelas tecnologias com fio (CHANDRAMOULI; LIEBHART; PIRSKANEN, 2019). Nesse contexto, diversas tecnologias de redes sem fio estão sendo abordadas; então é provável que num futuro próximo, a ampla disponibilidade de soluções de redes sem fios irá também gerar um ou mais padrões *de facto* para comunicação sem fios, para os quais o conjunto de protocolos normatizados IEEE 802.11 (IEEE 802.11, 2012) e IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4, 2011) são os principais candidatos.

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) é normalmente constituída por um grande número de dispositivos sem fios de baixo custo e distribuídos ao longo de uma determinada área de interesse. RSSFs são sistemas distribuídos complexos, onde os nodos se comunicam com um nodo central (topologias estrela), diretamente entre si (topologia *ad hoc*), ou através de múltiplos saltos dentro da rede (topologias *mesh* e *cluster tree*). No caso da topologia *mesh*, cada nodo desempenha o papel de um roteador.

Nas RSSF, usualmente os dispositivos são de pequenas dimensões, com restrições de energia e menos confiáveis, podendo ser móveis, interagir com o ambiente físico, coletar, processar e possivelmente armazenar informações (LI; WANG; SUN; YANG *et al.*, 2014; SHUE; CONRAD, 2013; YETGIN; CHEUNG; EL-HAJJAR; HANZO, 2017).

Entre as aplicações mais comuns de RSSFs destacam-se aquelas relacionadas com as áreas médica, militar, agricultura, meio ambiente, indústria e segurança. Como exemplo, uma aplicação da área médica pode ser capaz de

monitorar os dados fisiológicos de um paciente e transmiti-los por uma RSSF para uma enfermeira ou médico, possibilitando, além do conforto para o paciente que fica livre de fios, o monitoramento remoto de diversos pacientes e suas condições de saúde em qualquer lugar a qualquer hora (WAGNER; KUCH; CABRERA; ENOKSSON *et al.*, 2012).

Outras aplicações típicas estão relacionadas com monitoramento de florestas, indústrias químicas, rios e oceanos, propriedades, estruturas físicas, poluição, trânsito, etc. No entanto, o pleno desenvolvimento destas aplicações depende da superação de muitos desafios, nomeadamente: como estruturar a rede; distribuir os nodos; construir dispositivos eficientes, compactos, multifuncionais e baratos; escalar o sistema, rotear os pacotes de dados; além de questões relacionadas com a qualidade de serviço, tolerância a falhas, consumo de energia, tecnologia de comunicação e às questões de segurança (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Especificamente na área da saúde, diversos esforços vêm sendo realizados nas últimas décadas para uso de sensores no monitoramento e reabilitação de pacientes com alguma doença ou limitação (PATEL; WANG, 2010). Uma das características mais importantes no uso de tecnologias de comunicação e informação na saúde (*e-health*) é a garantia que os dados dos pacientes estejam disponíveis para os profissionais da saúde sem limitações de tempo e localização, o que torna o sistema pervasivo (MAJEDI; NAEEM; ANPALAGAN, 2016).

Em termos gerais, muitas das aplicações de monitoramento na área da saúde podem ser consideradas como uma classe dos sistemas de automação industrial, ou seja, são aplicações de comunicação crítica, as quais, conforme apontado por BELLO; ÅKERBERG; GIDLUND e UHLEMANN (2017), se caracterizam por requererem alta confiabilidade. Neste contexto, confiabilidade significa que os dados devem ser transmitidos com uma alta probabilidade de sucesso e, principalmente, cumprindo suas metas temporais (*deadlines*). A não observância da confiabilidade, imposta pelas características da aplicação, pode resultar em sérios danos aos sistemas, variando desde perdas financeiras até de vidas humanas.

Ainda no contexto das aplicações na área de saúde, as redes de área corporal sem fio WBAN (*Wireless Body Area Network*) emergiram como um novo ramo das RSSF. Esta tendência é derivada do crescente desenvolvimento de sensores biométricos vestíveis ou implantados, e a redução dos seus custos. Uma WBAN

geralmente consiste de uma série de nodos sensores de tamanho reduzido colocados externamente ou implantados no corpo humano. Cada nodo é capaz de detectar, amostrar, processar e transmitir um ou mais parâmetros fisiológicos, tais como batimentos cardíacos, pressão sanguínea e saturação de oxigênio ou parâmetros do ambiente como localização, temperatura, umidade, vibração e luz (NASSER; YUNFENG, 2010).

Por exemplo, um paciente pode ter diversos sensores em seu corpo formando uma WBAN, os quais são capazes de monitorar suas condições de saúde através da coleta e envio de informações de contexto, tais como: umidade, temperatura e trajetória de sua movimentação. Esta WBAN ainda poderia se comunicar através de um *gateway* com outras redes para transmitir os dados para médicos, enfermeiras ou hospitais, ou mesmo proporcionar um *feedback* para o próprio paciente em seu dispositivo móvel. Dessa forma, a qualquer sinal de emergência, essa aplicação é capaz de prover uma ação automática que pode ser tomada para remediar ou comunicar esta condição. Adicionalmente, imagens captadas do ambiente também podem ser enviadas para médicos ou enfermeiros, entre outras ações (ALEMDAR; ERSOY, 2010).

No desenvolvimento deste trabalho, ficará evidente que, apesar de muitos protocolos e algoritmos terem sido propostos e desenvolvidos para as tradicionais RSSF, a grande maioria deles não atende as especificidades e requisitos das aplicações de WBAN tais como: distribuição e densidade de sensores, taxa de dados, latência, mobilidade, flexibilidade, eficiência e interferência (CHEN; GONZALEZ; VASILAKOS; CAO *et al.*, 2011). Protocolos para RSSF normalmente consideram redes formadas por sensores homogêneos, porém uma WBAN se compõe de dispositivos heterogêneos ao redor ou implantados no corpo humano, cada um com fluxo de dados com taxas variáveis, atraso e tolerância a perda de pacotes diferentes. Em muitos casos, uma rede RSSF é considerada estática, em contraste com as WBANs que permitem mobilidade e possuem rígidas restrições de tempo real. As RSSFs não consideram as questões inerentes ao uso de dispositivos muito próximos ao corpo humano ou dentro dele, e que são relevantes para aplicações na área da saúde (MOVASSAGHI; ARAB; ABOLHASAN, 2012). Essas redes também não

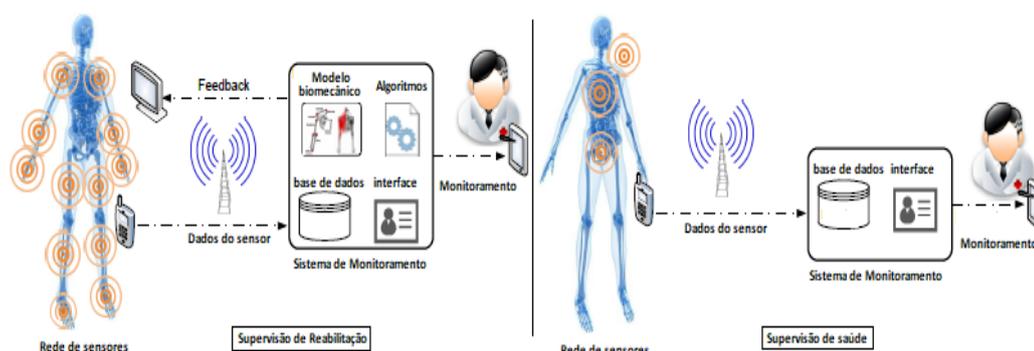
suportam a combinação entre confiabilidade, qualidade de serviço (ex. garantia da entrega de mensagens de emergência), baixa potência, alta taxa de dados, vida útil das baterias e prevenção contra interferências, necessárias para atender amplamente as aplicações em rede de área corporal (HAYAJNEH; ALMASHAQBEH; ULLAH; VASILAKOS, 2014). Embora os desafios enfrentados pelas redes WBAN sejam, em muitos aspectos, semelhantes aos das RSSF, existem diferenças e características intrínsecas que demandam novas pesquisas para o desenvolvimento de arquiteturas e protocolos de comunicação adaptados ao corpo humano (HONEINE; MOURAD; KALLAS; SNOUSSI *et al.*, 2011).

## 1.2 CONTEXTO DA PESQUISA

As comunicações sem fio estão se tornando importantes para os sistemas de automação industrial. Apesar do meio sem fio apresentar novos desafios, os problemas se assemelham parcialmente aos enfrentados pelos sistemas de comunicação por barramento, utilizados antes do uso da rede por comutação de pacotes, quando os *fieldbuses* compartilhavam o meio físico (BELLO; ÅKERBERG; GIDLUND; UHLEMANN, 2017).

Portanto, diversos desafios precisam ser superados antes de substituir os atuais sistemas de comunicação cabeados. Para contextualizar a pesquisa realizada nesta tese será utilizada como exemplo a supervisão de reabilitação, que é um caso específico de monitoramento de saúde. Reabilitação é uma terapia na qual o paciente realiza diversos exercícios físicos e atividades para alcançar um nível de funcionalidade corporal que permita a ele retomar a capacidade motora após um acidente, doença ou cirurgia (HADJIDJ; SOUIL; BOUABDALLAH; CHALLAL *et al.*, 2013). Profissionais da área de saúde precisam constantemente monitorar os exercícios de reabilitação realizados pelos pacientes, evitando movimentos inadequados que poderiam ocasionar lesões ou a piora do estado clínico. Isso implica em maior carga de trabalho para estes profissionais e um aumento de custo do tratamento. O uso de sensores para reabilitação reduz drasticamente o custo do sistema de supervisão e abre diversas oportunidades e desafios. A Figura 1 apresenta um comparativo entre um sistema de monitoramento de saúde e um sistema de supervisão de reabilitação.

Figura 1 – Supervisão de Reabilitação e Monitoramento.



Fonte: (HADJIDJ; SOUIL; BOUABDALLAH; CHALLAL *et al.*, 2013).

Uma RSSF para supervisão de reabilitação pode parecer um caso especial de supervisão de cuidados de saúde. No entanto, as RSSFs tradicionais para cuidados de saúde não abordam algumas especificidades associadas à reabilitação. Em aplicações médicas típicas de RSSF, um único nodo sensor é usado para cada parâmetro vital. Além disso, a posição dos sensores não tem uma importância primordial e pode ser escolhida de forma aproximada. Como os membros do corpo humano são geralmente compostos por segmentos, são necessários vários nodos sensores para monitorar o mesmo membro durante uma reabilitação. Estes nodos são cuidadosamente colocados e localizados com precisão. Uma informação obtida em um sistema de monitoramento a partir de um único sensor difere de um sistema de supervisão de reabilitação, onde vários sensores precisam atuar de forma conjunta para obter dados sobre diversas características (aceleração, velocidade angular, ativação do músculo, posição, ângulo) do movimento de uma parte do corpo humano. Com vários nodos monitorando o mesmo membro, informações de um nodo tornam-se altamente correlacionadas com as informações dos outros nodos. Para produzir uma informação clínica, torna-se necessário combinar informações dos diferentes nodos sensores.

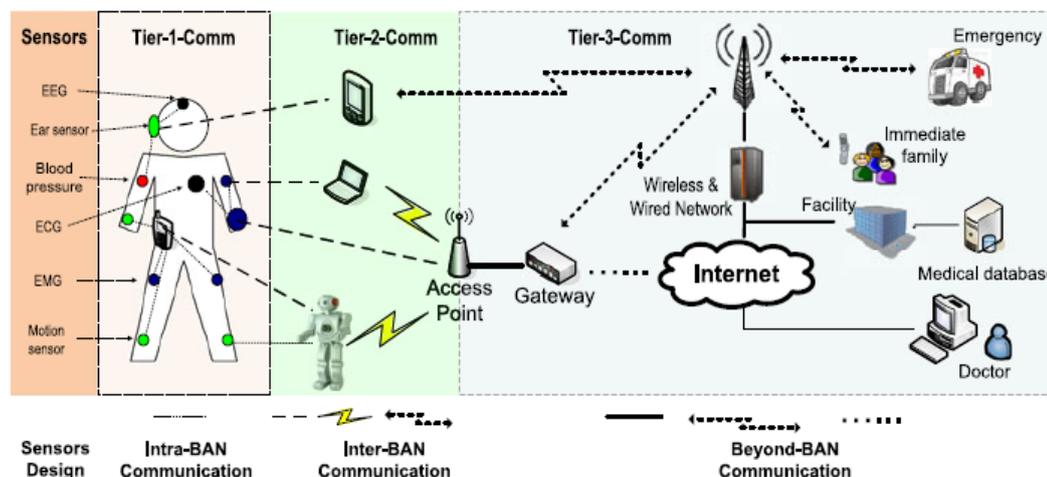
Outra diferença fundamental é a disponibilização de um *feedback* para o paciente em tempo real. Em um sistema de monitoramento, os dados provenientes dos sensores são disponibilizados aos profissionais de saúde em tempo real; enquanto que em um sistema de supervisão de reabilitação, as informações estão

disponíveis tanto para pacientes como para os profissionais de saúde. Por um lado, os médicos avaliam o progresso do paciente e podem ajustar a terapia. Por outro lado, os dados são processados e fornecidos como *feedback* para o paciente permitindo que ele ajuste seus movimentos em tempo real (HADJIDJ; SOUIL; BOUABDALLAH; CHALLAL *et al.*, 2013).

Portanto, em uma aplicação de RSSF para supervisão de reabilitação, a diversificação de sensores, a fusão de dados de múltiplos sensores e o *feedback* em tempo real para pacientes são exemplos de características que tornam essas redes uma área de pesquisa emergente com impactos no desenvolvimento de *hardware*, *software*, protocolos de comunicação e no projeto da arquitetura como um todo.

A Figura 2 apresenta uma arquitetura típica para WBAN proposta por CHEN; GONZALEZ; VASILAKOS; CAO *et al.* (2011), que consiste de três camadas de comunicação, nomeadamente: Intra-BAN, Inter-BAN e Além-BAN.

Figura 2 – Arquitetura WBAN.



Fonte: (CHEN; GONZALEZ; VASILAKOS; CAO *et al.*, 2011).

A arquitetura ilustrada na Figura 2, apesar de utilizar tecnologia sem fios para o monitoramento, apresenta uma mobilidade limitada, principalmente porque a segunda camada propõe uma comunicação com apenas um salto (*single-hop*). Portanto, nessa arquitetura quem está sendo monitorado deve estar sempre na área de alcance do seu ponto de acesso. Um típico exemplo de produto comercial baseado, parcialmente nesta arquitetura, é o eletromiógrafo EMG *Trigno Wireless* desenvolvido

pela empresa DELSYS<sup>1</sup>, que realiza eletromiografia sem fio com aquisição de dados em 8 ou 16 canais. Apesar deste equipamento apresentar um grande avanço para este tipo de exame, a sua realização continua limitada ao ambiente do consultório ou laboratório ou há a necessidade de levar o sistema de monitoramento para um ambiente externo, porém com uma mobilidade limitada ao alcance de poucos metros.

Em aplicações relacionadas com a áreas de fisioterapia ou de esportes, um dos principais desafios na implementação de WBANs está na mobilidade, pois implica em troca dinâmica de ponto de acesso (AP: *Access Point*) sem perda de conexão com a rede, o que requer o uso de mecanismos de associação, re-associação e comunicação por múltiplos saltos (*multi-hop*). Isto significa que os nodos ou o coordenador da rede devem avaliar o momento de desassociação de um AP para conexão com o mais próximo ou aquele que oferecer melhor sinal. Este processo de avaliação e mudança de AP é conhecido como *handover* (CALDEIRA; RODRIGUES; LORENZ; ULLAH, 2015).

Um exame de eletromiografia pode ser citado como um exemplo de aplicação. Eletromiografia é um método de registro dos potenciais elétricos gerados nas fibras musculares durante sua contração e relaxamento. Na biomecânica, o registro da atividade eletromiográfica permite a investigação de quais músculos são utilizados em determinado movimento, o nível de ativação muscular durante a execução do movimento, a intensidade e duração do esforço muscular, além de possibilitar inferências relativas à fadiga muscular (RAEZ; HUSSAIN; MOHD-YASIN, 2006).

Com a efetiva adição de mobilidade nas aplicações de WBAN, diversos desafios se apresentam. Entre eles pode-se citar a transmissão de dados a longa distância com múltiplos saltos, atendendo ao mesmo tempo às diferentes taxas de amostragem dos sinais fisiológicos. Diante deste cenário, faz-se necessário avaliar se as tecnologias e padrões atualmente disponíveis para WBAN/RSSF suportam essas taxas de amostragem quando múltiplos saltos são utilizados. É importante observar que os desafios apresentados são similares aos da área de automação industrial, onde o paciente/atleta pode ser considerado um nodo móvel que está monitorando

---

<sup>1</sup> <http://www.delsys.com/products/wireless-emg/>

e/ou controlando processos. Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos.

### 1.3 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

A qualidade de serviço (QoS: *Quality of Service*) em uma rede pode ser definida como a capacidade de prover tratamento diferenciado a fluxos ou classes de tráfego com características e requisitos diferentes, e providenciar diferentes níveis de garantia de entrega de forma consistente e previsível (XIA, 2008). Quando as redes sem fio são utilizadas em aplicações críticas, como no monitoramento de pacientes, deve-se garantir os seus requisitos de QoS. Ainda segundo XIA (2008), os principais parâmetros de QoS de comunicação são latência, vazão, variação dos atrasos e taxa de perdas de pacotes. Em redes corporais, é muito comum os sensores serem heterogêneos, portanto, o suporte à QoS pode ser bastante desafiador (MACWAN; GONDALIYA; RAJA, 2016).

As aplicações, incluindo as da área da saúde, precisam respeitar determinados requisitos de QoS dependendo do tipo de informação obtida a partir dos sensores, ou seja, para cada tipo de dado coletado, os requisitos podem ser diferentes. Por exemplo, dados de batimentos cardíacos têm restrições temporais mais rígidas que dados de temperatura corporal. Um dos maiores desafios neste contexto é a garantia de QoS para dados de sensores que possuem importâncias diferentes, onde um atraso poderia incorrer em consequências fatais aos pacientes (MAJEDI; NAEEM; ANPALAGAN, 2016). A infraestrutura da rede deve ser projetada para atender às características das aplicações tais como: comunicação em tempo real, privacidade, custo, mobilidade, posicionamento de nodos, qualidade de serviço, roteamento, *feedback*, propagação do sinal, sincronização e calibração (HADJIDJ; SOUIL; BOUABDALLAH; CHALLAL *et al.*, 2013). Além destas características, podem ser considerados outros desafios, como por exemplo, sensores podem ficar fora de operação e/ou novos sensores podem ser inseridos.

Para proporcionar mobilidade, conforto e motivação a pacientes em recuperação, as tecnologias de redes sem fio se apresentam como soluções de baixo custo que podem minimizar os problemas enfrentados pelo sistema de saúde, que possui demanda cada vez maior de pacientes, seja por doenças ou pelo crescimento

percentual do número de idosos na população que necessita de acompanhamento contínuo (NETO; JUNIOR; NEUMAN; CERQUEIRA, 2013). Essas características tornam este campo de pesquisa cada vez mais desafiador, abrindo oportunidades e desafios tecnológicos, que por sua vez podem causar um impacto social significativo na prestação de serviços na área de saúde à população em geral. Pretende-se responder, com o desenvolvimento deste trabalho, às seguintes questões evidenciadas nos problemas e desafios:

1. É possível atender os requisitos de monitoramento para reabilitação de pacientes com o uso de RSSFs operando em ambientes abertos?
2. Qual a infraestrutura de comunicação em rede necessária para atender às aplicações de reabilitação de pacientes que permita a mobilidade, conforto e respeite requisitos de restrições temporais e QoS?

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas sobre o uso de RSSF aplicada à saúde, no entanto, poucos trabalhos têm se preocupado com uma solução global para dezenas ou centenas de pacientes, cada um dos quais equipado com múltiplos nodos sensores (FILIPPE; FDEZ-RIVEROLA; COSTA; PEREIRA, 2015). A maioria dos trabalhos que associam tecnologia sem fio à saúde enfoca nas aplicações de monitoramento e no conceito da computação pervasiva. No entanto, invariavelmente os trabalhos são conduzidos a partir de uma aplicação ou um conjunto limitado de aplicações (MAJEDI; NAEEM; ANPALAGAN, 2016). A diversidade de possibilidades e aplicações especialmente na área de saúde (monitoramento de sinais vitais, distribuição automática de medicação e reabilitação), e em outras áreas como entretenimento, treinamento esportivo e militar ou ambientes inteligentes, estabelecem um novo conjunto de requisitos com métricas de QoS diferenciadas, sendo portanto necessário o desenvolvimento de arquiteturas mais flexíveis (CAVALLARI; MARTELLI; ROSINI; BURATTI *et al.*, 2014). KATHURIA e GAMBHIR (2014), afirmam que sensores heterogêneos implicam no desenvolvimento de arquiteturas flexíveis que atendam minimamente estes requisitos.

Um dos principais desafios científicos nestas últimas décadas é decorrente do contínuo aumento da população de idosos. KINSELLA e PHILLIPS (2005), já estimavam que, para os 20 anos seguintes, a população com 65 anos ou mais nos países desenvolvidos seria quase 20% da população total. De acordo com as Nações Unidas, 13% dos americanos tinham 65 anos ou mais em 2007, e estima-se que até o ano 2050 um em cada cinco americanos terão 65 anos ou mais. O censo americano publicou que, em 2015 no Brasil, o percentual de pessoas com 65 anos ou mais seria entre 7% a 13,9% e em 2050 a estimativa seria entre 21 a 27,9% de pessoas nesta faixa etária<sup>2</sup>. Em 2001, 17% da população na União Europeia (UE) tinha 65 anos ou mais e estima-se que até o ano de 2050 este cenário terá atingido 35%. Dentro do âmbito mundial, teremos atingido 15% para os países em desenvolvimento e 26% para os países desenvolvidos. Daí a necessidade de prestação de serviços de qualidade para uma população crescente de idosos, no mínimo reduzindo os custos de saúde que é uma questão extremamente crítica (ALEMDAR; ERSOY, 2010). Com o rápido crescimento percentual da população idosa, as soluções envolvendo RSSF apresentam-se como essenciais para o monitoramento, acompanhamento e atendimento de qualidade na área de saúde (ABREU; MENDES, 2013).

Diante disso, a tecnologia aliada à saúde surge como uma grande oportunidade para reduzir custos, melhorar o atendimento, o socorro, a medicação, o acompanhamento, pós-operatório, reabilitação, entre outros cuidados médicos. Uma das vantagens é evitar o frequente deslocamento de pacientes a hospitais e postos de saúde que normalmente estão aquém da capacidade de atendimento, bem como proporcionam maior conforto e segurança para os pacientes.

O principal interesse científico desta tese é contribuir com a resolução de alguns dos problemas supracitados, e o seu foco principal está relacionado com o desenvolvimento de mecanismos de comunicação para aplicações em redes sem fio. As soluções propostas nesta tese podem ser aplicadas em sistemas de automação genéricos – ambientais, residenciais, prediais, industriais, hospitalares e; para ampla gama de aplicações civis e militares. Porém, no âmbito desta tese as aplicações serão testadas com foco na área de saúde – onde o objetivo será demonstrar que uma arquitetura flexível é adequada para o monitoramento de grandezas fisiológicas

---

<sup>2</sup>[https://www.census.gov/library/visualizations/2016/comm/cb16-54\\_aging\\_world.html](https://www.census.gov/library/visualizations/2016/comm/cb16-54_aging_world.html)

associadas a pacientes em processo de reabilitação. A principal razão de escolha dessa área de aplicação está relacionada com o impacto social da utilização de tecnologias na área de fisioterapia, pois, segundo dados do censo de 2010, aproximadamente 14,5% da população tem algum tipo de incapacidade física (ARAUJO; VALLONE; PERDIGÃO; AMARAL *et al.*, 2014). Além disso, as aplicações dessa área apresentam interessantes desafios em termos de requisitos de tempo real, que são similares aos encontrados nos sistemas de automação industrial.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é explorar as RSSFs com foco em saúde visando propor uma arquitetura de comunicação que seja adequada para o monitoramento de grandezas fisiológicas associadas a pacientes em processo de reabilitação.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

A seguir são apresentados os objetivos específicos desta tese:

1. Realizar uma revisão sistemática de trabalhos relacionados com o uso de redes de sensores sem fio aplicados à recuperação ou reabilitação de pacientes;
2. Pesquisar as aplicações típicas de RSSFs em saúde propostas para reabilitação de pacientes, bem como as tecnologias de comunicação e soluções empregadas;
3. Realizar um estudo sobre a coexistência de redes sem fio heterogêneas em ambientes abertos;
4. Propor uma arquitetura de comunicação para atender os principais requisitos de aplicações de monitoramento e reabilitação de pacientes com base em sensores heterogêneos;

5. Implementar uma RSSF, por meio de simulação ou experimento prático, em ambiente aberto que servirá para a rede corporal se comunicar com o ambiente externo, enquanto o paciente se desloca pela área atendida;
6. Verificar o tratamento dos dados a serem reportados quanto à qualidade de serviço, tendo em vista serem informações vitais;
7. Testar a disponibilidade e atendimento aos requisitos temporais da rede pelo fato de serem informações que se justificam pela rapidez com que são fornecidas;
8. Validar a arquitetura proposta com base em experimentos e simulações.

## 1.5 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Como contribuição principal desta tese, pretendeu-se, a partir de uma visão macro das aplicações mais comuns de RSSFs para reabilitação de pacientes, dimensionar e experimentar os limites da infraestrutura de rede de comunicação necessária para atender seus principais requisitos destas aplicações. As principais contribuições desta pesquisa são:

- Uma revisão sistemática da literatura que possibilita uma visão sobre o estado da arte das RSSFs aplicadas à reabilitação de pacientes com alguma doença ou mobilidade reduzida, evidenciando as aplicações e tecnologia utilizadas bem como as questões de pesquisa em aberto;
- Um estudo experimental sobre a interferência entre redes de comunicação padronizadas, avaliando o comportamento da rede de sensores sem fio sob interferência de outras redes existentes na mesma área;
- Uma proposta de arquitetura de comunicação de redes sem fio que atenda os principais requisitos das aplicações de reabilitação de pacientes;
- Um experimento de referência com o uso de tecnologias de RSSFs de forma ubíqua, que possibilite a mobilidade de pacientes em fase de reabilitação em ambientes abertos, proporcionando maior conforto, redução de custos, além da melhoria da qualidade de vida.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O restante deste documento está organizado da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta os trabalhos correlatos ao tema abordado nesta tese, ou seja, aplicações que envolvam a questão de reabilitação de pacientes e tecnologias de comunicação. O processo de seleção e análise dos trabalhos foi realizado através de uma revisão sistemática da literatura e o objetivo principal foi estabelecer as principais aplicações desta área, bem como as tecnologias de redes empregadas. No Capítulo 3 são introduzidas as principais tecnologias de comunicação utilizadas na área de saúde, com destaque às RSSF e WBAN. Neste capítulo aborda-se com mais profundidade o padrão IEEE 802.15.4, que foi a principal tecnologia de rede escolhida para avaliação e proposição de melhorias no contexto das aplicações na área da fisioterapia e principal foco das abordagens apresentadas nesta tese. Portanto, o objetivo deste capítulo é proporcionar uma visão sobre a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da tese. No Capítulo 4 é investigado o problema da interferência em redes heterogêneas, consistindo de uma abordagem sobre as camadas físicas dos principais protocolos de comunicação de redes sem fio, bem como sua coexistência. O objetivo do Capítulo é apresentar uma avaliação experimental da interferência das redes IEEE 802.11 sobre as redes IEEE 802.15.4.

No Capítulo 5 é descrita a arquitetura de comunicação proposta para o monitoramento de dados fisiológicos de pacientes utilizando RSSFs com nodos móveis. Para esta avaliação, foi escolhido um exame de eletromiografia como estudo de caso. O motivo de selecionar esta aplicação está relacionado com os seus requisitos de comunicação (alta taxa de transferência de dados). Foram realizados experimentos para verificar a possibilidade de a rede atender às taxas de transmissão de dados necessárias a este tipo de aplicação, bem como foi analisado o mecanismo de associação de nodos móveis no padrão IEEE 802.15.4.

Tendo em vista a análise experimental do Capítulo anterior, no Capítulo 6 é abordado o problema da associação de nodos móveis em redes de sensores sem fio, onde é destacado o estado da arte sobre os mecanismos de *handoff/handover*. É apresentada uma proposta de melhorias nos mecanismos de associação de nodos

móveis, na conectividade entre nodo e coordenador e nos critérios de seleção de coordenadores. Esta proposta baseia-se em um conjunto de estratégias, nomeadamente: antecipação da decisão de *handover* antes da perda de conectividade; utilização do mecanismo de associação melhorado do IEEE 802.15.4e; redução da varredura de canais; supressão da varredura de nodos órfãos; e proposição de um conjunto adequado de parâmetros para o CSMA/CA. São apresentados testes em simulador explorando as proposições de melhorias no mecanismo de associação de nodos móveis, resultando em uma das principais contribuições desta tese.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões finais bem como as proposições de trabalhos futuros. Para finalizar, o Apêndice A apresenta o protocolo de busca da revisão sistemática de literatura sobre reabilitação, o Apêndice B apresenta o protocolo de busca da revisão sistemática de literatura sobre o processo de *handover* e o Apêndice C apresenta o protótipo de um eletromiógrafo sem fio.

## 2 TRABALHOS RELACIONADOS

Este Capítulo apresenta uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre aplicações de monitoramento para reabilitação de pacientes com uso de RSSF. Também são apresentados os objetivos da RSL, as questões fundamentais de pesquisa, os resultados da extração dos dados mais relevantes para esta tese e uma conclusão sobre os trabalhos analisados.

### 2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA (RSL)

Como método de busca de trabalhos relacionados foi adotada uma revisão sistemática de literatura, um método amplamente adotado para extrair e classificar documentos de pesquisa. RSL é um método para identificar, avaliar e interpretar a literatura que serve para todo tipo de pesquisa, fenômenos e áreas de interesse (KITCHENHAM, 2004). Este método inicialmente propõe os seguintes estágios de pesquisa: Planejamento, Condução e Relatório. Em LUCAS; MOLINA e TOVAL (2009) foi proposto um método expandido para cinco estágios e HA (2015) ampliou a proposta para 7 estágios: Formulação das Questões, Plano de Extração, Seleção das Fontes, Estudo das Fontes, Extração dos Dados, Análise dos Dados e Relatório. O primeiro estágio trata das questões principais da pesquisa, ou seja, as perguntas que serão respondidas.

O Plano de extração estabelece os critérios da busca a ser realizada, um protocolo de busca a ser seguido. Um protocolo predefinido é necessário para reduzir a possibilidade de se utilizar o ponto de vista do pesquisador (KITCHENHAM, 2004). Por exemplo, sem a utilização de um protocolo, é possível que a seleção de trabalhos e análises possam ser conduzidas pelas expectativas do próprio pesquisador. São definidos neste estágio os termos de busca, ou seja, as palavras-chave e combinações possíveis, além dos termos que serão excluídos da busca. O próximo estágio é a seleção das fontes. São escolhidas as bases de dados científicas consideradas mais relevantes onde será aplicado o protocolo de busca. Os próximos estágios compreendem o estudo dos trabalhos resultantes do protocolo de busca,

seguido da extração dos dados mais relevantes para análise e classificação seguido de um relatório ou uma síntese do estado da arte.

## 2.2 RSL SOBRE APLICAÇÕES DE REABILITAÇÃO DE PACIENTES

Visando estabelecer o estado da arte de propostas para supervisão e reabilitação de pacientes com o uso de RSSF, foi realizada uma revisão sistemática da literatura. A seguir são apresentadas as questões objetivas para a RSL proposta.

### 2.2.1 Formulação das Questões

O objetivo desta RSL é o levantamento do estado da arte do uso de redes de sensores sem fio para monitoramento e reabilitação de pacientes com alguma deficiência ou limitação.

### 2.2.2 Perguntas da Pesquisa

- Questão: Quais as aplicações mais comuns de reabilitação de pacientes que utilizam RSSFs?
- Questão adicional: Quais tecnologias de comunicação que são empregadas nas aplicações de reabilitação de pacientes?
- Questão adicional: Como as WBANs e RSSFs são empregadas nas aplicações de reabilitação de pacientes?
- Questão adicional: Quais as tecnologias de comunicação que são empregadas no *gateway* das WBANs?
- Questão adicional: Quais os requisitos de QoS requeridos e atendidos por estas aplicações?

Com estas questões pretende-se evidenciar os modelos de arquiteturas propostas para atender este tipo de aplicação, bem como as tecnologias de comunicação empregadas com seus requisitos e o atendimento às questões de qualidade de serviço.

### 2.2.3 Plano de Extração

Para esta revisão sistemática, inicialmente definiu-se um protocolo de busca, visando estabelecer critérios para a busca e seleção de materiais, de acordo com os objetivos desta pesquisa, que é descrito no Apêndice A.

Neste Apêndice também podem ser encontradas as etapas de seleção das fontes e a extração dos dados. Um protocolo de busca especifica os métodos que irão ser usados para realizar a revisão sistemática. A seguir são apresentados os resultados e a análise dos trabalhos obtidos através do protocolo de busca.

### 2.2.4 Análise dos Dados

A busca realizada na RSL resultou numa relação dos trabalhos mais relevantes da literatura, destacando-se como principais características, as tecnologias utilizadas, os membros do corpo humano monitorados, bem como os tipos de sensores utilizados. As abordagens sobre mobilidade do paciente, QoS, *feedback* e interferência também foram destacadas. Os principais trabalhos são descritos a seguir.

JOBS; LANTZ; LEWIN; JANSSON *et al.* (2009) propuseram um sistema de monitoramento contínuo de atividades físicas via Internet por meio dos movimentos de braços e pernas em um ambulatório, utilizando acelerômetros. Este experimento monitorou grandezas como posição dos membros, temperatura e localização via GPS (GPS: *Global Positioning System*), enquanto possibilitava a mobilidade do paciente. Foram utilizados dispositivos ZigBee para a WBAN e um servidor pessoal (PS: *personal server*) implementado com módulos de comunicação ZigBee (coordenador), GPS e GSM/GPRS, como *gateway* para acesso a outras redes. No entanto, neste trabalho as questões de QoS não foram consideradas, portanto não são aplicáveis onde requisitos de tempo real são necessários.

O trabalho proposto por CHOQUETTE; HAMEL e BOISSY (2008) valida o uso de acelerômetros quando estima a intensidade da terapia de um paciente em reabilitação, determinando o tempo efetivamente ativo dos movimentos e não o tempo

total da terapia. Foi utilizada uma WBAN com dispositivos ZigBee para obter os dados de quadril, punho e tornozelo, não considerando as questões de QoS. Como *gateway* foi utilizado um computador pessoal com acesso à internet.

O trabalho de MELZI; BORSANI e CESANA (2009) foi baseado na análise e supervisão de movimentos de bíceps aplicados à ginástica e reabilitação de pacientes. Para tanto, foram utilizados acelerômetros e enviados os dados a um computador local, onde uma aplicação analisou o movimento e apresentou indicadores de velocidade, uniformidade, regularidade e execução, possibilitando o ajuste dos movimentos pelo paciente em tempo real. Para formar a WBAN foram utilizados dispositivos compatíveis com IEEE 802.15.4 comunicando com um computador pessoal.

FELISBERTO; COSTA; FDEZ-RIVEROLA e PEREIRA (2012) propuseram uma arquitetura WBAN para reconhecer movimentos identificando postura e detectando atividades prejudiciais, prevenindo assim situações de riscos durante a terapia. Por meio de um perfil padrão de movimentos supervisionados baseado nos dados obtidos de uma WBAN, detectam movimentos anormais permitindo a reabilitação monitorada do paciente. Neste trabalho o objetivo era identificar posturas e não um completo rastreamento de movimentos. Os movimentos são acompanhados por uma animação 3D, e ao detectar postura fora do padrão, são emitidos alarmes. A arquitetura proposta é formada por 5 elementos básicos: sensores, coordenador, *gateway* e uma aplicação clínica, sendo que as tecnologias utilizadas para a WBAN foram Wi-Fi e Bluetooth. Foram implementadas duas possibilidades de *gateway*: Wi-Fi ou dispositivo móvel com Bluetooth, e o acesso à rede de distribuição por Wi-Fi e GSM, respectivamente. Os autores também concluíram que somente o uso de acelerômetros não seria uma solução viável para reconhecimento de movimentos e posturas, sendo necessário adicionar outros sensores como giroscópio e magnetômetro. Da mesma forma, BUONOCUNTO e MARINONI (2014), desenvolveram uma proposta para rastrear movimentos de articulações em tempo real com o uso de acelerômetro, giroscópio e magnetômetro. Os autores concluíram ser esta a forma mais completa de estimar a orientação 3D de um paciente utilizando sensores. Como tecnologia de comunicação foram utilizados dispositivos com Bluetooth e um dispositivo móvel possibilitando *feedback* ao paciente. Em NERINO; CONTIN; PINTO; MASSAZZA *et al.* (2013) é apresentado um sistema de reabilitação

de ligamentos de joelho, avaliando o ângulo e posição das articulações com auxílio de acelerômetro, giroscópio e magnetômetro. Este sistema permite ao paciente realizar atividades de reabilitação não assistida enviando suas avaliações para uma aplicação clínica remota, que disponibiliza um *feedback* em tempo real. Neste experimento foram utilizados dispositivos Bluetooth e um dispositivo móvel como *gateway* para redes 3G e Wi-Fi.

Outros trabalhos apresentam soluções alternativas, como por exemplo, com auxílio de robôs. FENG; XU; GUO; GAO *et al.* (2012), desenvolveram um sistema de monitoramento para reabilitação de função motora após um evento de acidente vascular cerebral - AVC. Neste trabalho, por meio dos dados fisiológicos do paciente com sensores no tórax, braços e dedos obtidos da WBAN, o treinamento de reabilitação vai sendo ajustado. Em NARANG; NARANG; SINGH e LEMPIAINEN (2013) foi desenvolvido um sistema de monitoramento de movimentos dos braços com o auxílio de robô, utilizando como referencial os movimentos do braço normal obtidos pela WBAN para classificar os movimentos do braço afetado. Nestes projetos assistidos por robô destacam-se algumas questões que podem inviabilizar a adoção da solução, como a falta de mobilidade do paciente e elevado custo da solução.

Com o uso de dados provenientes de diferentes sensores, alguns desafios adicionais se apresentam, como o processamento necessário para fusão de dados para se obter uma informação clínica, e o aumento no consumo de energia que diminui a autonomia. VOLMER e ORGLMEISTER (2008), desenvolveram uma rede de monitoramento cardiovascular, de movimento e de postura, capaz de sincronizar o tempo de amostragem para obter informação clínica a partir de vários sensores utilizando fusão de dados, diminuindo a taxa de dados, economizando energia.

Um outro desafio importante na elaboração de uma arquitetura para reabilitação de pacientes e que distingue um sistema de monitoramento de um sistema de reabilitação, é a apresentação de informações ao paciente em tempo real proporcionando *feedback* necessário para corrigir eventuais movimentos prejudiciais ao paciente ou a terapia. PIOGGIA; TARTARISCO; VALENZA; RICCI *et al.* (2010), desenvolveram um monitoramento de fadiga muscular em idosos, utilizando redes neurais e técnicas adaptativas e inteligentes de processamento de dados capaz de

codificar e distribuir informação em tempo real. Pelo experimento foi possível classificar movimentos (sentar, levantar, andar, correr, subir e descer) com uso de acelerômetros nas pernas, braços, cintura e tórax.

BORA; KUMAR e DUTTA (2019) desenvolveram um estudo de caso de uma RSSF baseada em dispositivos padrão IEEE 802.15.4, para monitoramento em tempo real da caminhada (marcha) de um paciente em um programa de reabilitação. Para tanto, utilizaram acelerômetros e giroscópios para monitorar os quadris e joelhos de um paciente. Foram utilizados módulos de comunicação XBee da Digi International configurados em rede com topologia estrela, com um coordenador e dois dispositivos finais. Como resultados, na comparação das trajetórias de quadril e joelho de ambas as pernas obtidas utilizando o protótipo com dados obtidos por equipamento comercial (Biometrics), o sistema de medição de ângulo desenvolvido sofreu de uma pequena aleatoriedade que pode ser filtrada usando alguns filtros, tais como Kalman, Golay, entre outros. No entanto, a amplitude de movimento articular permaneceu quase igual em ambos os sistemas de medição.

Trabalhos recentes utilizam jogos e/ou realidade virtual para proporcionar um *feedback* mais elaborado e em tempo real ao paciente, como em BAQAI; MEMON; MEMON e SHAH (2019), no qual os autores propuseram uma maneira divertida de realizar exercícios de rotina sem intervenção física. Para tanto, utilizaram um ambiente de jogo de realidade virtual com pacientes para melhorar a mobilidade articular e muscular, além de fornecer monitoramento contínuo de sinais vitais usando sensores biométricos. Neste experimento foi utilizado o Microsoft Kinect (sensor ótico) e um óculos Rift 3D, sendo que o jogo oferece vários graus de exercícios musculares e é utilizado para rastrear os movimentos do paciente. Os óculos Rift permitem rastrear o movimento da cabeça usando a tecnologia de fusão de sensores com a ajuda de um giroscópio, acelerômetro e magnetômetro. As rotações da cabeça são obtidas enquanto o usuário move a cabeça para cima e para baixo, gira para a direita ou para a esquerda e inclina a cabeça para a esquerda ou para a direita. Isto permite o monitoramento da capacidade de o paciente realizar exercícios de cabeça e pescoço. Outros sensores utilizados nesse experimento incluem sensor de respiração, oxímetro de pulso para frequência cardíaca, sensor de temperatura e sensor de condutância da pele (GSR: *Galvanic Skin Response*). Segundo os autores, o protótipo apresentado pode ser utilizado no campo da fisioterapia, melhorando a qualidade das atividades

diárias para idosos ou pessoas com alguma limitação. Tradicionalmente, os sistemas óticos são utilizados para análise de movimento de um paciente, mas estes possuem certas limitações, como o desenvolvimento de algoritmos complexos e limite de espaço físico. Em comparação com o sistema ótico, as RSSF tradicionais têm a vantagem por serem de tamanho reduzido, baixo custo e se poderem atender grandes áreas.

### 2.2.5 Síntese da RSL

Os trabalhos da RSL foram classificados inicialmente conforme definido em CHEN; GONZALEZ; VASILAKOS; CAO *et al.* (2011), ou seja, dividindo-os em três camadas de acordo com as tecnologias de comunicação utilizadas. A primeira camada (*Tier1*) apresenta a tecnologia utilizada pela WBAN, com destaque para os dispositivos ou protocolos de comunicação utilizados nas camadas física (PHY), acesso ao meio (MAC) e rede (NW). A segunda camada (*Tier2*) classifica a tecnologia de comunicação utilizada no *gateway* e a terceira camada (*Tier3*), a tecnologia utilizada para acesso as redes de distribuição. Além deste critério, os trabalhos foram também classificados pelos membros do corpo humano que estavam sendo monitorados; os tipos de sensores utilizados; se os autores consideravam questões de QoS, *feedback* e interferência e, finalmente, se os trabalhos envolviam a mobilidade do paciente. O resumo da RSL pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1– Síntese da RSL.

Referências	Descrição	Aplicação						Tier 1 - WBAN			Tier 2	Tier 3
		Membros	Sensores	Mob	Qos	Feedback	Inter	PHY	MAC	NW	GW	
(Choquette et al., 2008)	Avaliação da intensidade da terapia de um paciente em reabilitação com acelerômetro	quadril, punho e tornozelo	Acelerômetro 3D	N	N	S	N	zigbee	zigbee	zigbee	Tablet-PC com USB	802.11
(Volmer e Orglmeister, 2008)	monitoramento cardiovascular, movimento e postura	pulso, torax	ECG, PPG (fonopletismografia), PCG (fonocardiografia), acelerômetro	N	N	S	S	zigbee	zigbee	zigbee	PC / USB	
(Jobs et al., 2009)	Monitoramento de posição e temperatura ambiente, com localização via GPS em ambulatório via internet	braço, perna	3-xis Acelerômetro, termostado	S	N	S	N	zigbee	zigbee	zigbee	PS com GSM/GPR SGPS	802.11
(Melzi et al., 2009)	Tele-Treinamento e/ou reabilitação assistida (um exercício bíceps)	pulso, cotovelo	acelerômetro 2D	N	tempo real	S	N	802.15.4	802.15.4	desenv.	PC / USB	
(Pioggia et al., 2010)	Gerenciamento e monitoramento de atividade física de idosos	pernas, braço, cintura, tórax	ECG, EMG, respirador, acelerômetro	N	tempo real	S	N	zigbee	zigbee	zigbee	PC / USB	
(Felizberto et al., 2012)	Deteção de movimento e postura prevenindo situações de risco usando animação 3D	ombro, quadril, coxa	acelerômetro, giroscópio, magnetômetro	S	tempo real, não obstrução, escalabilidade, baixo consumo	S	N	desenv	desenv	desenv	PDA/ Wifi, Bluetooth	GSM, 802.11
(Feng et al., 2012)	Sistema de monitoramento de reabilitação de função motora pós AVC com auxílio de robô	tórax, braço, dedos	ECG, temperatura, pulso, EMG	N	tempo real	N	N	802.15.4	802.15.4	IRIS mote	PDA/ Wifi	802.11
(Narang et al., 2013)	Monitoramento de movimentos do braço para reabilitação com auxílio de robô (PC)	braço	acelerômetro, giroscópio, magnetômetro	N	tempo real	S	N	desenv	desenv	desenv	PC / USB	
(Nerino et al., 2013)	Reabilitação de joelho pós-operatório em casa	coxa, canela, pé	acelerômetro, giroscópio, magnetômetro	N	tempo real	S	N	Bluetooth	Bluetooth	Bluetooth	PDA/ Bluetooth	3G/Wifi
(Buonocunto e Marinoni, 2014)	Deteção de movimento de membros	articulações	acelerômetro, giroscópio, magnetômetro	N	acurácia, flexibilidade, tempo real	S	S	BLE	BLE	BLE	Tablet	
(Casamassima et al., 2014)	Sistema para reabilitação de pacientes com mal de parkinson com feedback por áudio	coluna, pés	acelerômetro, giroscópio, magnetômetro	S	tempo real	S	N	Bluetooth	Bluetooth	Bluetooth	PDA	
(Bora et al., 2019)	Monitoramento de marcha	quadril, joelho	acelerômetro, giroscópio	S	tempo real	N	N	802.15.4	802.15.4	zigbee	PC / USB	
(Baqai et al., 2019)	Reabilitação de movimentos com monitoramento de sinais vitais	cabeça, pescoço	acelerômetro, giroscópio, magnetômetro, Oxímetro, GSR, Temperatura	N	tempo real	N	N	802.15.4	zigbee		PC / USB	

Fonte: do autor.

A partir da análise dos trabalhos obtidos na RSL, foi possível constatar alguns desafios e questões em aberto. A maior parte dos trabalhos tratam de experimentos ou aplicações sem uma arquitetura definida, onde os dados obtidos de WBANs são enviados diretamente a um computador pessoal ou dispositivo móvel local. Outra

questão importante e pouco abordada nos trabalhos analisados é a possibilidade de mobilidade do paciente durante a terapia de reabilitação. Nesta tese, entende-se por mobilidade, a possibilidade de deslocamento do paciente em áreas abertas enquanto seus sinais fisiológicos estão sendo monitorados. Quanto às tecnologias de comunicação adotadas para WBANs, são predominantes o uso de dispositivos ZigBee e Bluetooth sendo que a totalidade dos trabalhos analisados utilizaram computadores ou dispositivos móveis como gateway para outras redes, e tecnologias como Wi-Fi e 4G para acesso às redes de distribuição. A detecção de movimento ou postura é considerado um dos principais desafios no monitoramento e reabilitação de pacientes, pois depende diretamente do membro a ser reabilitado e do tipo de sensor utilizado. As soluções encontradas invariavelmente são destinadas a membros específicos, oportunizando o desenvolvimento de arquiteturas mais flexíveis que permitam contemplar as mais diversas aplicações de reabilitação.

### 2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

São muitos os desafios para se desenvolver uma arquitetura utilizando redes de sensores sem fio que atenda a diversidade de terapias de reabilitação com garantias de qualidade de serviço. O que se pode constatar é que existem inúmeras questões sendo discutidas isoladamente como, por exemplo, a detecção de movimento, *feedback* em tempo real, tecnologias de comunicação, tipos de sensores, consumo de energia e garantias de QoS. Porém, nos trabalhos analisados não foi possível constatar a existência de uma arquitetura que contemple essa diversidade de aplicações, principalmente em ambientes abertos e que, ao mesmo tempo, proporcione mobilidade, conforto, motivação e qualidade de vida ao paciente que são fatores determinantes para o sucesso de uma terapia. Este capítulo apresentou uma revisão sistemática da literatura com o estado da arte e os principais desafios na reabilitação de pacientes com uso de redes corporais, proporcionando um embasamento teórico necessário para o desenvolvimento desta pesquisa. O Capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento desta tese.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 APRESENTAÇÃO

Este Capítulo apresenta uma visão sobre a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento desta pesquisa, baseada principalmente nas principais tecnologias de comunicação utilizadas na área de saúde. Destacam-se, nesta fundamentação, as redes de sensores sem fio padrão IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4, 2011), que foi o padrão de rede escolhido para avaliação e proposição de melhorias no contexto das aplicações na área da fisioterapia propostas nesta tese.

#### 3.2 REDES DE SENSORES SEM FIO

Redes de Sensores sem Fio (RSSF) são formadas por pequenos nodos sensores que utilizam rádio comunicação para troca de mensagens. Basicamente, esses nodos são compostos por uma fonte de energia, unidade de sensoriamento, unidade de processamento e um módulo de rádio (AKYILDIZ; WEILIAN; SANKARASUBRAMANIAM; CAYIRCI, 2002). Os sensores podem monitorar diversos fenômenos físicos como: pressão, temperatura, umidade, vibração, composição do solo, luminosidade, movimento veicular, dados fisiológicos entre outros.

As RSSFs diferem de redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Normalmente, essas redes possuem um grande número de nodos distribuídos. Do ponto de vista formal, o termo nodo designa um elemento com capacidade de processamento, memória, interface de comunicação sem fio, além de um ou mais sensores do mesmo tipo ou não. As RSSFs têm restrições de consumo de energia e devem possuir mecanismos para autoconfiguração e adaptação devido a problemas como: falhas de comunicação, perda de nodos e inserção de novos nodos (LOUREIRO; NOGUEIRA; RUIZ; RUIZ *et al.*, 2003).

Uma RSSF tende a ser autônoma e requer um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para a rede. Isso significa que, algoritmos distribuídos tradicionais como protocolos de comunicação, por exemplo, devem ser revistos para esse tipo de ambiente antes de serem usados. Os desafios e considerações de projeto de RSSF vão muito além das redes tradicionais. Nessas redes, cada nodo pode ser

equipado com vários sensores. Esses nodos podem ser organizados em grupos (*clusters*) onde pelo menos um dos sensores deve ser capaz de detectar um evento na área de monitoramento, processá-lo e tomar uma decisão se deve fazer ou não uma difusão do resultado para outros nodos.

As RSSFs podem ser vistas como um tipo especial de rede móvel *ad hoc* (MANET: *Mobile ad hoc Network*) e como uma das vertentes da computação ubíqua (WEISER, 1999). Numa rede tradicional, a comunicação entre os elementos computacionais é feita através de estações base de rádio, que constituem uma infraestrutura de comunicação. Por outro lado, numa rede móvel *ad hoc* os elementos computacionais trocam dados diretamente entre si. Do ponto de vista de organização, RSSFs e MANETs são idênticas, já que possuem elementos computacionais que comunicam diretamente entre si através de enlaces de comunicação sem fio. No entanto, as MANETs têm como função básica prover um suporte à comunicação entre esses elementos computacionais, que individualmente podem exercer tarefas distintas. Por outro lado, as RSSFs tendem a executar uma função colaborativa onde os elementos sensores provêm dados que são processados ou consumidos por nodos especiais chamados de sorvedouros (*sink nodes*).

Em geral, as RSSFs possuem um grande número de elementos distribuídos, operam sem intervenção humana direta, têm restrições severas de energia e devem possuir mecanismos para autogerenciamento, autoconfiguração, automanutenção, auto-organização, autoproteção, etc., devido à possibilidade de sua inserção em áreas remotas, a pouca capacidade individual dos nodos e à topologia dinâmica. Os nodos de uma RSSF podem ficar fora de serviço por diferentes razões como falta de energia, problemas na distribuição, ameaças e ataques à segurança, falhas nos componentes e falha de comunicação.

Ao longo do tempo, vários padrões foram definidos para RSSF. O padrão IEEE 802.15.4 é um dos mais utilizados para a implementação de RSSFs. Esse padrão define as especificações da conectividade sem fio com baixa taxa de dados para a camada física e a subcamada de controle de acesso ao meio para dispositivos fixos, móveis ou portáteis.

### 3.3 O PADRÃO IEEE 802.15.4

Uma rede de área pessoal sem fio de baixa taxa (LR-WPAN: *Low rate Wireless Personal Network*) é uma rede de comunicação simples, sem infraestrutura e com taxas de dados reduzidas. Os principais objetivos de um LR-WPAN são a facilidade de instalação, transferência de dados confiável, custo baixo e maior duração da bateria, mantendo um protocolo simples e flexível.

O IEEE 802.15.4 é um padrão LR-WPAN que especifica a camada física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) para comunicação sem fio com baixa taxa de transmissão, consumo limitado de energia para comunicação entre dispositivos fixos e móveis de baixo custo e curto alcance operando na faixa não licenciada (IEEE 802.15.4, 2011). Este padrão é a base para as especificações padrão da indústria como ZigBee ([www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)), ISA100.11a ([www.isa.org](http://www.isa.org)), WirelessHART ([pt.hartcomm.org](http://pt.hartcomm.org)), WIA-PA ([www.iec.ch](http://www.iec.ch)). Cada um desses padrões da indústria estende o padrão IEEE 802.15.4 implementando as camadas superiores (tipicamente camadas de rede e aplicação)(SIYE; YANJUN; ZHENYU; WENBIAO *et al.*, 2012).

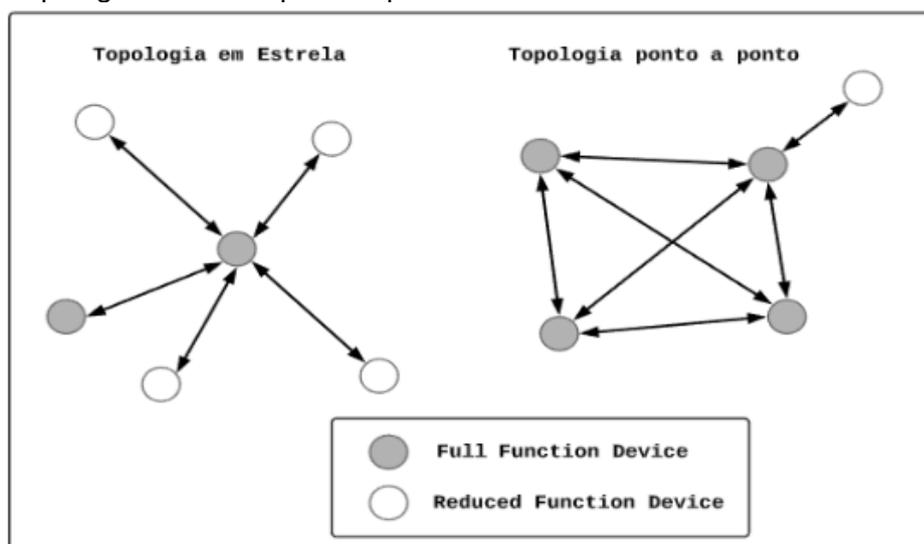
A primeira versão do padrão IEEE 802.15.4 foi aprovada em 2003. O objetivo inicial era prover comunicação em curtas distâncias no chamado espaço operacional pessoal (POS: *Personal Operation Space*) de 10 metros com uma taxa de até 250 Kbps. Em 2006, 2007 e 2009, esse padrão foi revisado, adicionando múltiplas opções de camadas físicas e funcionalidades na camada de acesso ao meio atendendo às diversas demandas da indústria e regulamentações específicas em determinadas regiões (IEEE 802.15.4, 2011). Estas características permitiram o desenvolvimento de aplicações em diversas áreas da indústria, agricultura, tecnologia veicular, residencial e médica utilizando sensores e atuadores (HOWITT; GUTIERREZ, 2003).

O padrão caracteriza dois diferentes tipos de dispositivos: um dispositivo de função completa (FFD: *Full Function Device*) e um dispositivo de função reduzida (RFD: *Reduced Function Device*). Um FFD tem a capacidade de coordenar uma rede de área pessoal implementando um conjunto completo de protocolos. Já o RFD somente pode atuar como dispositivo de aquisição ou controle (sensor ou atuador), utilizando recursos mínimos de memória e processamento. Dois dispositivos operando no mesmo canal físico formam uma PAN, mas pelo menos um deles necessita ser um FFD, para exercer o papel de coordenador.

### 3.3.1 Topologias

Dependendo dos requisitos da aplicação, uma LR-WPAN opera em uma das duas topologias: em estrela ou ponto-a-ponto. Na topologia em estrela, a comunicação é estabelecida apenas entre os dispositivos e um único nodo central chamado coordenador PAN, limitando o tamanho da rede de acordo com o alcance do sinal de rádio. A topologia ponto-a-ponto também possui um coordenador PAN, no entanto, ele difere da topologia em estrela, pois qualquer dispositivo é capaz de se comunicar com outro dispositivo, desde que eles estejam atuando no mesmo canal de comunicação. Uma rede ponto-a-ponto permite múltiplos saltos para rotear mensagens de qualquer dispositivo para qualquer outro dispositivo na rede. A Figura 3 ilustra a estrutura básica das topologias de rede no padrão IEEE 802.15.4.

Figura 3 – Topologias estrela e ponto a ponto.

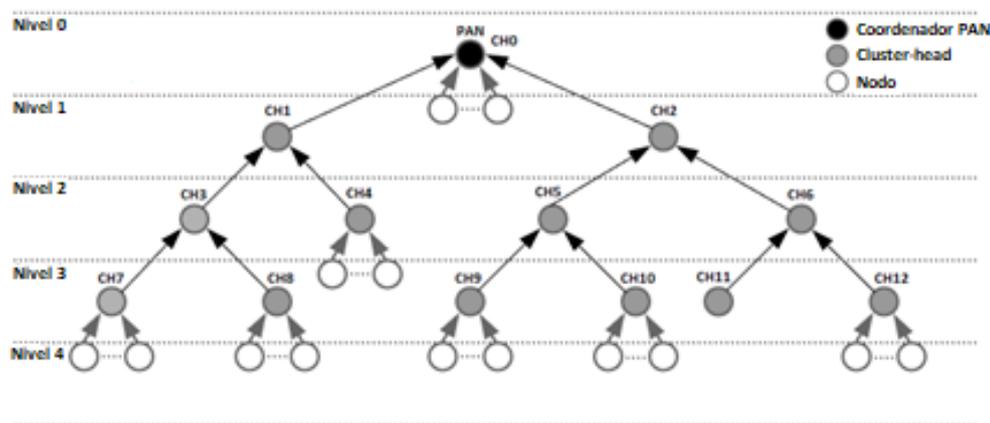


Fonte: do autor.

A topologia ponto-a-ponto permite implementar formações de rede mais complexas. Um exemplo do uso da topologia de comunicações ponto-a-ponto é o agrupamento em árvore (*cluster-tree*). Em uma topologia de agrupamento em árvore, os nodos sensores são agrupados em *clusters*, onde cada *cluster* é coordenado por um nodo específico chamado de *cluster-head* (CH). A rede de agrupamento em árvore é um caso especial de rede ponto-a-ponto na qual a maioria dos dispositivos são

FFDs. Um dispositivo RFD conecta-se à uma rede de agrupamento em árvore como um dispositivo final de uma ramificação, porque um RFD não permite que outros dispositivos se associem a ele. Qualquer FFD é capaz de atuar como coordenador e fornecer serviços de sincronização para outros dispositivos ou outros coordenadores, mas apenas um desses coordenadores é o coordenador geral da PAN (IEEE 802.15.4, 2011). A Figura 4 ilustra um exemplo de uma topologia de rede de sensores sem fio em agrupamento em árvore.

Figura 4 – Topologia de agrupamento em árvore.

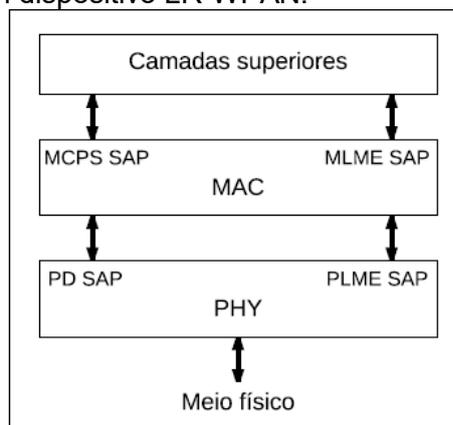


Fonte: do autor.

### 3.3.2 Arquitetura

A arquitetura do padrão IEEE 802.15.4 é definida em camadas conforme a Figura 5. Cada camada é responsável por uma parte do padrão e oferece serviços para as camadas superiores. Um nodo de uma LR-WPAN é composto por pelo menos uma camada física (PHY) que contém o transceptor de rádio frequência (RF) e uma subcamada MAC (*Medium Access Control*), que permite acesso ao meio físico que possibilita mover dados de uma interface de rede para outra em um canal compartilhado.

Figura 5 – Arquitetura de um dispositivo LR-WPAN.



Fonte: (IEEE 802.15.4, 2011).

Os serviços de uma camada são os recursos que ela oferece à próxima camada ou subcamada superior, construindo suas funções nos serviços da próxima camada inferior. Os serviços são especificados descrevendo o fluxo de informações entre o usuário N e a camada N. Esse fluxo de informações é modelado por eventos discretos e instantâneos, que caracterizam a prestação de um serviço. Cada evento consiste em passar uma primitiva de serviço de uma camada para outra através de uma camada de serviço associada a um usuário N, conhecida como ponto de acesso da entidade de gerenciamento da subcamada MAC (MLME-SAP: *MAC Sublayer Management Entity Service Access Point*). As primitivas de serviço transmitem as informações necessárias fornecendo um serviço específico. Essas primitivas de serviço são uma abstração porque especificam apenas o serviço fornecido e não os meios pelos quais ele é fornecido. Um serviço é especificado descrevendo as primitivas e parâmetros de serviço que o caracterizam. Uma primitiva pode ser um dos quatro tipos genéricos: Solicitação, Indicação, Resposta e Confirmação.

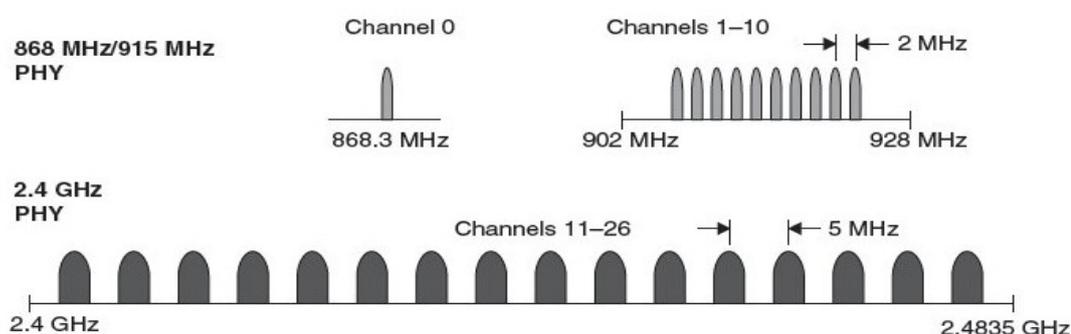
### 3.3.2.1 A Camada Física

A camada física (PHY) fornece uma interface entre a subcamada MAC e o canal de rádio físico, através do *firmware* de RF e do *hardware* de RF. O PHY conceitualmente inclui uma entidade de gerenciamento chamada PLME (*Physical Layer Management Entity*). Essa entidade fornece as interfaces de serviços de

gerenciamento de camada pelas quais as funções de gerenciamento podem ser chamadas. O PLME também é responsável por manter um banco de dados de objetos gerenciados pertencentes ao PHY. Este banco de dados é conhecido como base de informações da PAN (PIB: *PAN Information Base*).

A camada física fornece dois serviços: o serviço de dados e serviço de gerenciamento. O serviço de dados permite a transmissão e recepção de unidades de dados do protocolo PHY (PPDU: *PHY Protocol Data Unit*) através do canal de rádio físico. O padrão IEEE 802.15.4 opera nas faixas de 868MHz, 915MHz e 2,4GHz, que permitem taxas nominais de transmissão de 20kbps, 40Kbps e 250kbps respectivamente. Este padrão utiliza 27 canais em três diferentes áreas do espectro não licenciado (ISM: *Industrial, Scientific and Medical*). Um canal está disponível em 868MHz, 10 canais são disponíveis a partir de 902MHz a 928MHz, com uma separação de 2 MHz entre os canais e 16 canais estão disponíveis a partir de 2,4GHz a 2,4835 GHz, com uma separação de 5MHz (BARONTI; PILLAI; CHOOK; CHESSA *et al.*, 2007), conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Canais IEEE 802.15.4 em ISM.



Fonte: Internet.

Os métodos de modulação para o padrão IEEE 802.15.4 são BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) para faixas 868/915MHz e o O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*) para a faixa de 2,4GHz, conforme apresenta a Tabela 2. Todos utilizam o espalhamento de espectro direto (DSSS) como técnica de modulação para minimizar a perda de dados devido à ruídos e interferências.

Tabela 2 – Parâmetros da Camada Física LR-WPAN.

PHY (MHz)	Frequência (MHz)	Parâmetros de espalhamento		Parâmetros de Dados		
		Taxa (Kchip/s)	Modulação	Taxa de Bit (kb/s)	Taxa de símbolos (ksymbol/s)	Símbolos
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902-928	600	BPSK	40	40	Binary
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16 symbols

Fonte: (IEEE 802.15.4, 2011).

Segundo o padrão IEEE 802.15.4, as responsabilidades da camada física são as seguintes:

- Ativação e desativação do transceptor de rádio, permitindo que o mesmo transmita ou receba dados, adormeça (modo *sleep*) ou seja desligado.
- Avaliação de canal livre CCA (*Clear Channel Assessment*) que verifica se o meio de transmissão se encontra livre ou ocupado.
- Detecção de energia no canal ED (*Energy Detection*). Este serviço pode ser utilizado pela camada de rede como parte do mecanismo de seleção de canal ou pelo CCA para determinar se o canal está ocioso ou ocupado. Esse serviço fornece uma estimativa do nível de sinal recebido dentro da largura de banda do respectivo canal.
- Indicador de qualidade do enlace (LQI). Pode ser utilizado como estimativa da distância do dispositivo emissor.
- Seleção de um dos canais e o consequente ajuste da frequência no transceptor. A seleção do canal é comandada pela camada superior.

### 3.3.2.2 A subcamada de Controle de acesso ao Meio

A subcamada MAC fornece uma interface entre a próxima camada superior e a camada física. A subcamada MAC fornece dois tipos de serviços: o serviço de dados e o serviço de gerenciamento, fazendo interface com o ponto de acesso ao serviço da entidade de gerenciamento de subcamada MAC (MLME) (conhecido como MLME-

SAP). O serviço de dados permite a transmissão e recepção de unidades de dados de protocolo MAC (MPDUs) através do serviço de dados PHY. O MLME também é responsável por manter um banco de dados de objetos gerenciados pertencentes à subcamada MAC, que é declarado como o subcampo MAC PIB. A subcamada MAC controla todo o acesso ao canal de rádio físico e é responsável pelas seguintes tarefas:

- Geração de sinalizadores (*beacons*), se for um coordenador;
- Sincronização de *beacons*;
- Suporte à associação e desassociação da PAN;
- Suporte à segurança dos dispositivos;
- Emprego de mecanismos do CSMA/CA para acesso ao canal;
- Manuseio e manutenção do mecanismo de *slots* de tempo garantido (GTS: *Guaranteed Time Slot*);
- Fornecimento de um link confiável entre duas entidades MAC pares.

### 3.3.3 Acesso ao canal

O padrão IEEE 802.15.4 especifica um método de acesso ao canal de comunicação baseado em contenção denominado CSMA/CA (*Carrier sense multiple access with collision avoidance*). O protocolo CSMA/CA permite que um nodo escute o meio, para verificar se o mesmo está ocupado ou não, antes de tentar uma transmissão. Se o meio estiver disponível, o dispositivo pode iniciar sua transmissão, entretanto, esta transmissão pode colidir com a de outro dispositivo que iniciou a transmissão ao mesmo tempo. Geralmente em RSSFs é utilizado um mecanismo de prevenção de colisões, devido aos custos e técnicas necessárias para a implementação de mecanismos de detecção de colisão.

O IEEE 802.15.4 usa dois tipos de mecanismo de acesso ao canal, dependendo da configuração da rede: PANs habilitadas para *beacon* e não habilitadas para *beacon*. Um *beacon* é um quadro especial de sincronização gerado periodicamente pelo nodo coordenador. PANs não habilitadas para *beacon* utilizam o mecanismo CSMA/CA sem *slots* e PANs habilitadas para *beacon* utilizam o CSMA/CA com *slots*. Independente do mecanismo, o protocolo CSMA/CA é baseado em unidades de tempo denominadas períodos de *backoff*, onde um período é igual a  $aUnitBackoffPeriod = 20$  símbolos (um símbolo equivale a 4 bits).

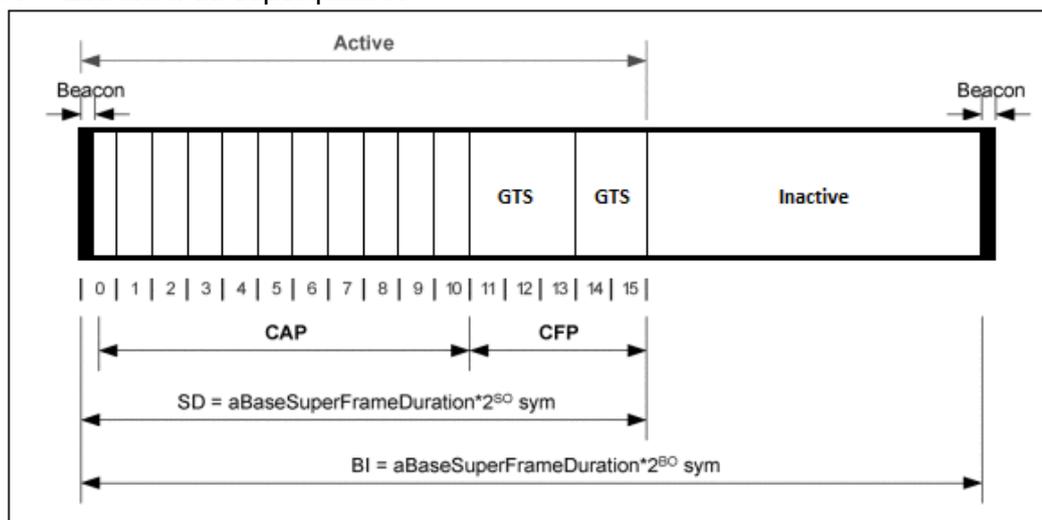
No CSMA/CA com *slots*, cada dispositivo deve ter o início do primeiro período de *backoff* alinhado com o início da transmissão de *beacon* do coordenador PAN. A

subcamada MAC deve assegurar que o PHY comece e termine todas as suas transmissões no limite de um período de *backoff*. Já no CSMA/CA sem *slots*, os períodos de *backoff* de um dispositivo não estão relacionados aos períodos de *backoff* de qualquer outro dispositivo da PAN.

Na transmissão de quadros de dados ou comandos MAC, o mecanismo CSMA/CA estabelece que o dispositivo aguarde um período de *backoff* aleatório. Se o canal estiver livre, após o período de *backoff* aleatório, o dispositivo transmite os seus dados. Mas, caso o canal esteja ocupado após o período de *backoff* aleatório, o dispositivo aguarda por outro período aleatório antes de tentar acessar o canal novamente. Se houver a necessidade de uma confirmação de recebimento, quadros de reconhecimento (ACK) são enviados sem o uso do mecanismo CSMA/CA.

O modo habilitado para *beacon* fornece um mecanismo de gerenciamento de energia com base em um ciclo de serviço. Ele usa uma estrutura de superquadro (*superframe*) delimitada por *beacons*, conforme Figura 7.

Figura 7 – Estrutura do superquadro.



Fonte: (IEEE 802.15.4, 2011).

O tempo entre dois *beacons* consecutivos é chamado de *Beacon Interval* (BI) e é definido pelo parâmetro *Beacon Order* (BO), da seguinte forma:

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO}, \text{ com } 0 \leq BO \leq 14 \quad (1)$$

Cada superquadro é composto por um período ativo e um período inativo. No período ativo, os nodos se comunicam com o coordenador ao qual estão associados, enquanto durante o período inativo eles entram em um estado de baixo consumo de

energia para economizar bateria. O período ativo é denotado como duração do superquadro (SD: *superframe Duration*) e seu tamanho é definido pelo parâmetro *Superframe Order* (SO), da seguinte forma:

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO}, \text{ com } 0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (2)$$

O parâmetro *aBaseSuperframeDuration* define a duração mínima de um superquadro quando SO é 0 (por padrão, esse parâmetro corresponde a 960 símbolos que correspondem a uma duração de 15,36 ms, assumindo uma frequência de 2,4 GHz).

O superquadro pode ser dividido em um período de contenção (CAP: *contention active period*) e um período livre de colisão (CFP: *colision free period*). Durante o CAP, o algoritmo CSMA-CA com *slot* é usado para acesso ao canal, enquanto na comunicação CFP é utilizada a técnica de acesso TDMA (*time-division multiple access*) usando um número de *slots* de tempo garantido (GTS) previamente atribuídos a nodos individuais.

No modo sem *beacon* habilitado, não há um superquadro, os nodos estão sempre ativos (a conservação de energia é delegada às camadas superiores).

### 3.3.4 O Protocolo CSMA/CA

O protocolo CSMA/CA depende principalmente de três variáveis:

1. *Backoff Exponent* (BE), onde  $[0, 2^{BE} - 1]$  representa quantos períodos um dispositivo deve esperar antes de tentar avaliar um canal.
2. *Contention Window* (CW) é o tamanho da janela de contenção, definindo o número de períodos que precisam estar livres de atividade do canal antes que a transmissão possa ser iniciada.
3. *Number of Backoffs* (NB), é o número de tentativas do CSMA/CA para acessar o meio de comunicação. Esse mecanismo tenta evitar colisões esperando por um período aleatório.

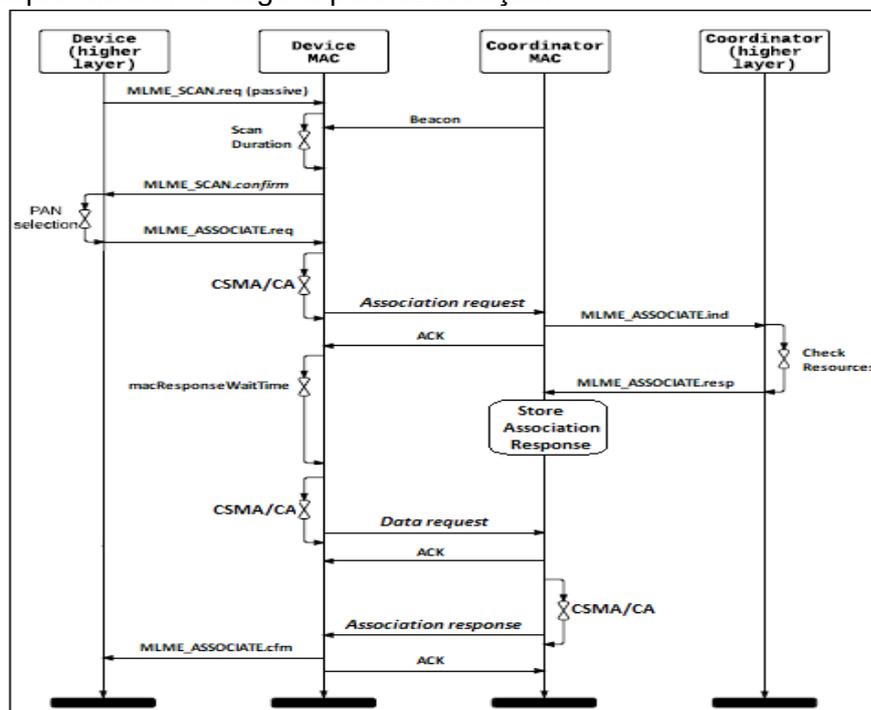
O CSMA/CA funciona da seguinte maneira: após a conclusão do período de *backoff*, uma avaliação do canal é realizada (CCA: *Clear channel assessment*) para

verificar se o canal está ocupado ou não. Se o canal estiver ocupado, os valores de NB e BE são incrementados e o do CW é reiniciado. No entanto, BE não pode exceder o valor de *macMaxBE*. Se o valor de NB exceder *macMaxCSMABackoffs*, o algoritmo terminará com um erro de acesso ao canal. Caso contrário, o algoritmo volta a esperar por um novo período aleatório. Se o canal estiver inativo, o valor de CW é diminuído. Sempre que  $CW = 0$ , o nodo pode iniciar uma transmissão. Caso contrário, o algoritmo realiza uma nova avaliação do canal para verificar se está ocupado ou não.

### 3.3.5 O mecanismo de associação

A topologia de rede é criada pelo procedimento de associação iniciado pelo coordenador da PAN, seguido por outros nodos sensores. De fato, o coordenador da PAN transmite quadros de *beacons* para permitir a associação de nodos vizinhos. Da mesma forma, os novos nodos associados enviam *beacons* para permitir a associação de nodos filhos e assim por diante. A Figura 8 apresenta a sequência de mensagens para a associação de nodos.

Figura 8 – Sequência de mensagens para associação.



Fonte: (IEEE 802.15.4, 2011)

O procedimento de associação definido pelo padrão IEEE 802.15.4 pode ser resumido em cinco etapas básicas (AYOUB; OUNI, 2013):

- O novo dispositivo que deseja ingressar na rede começa a varrer os canais para procurar coordenadores candidatos que estejam transmitindo *beacons* em sua POS. Se quadros de *beacon* são detectados, a verificação é bem-sucedida. Caso contrário, o novo dispositivo realiza outra varredura após um período de tempo;
- O novo dispositivo envia uma solicitação de associação ao coordenador selecionado. Este último responde com um ACK após o recebimento da solicitação e verifica se é apropriado permitir essa associação de acordo com seus recursos. Se permitido, o coordenador deve atribuir um endereço PAN ao dispositivo em questão;
- Após o recebimento do ACK do coordenador, o novo dispositivo define um temporizador  $T\_ResponseWaitTime$  para aguardar o processamento da solicitação de associação;
- Quando o temporizador  $T\_ResponseWaitTime$  expira, o novo dispositivo envia um comando de solicitação de dados ao coordenador. Este último responde com um ACK imediatamente após o recebimento do pedido e, em seguida, envia o comando de resposta de associação para o dispositivo em questão. Quando o novo dispositivo recebe o comando de resposta de associação, ele envia um ACK ao coordenador selecionado.

O procedimento de associação é realizado apenas em dois casos: quando um novo nodo deseja ingressar na rede e quando um nodo associado perde a sincronização com seu nodo pai e se torna um dispositivo órfão. Um dispositivo é considerado órfão nos seguintes casos: o dispositivo perde a sincronização com seu nodo pai ou há falhas repetidas de comunicação nas solicitações de transmissão de dados entre o dispositivo e seu nodo pai. A subcamada MAC define a constante  $aMaxFrameRetries$  para especificar o número máximo permitido de novas tentativas após uma falha de transmissão. Uma perda de associação com um coordenador requer uma operação de varredura órfã (*orphan scan*) durante a qual o nodo executa

o procedimento de realinhamento para realocar seu nodo pai anterior. Este procedimento é acionado se o nodo falhar em ouvir quatro *beacons* consecutivos de seu coordenador atual. Se esta etapa falhar, o nodo iniciará um novo procedimento de associação, fazendo uma varredura ativa ou passiva.

No padrão IEEE 802.15.4, as camadas superiores acionam o procedimento de associação de nodos. Para iniciar uma associação, um dispositivo final precisa conhecer o canal físico da PAN, o identificador do coordenador (ID), o modo de endereçamento e o identificador PAN ID. Em redes padrão IEEE 802.15.4 com *beacon* e sem *beacon*, os dispositivos finais descobrem o coordenador usando a varredura passiva e ativa. Na varredura passiva, os nodos apenas ouvem o meio físico à procura de *beacons*, enquanto na varredura ativa, o comando explícito de solicitação de *beacon* é transmitido para se encontrar um coordenador. Depois de receber um ou mais *beacons* a associação com o respectivo coordenador é iniciada (FAISAL BASHIR; JAE-YOUNG, 2013).

A transmissão dos comandos do processo de associação é realizada usando o protocolo CSMA/CA, sem prioridade. Para a transmissão desses comandos, um coordenador ou um nodo também deve disputar o acesso ao meio físico com outros tipos de transmissões. Assim, os nodos passam mais tempo transmitindo comandos de solicitação de associação e, além disso, o coordenador gasta mais tempo transmitindo uma resposta de associação, caso ocorram muitas colisões. Portanto, uma definição adequada dos parâmetros do protocolo CSMA/CA pode reduzir significativamente a duração do procedimento de associação.

### **3.3.6 O mecanismo de desassociação**

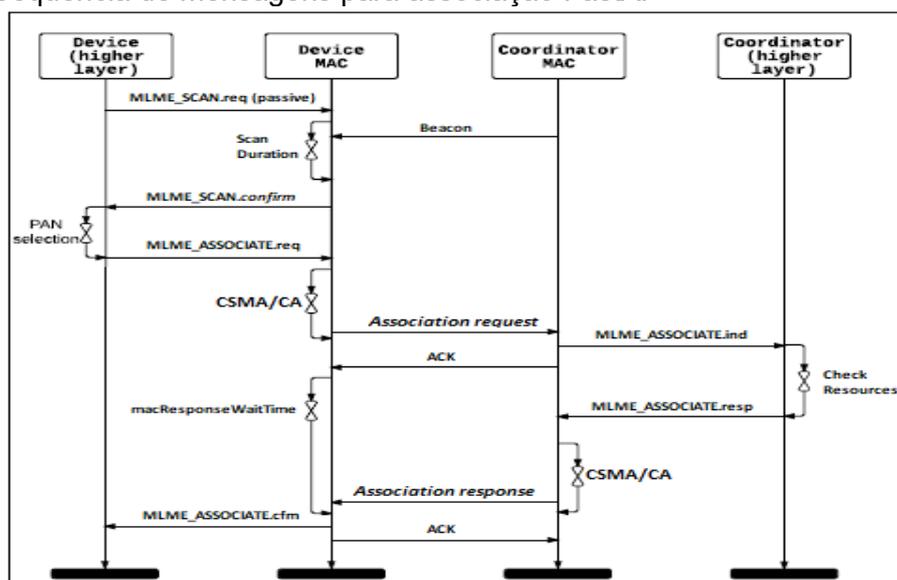
No padrão IEEE 802.15.4, quando um coordenador solicita a desassociação, o MLME do coordenador envia o comando desassociação para o dispositivo usando transmissão direta ou indireta. No caso de transmissão indireta, o comando deve ser adicionado à lista de transações pendentes armazenadas no coordenador e extraídas a critério do dispositivo. Se o dispositivo não receber o comando com sucesso, o coordenador deve considerar o dispositivo desassociado. Caso contrário, o MLME

envia a notificação de desassociação diretamente ao dispositivo. Nesse caso, se o comando de desassociação não puder ser enviado devido a uma falha de acesso ao canal, a subcamada MAC notificará a próxima camada superior. Se a transmissão direta ou indireta falhar, o coordenador deverá considerar o dispositivo desassociado. Quando um nodo associado quiser deixar uma PAN, o MLME do nodo enviará o comando de desassociação ao seu coordenador. Se o comando de desassociação não puder ser enviado devido a uma falha de acesso ao canal, a subcamada MAC notificará a camada superior. Se o nodo não receber o reconhecimento da solicitação de desassociação, o nodo será considerado desassociado da PAN.

### 3.3.7 O adendo IEEE 802.15.4e

O procedimento de associação padrão IEEE 802.15.4 engloba um atraso significativo. Uma das razões é o fato de que o dispositivo deve aguardar até o final do *macResponseWaitTime* antes de solicitar os dados da associação ao coordenador (KURUNATHAN; SEVERINO; KOUBAA; TOVAR, 2018). Para resolver este problema, a emenda IEEE 802.15.4e introduziu um mecanismo de associação rápida denominado FastA (IEEE 802.15.4e, 2012). O diagrama de sequência de mensagens do processo de associação FastA é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Sequência de mensagens para associação FastA.



Fonte: (IEEE 802.15.4e, 2012).

Quando um nodo não associado à PAN deseja iniciar o processo utilizando o FastA, o mesmo deve enviar um comando de pedido de associação para um coordenador indicando o uso deste mecanismo. A grande diferença para o tipo convencional de associação está na forma como o coordenador encaminhará a resposta do comando de pedido de associação para o nodo. Na associação padrão, quando o coordenador gera o comando de resposta de associação, este comando é enviado de forma indireta, ou seja, o quadro de comando resposta de associação será adicionado à lista de transações pendentes, armazenadas no coordenador e encaminhado ao nodo quando possível ou quando o nodo enviar um comando de solicitação de dados ao coordenador. Já no FastA, quando o coordenador gera o comando de resposta de associação, o comando é enviado ao nodo de forma direta, sem esperar que o nodo faça uma solicitação de dados ao coordenador, reduzindo o tempo do processo de associação.

### 3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este Capítulo apresentou sucintamente o padrão IEEE 802.15.4, sua arquitetura e topologias de rede disponíveis bem como o protocolo de acesso ao meio e o mecanismo de associação. Estas definições são imprescindíveis à compreensão das possibilidades de melhorias apresentadas nesta tese. O Capítulo 4 apresenta um estudo sobre interferência entre redes sem fio de curta distância.

## 4 INTERFERÊNCIA ENTRE REDES SEM FIO

### 4.1 APRESENTAÇÃO

O contexto desta tese se insere em monitoramento em áreas abertas, portanto, a possibilidade de interferência entre redes que utilizam o mesmo canal é significativa. Dessa forma, com vistas a avaliar o impacto entre redes sem fio heterogêneas, este Capítulo apresenta uma versão estendida do artigo publicado em CASAGRANDE; NEGRI; CECHINEL; MONTEZ *et al.* (2016). Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a interferência entre diferentes redes sem fio, bem como uma avaliação experimental, demonstrando o impacto das redes padrão IEEE 802.11 sobre as redes IEEE 802.15.4.

Na Seção 3.3 foi abordado de forma mais detalhada o padrão IEEE 802.15.4, principal interesse desta tese. A seguir, são apresentados os demais padrões de redes sem fio, principalmente os relacionados às redes locais (WLAN: *Wireless Local Area Network*) e redes de área pessoal (WPAN: *Wireless Personal Area Network*), abordando principalmente suas respectivas camadas físicas, bem como a coexistência entre elas.

### 4.2 PADRÕES DE REDES SEM FIO

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) define as camadas física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) de seus padrões. Para cada conjunto de protocolos, alianças de companhias trabalham para desenvolver especificações para as camadas superiores (e.g. rede e aplicação) bem como requisitos de segurança e qualidade de serviço, com a finalidade de definir produtos de mercado (JIN-SHYAN; YU-WEI; CHUNG-CHOU, 2007). É o caso da *Wi-Fi Alliance* no padrão IEEE 802.11, o *Bluetooth SIG (Special Interest Group)* no padrão IEEE 802.15.1, *WiMedia Alliance* e *UWB Forum* no padrão IEEE 802.15.3, *ZigBee Alliance* no padrão IEEE 802.15.4 e a *MedWin Alliance* no padrão IEEE 802.15.6.

Em diversos países, a utilização do espectro de rádio é regida através de órgãos reguladores, os quais definem a alocação de largura de banda para a radiodifusão (ex. TV e rádio digital), operadores de telecomunicações, forças armadas e demais usos. Diante de perspectivas de uso individual e específico de canais de

radiofrequência (RF), essas organizações reservam algumas faixas de frequência para serem usadas de forma mais flexível. As faixas reservadas mais comumente utilizadas são as frequências entre 902 MHz a 5925 GHz, que normalmente são divididas em três segmentos de espectro denominados de bandas ISM: 902 MHz a 928 MHz, 2.400 MHz a 2.483,5 MHz e 5.725 MHz a 5.850 MHz (ITU, 2012). O uso das ISMs é regulado segundo vários acordos e permissões dependendo da região ou País de utilização (AZMI; KAMARUDIN; MAHMUDDIN; ZAKARIA *et al.*, 2014). Em ITU (2012) encontra-se a regulamentação de uso de rádio adotada na Conferência Mundial de Rádio Comunicação de 2012, incluindo resoluções e recomendações para uso geral. Em ANATEL (2005) pode-se verificar a regulamentação no Brasil nesta faixa de frequência.

Nos últimos anos houve um crescimento vertiginoso de bandas ISM para diversos dispositivos de baixo consumo e curto alcance, tais como em telefones sem fio, alarmes veiculares, enlaces ponto-a-ponto privados, dispositivos *Bluetooth*, micro-ondas e redes locais sem fio. Por conseguinte, a principal desvantagem do uso de bandas ISM é a interferência gerada pelos vários dispositivos que as utilizam em um mesmo ambiente. Dispositivos que operam nesta faixa de frequência usam diferentes padrões e protocolos e cada um deles propõe formas diferentes de mitigar interferência. Os principais desafios para se resolver esses problemas estão relacionados com as diferenças existentes nas camadas físicas dos dispositivos (AZMI; KAMARUDIN; MAHMUDDIN; ZAKARIA *et al.*, 2014).

#### **4.2.1 Os Padrões IEEE 802.11 WLAN**

Dentre as tecnologias de redes sem fio, a mais amplamente difundida é a de redes locais sem fio ou WLAN padronizada pelo IEEE como IEEE 802.11 (BANERJI; CHOWDHURY, 2013). Com a primeira versão aprovada em 1997, o padrão IEEE 802.11 foi idealizado para redes locais sem fio em pequenos ambientes. Embora o padrão inicial permitisse taxas de no máximo 2Mbps, novos padrões para a camada física foram desenvolvidos, muitos mantendo a camada de enlace inalterada e ampliando a taxa de transmissão, além de incluir novas características como

segurança e qualidade de serviço (QoS). Dos padrões posteriores na família IEEE 802.11, o IEEE 802.11b aumentou a taxa de dados para 11 Mbps, o IEEE 802.11a e IEEE 802.11g para 54 Mbps.

Mecanismos adicionais foram desenvolvidos para remediar os problemas de segurança e de suporte à QoS dos padrões anteriores como IEEE 802.11i e IEEE 802.11e, respectivamente. O padrão IEEE 802.11n visa suportar taxas de dados de até 540 Mbps e utilizar os mecanismos de QoS introduzidos pelo padrão IEEE 802.11e. Os padrões mais recentes como IEEE 802.11ac propõe atingir taxas ainda mais altas de transferência de dados, operando abaixo dos 6 GHz. Fornecedores de chipsets que desenvolvem dispositivos WLAN com base no padrão IEEE 802.11 formaram o consórcio *Wi-Fi Alliance* para a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes empresas. Atualmente, os termos IEEE 802.11 e Wi-Fi são usados alternadamente na literatura. Os padrões mais comuns que pertencem à família IEEE 802.11 estão na Tabela 3.

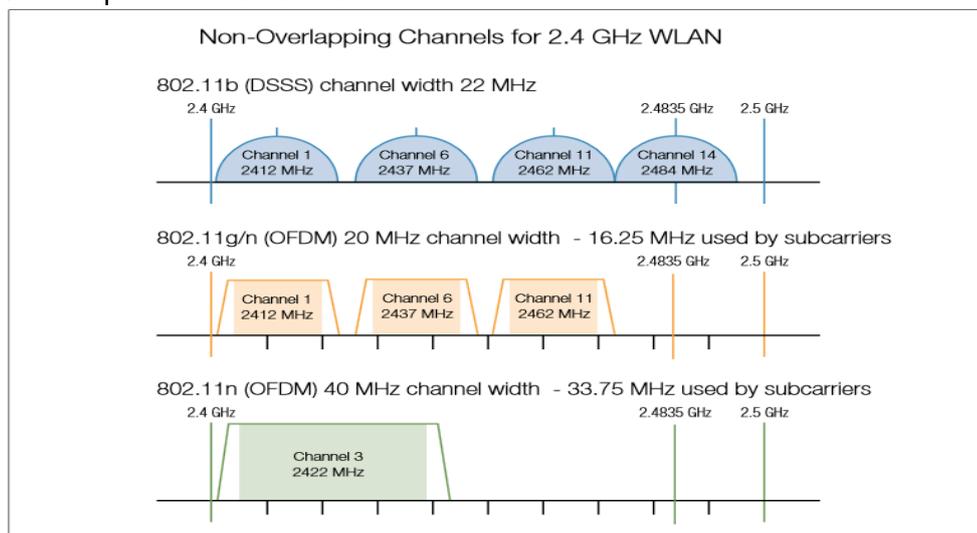
Tabela 3 – Comparativo dos padrões IEEE 802.11.

Padrão	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ad	802.11ax
<b>Publicação</b>	1997	1999	1999	2003	2009	2014	2012	2018
<b>Velocidade (Mbps)</b>	2	11	54	54	300 / 600	1300 / 7000	7000	10000
<b>Modulação</b>	DSSS FHSS	OFDM	HR-DSSS CCK PBCC*	OFDM CCK-OFDM*	MIMO-OFDM	MU-MIMO	OFDM	4 MIMO-OFDA
<b>Frequência (GHz)</b>	2,4	2,4	5	2,4	2,4 / 5	2,4 / 5	60	5
<b>Canal (MHz)</b>	20	20	20	20	20 / 40	80 / 160	2160	80 / 160

Fonte: do autor

O padrão IEEE 802.11 inclui três camadas físicas: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e IR (*Infrared*) (HEEGARD, 2002; KURAN; TUGCU, 2007). Além destas camadas, algumas outras extensões foram sendo criadas nas demais padronizações da família IEEE 802.11, como HR-DSSS (*High Rate Direct Sequence Spread Spectrum*) no IEEE 802.11b, OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) no IEEE 802.11a e no IEEE 802.11g (IEEE 802.11, 2012). A disponibilidade de canais difere de um País para outro, sendo que no Brasil são utilizados 11 canais, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Frequência dos canais.



Fonte: Internet.

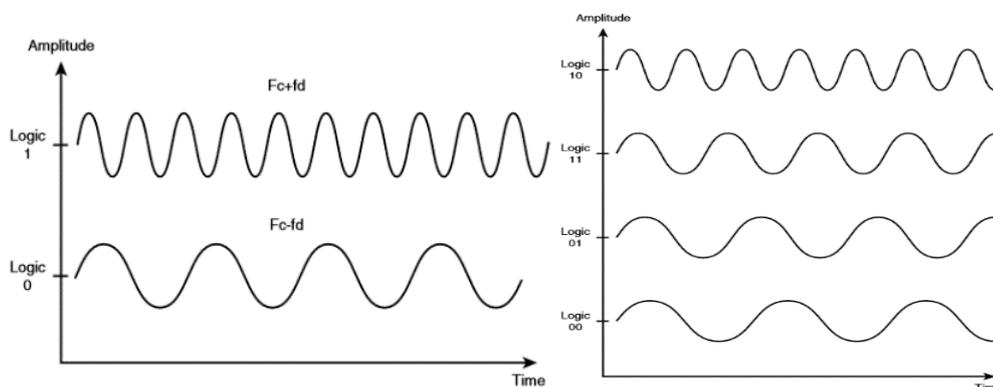
O padrão IEEE 802.11n também opera com a técnica de modulação OFDM incluindo um mecanismo que permite o uso de várias antenas (MIMO – *Multi Input Multi Output*) (BANERJI; CHOWDHURY, 2013). A maioria das extensões operam na frequência de 2,4 GHz exceto IEEE 802.11ac que opera em 5GHz, com 14 canais distintos, sendo este último desenvolvido especificamente para o Japão no padrão IEEE 802.11j (IEEE 802.11ac, 2013).

As técnicas de espalhamento de espectro têm muitas propriedades que as tornam adequadas para o uso de rádio móvel. A vantagem mais importante é sua capacidade inerente de rejeição à interferência. Como cada usuário recebe um código exclusivo, o receptor pode separar cada usuário com base em seus códigos, embora ocupem o mesmo espectro a todo momento. Isso implica que, até um certo número de usuários, a interferência entre os sinais usando a mesma frequência é desprezível (RAPPAPORT, 2009).

O espalhamento de sinal por salto de frequência (FHSS) no padrão IEEE 802.11 utiliza a função GFSK (*Gaussian Frequency Shift key*) para transmissão dos

sinais lógicos (0/1) variando a frequência da portadora<sup>3</sup>. Esta técnica funciona com dois níveis para transmissão a 1Mbps e com quatro níveis para transmissão a 2 Mbps, conforme a Figura 11.

Figura 11 – FHSS de 2 e 4 níveis.



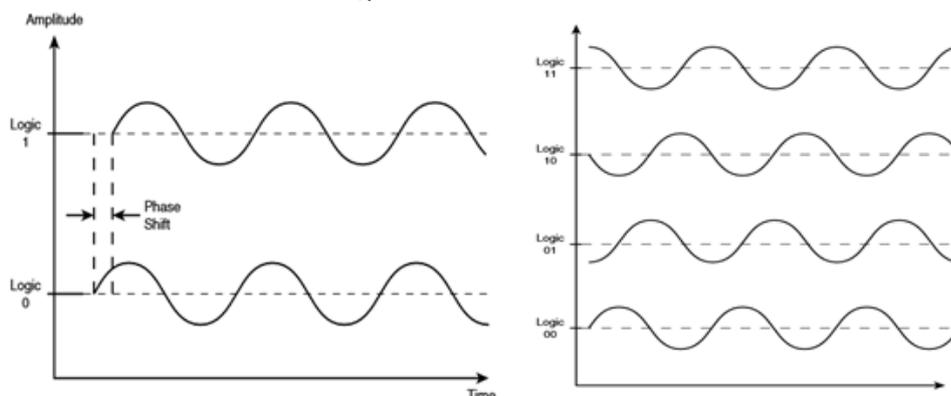
Fonte : (GEIER, 2001).

O espalhamento de espectro por sequência direta (DSSS) utiliza técnicas de modulação diferentes dependendo da taxa de transmissão. Para 1Mbps utiliza a técnica de modulação de chaveamento binário por deslocamento de fase DBPSK (*differential binary phase shift keying*) variando a fase<sup>4</sup> da frequência da portadora para transmissão dos sinais lógicos (0/1). Para uma taxa de 2 Mbps utiliza a técnica de modulação de chaveamento por deslocamento de fase em quadratura DQPSK (*differential quadrature phase shift keying*) o que possibilita enviar a 1 Mbps dois sinais lógicos por vez, dobrando a taxa de dados (*data rate*) mantendo a taxa de transmissão (*baud rate*), conforme a Figura 12.

<sup>3</sup> Ruídos normalmente afetam a amplitude do sinal e não a frequência, portanto o uso do GFSK reduz o potencial de interferência no sinal.

<sup>4</sup> Ruídos normalmente alteram a amplitude do sinal e não a fase, portanto o uso do DBPSK e DQPSK reduzem o potencial de interferência no sinal.

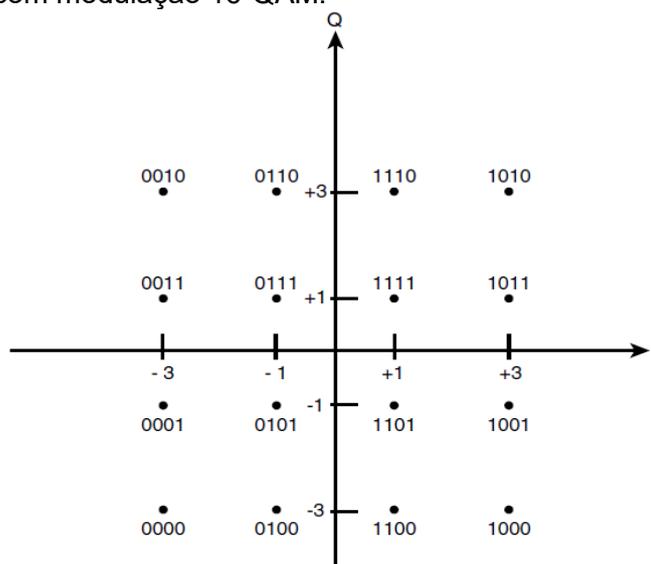
Figura 12 – DSSS com DBPSK e DQPSK.



Fonte: (GEIER, 2001).

O espalhamento de sinal por sequência direta de alta taxa HR-DSSS (*High Rate Direct Sequence Spread Spectrum*) conhecido como padrão IEEE 802.11b incluiu uma função complementar CCK (*Complementary Code keying*) elevando as taxas de transmissão para valores de 5,5Mbps e 11Mbps, sendo esta uma das implementações que se tornou um padrão consolidado usado em larga escala. Este veio a ser suplantado pelo IEEE 802.11g com taxas de até 54Mbps e modulação de multiplexação ortogonal por divisão de frequência OFDM (IEEE 802.11, 2012). O OFDM opera na faixa de 5GHz com taxas de até 54Mbps, implementados no padrão IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n (neste último com função MIMO) e no padrão IEEE 802.11ac com função MU-MIMO (*Multiuser MIMO*). Os benefícios da OFDM são a alta taxa espectral, resiliência a interferência RF e baixa distorção, permitindo a sobreposição de subcanais aumentando a eficiência espectral. A camada física OFDM utiliza três técnicas de modulação dependendo da taxa de dados: BPSK (6-9 Mbps), QPSK (12-18 Mbps), 16-QAM (24-36 Mbps) e 64-QAM (36-54 Mbps) (GEIER, 2001). A Figura 13 ilustra o OFDM com modulação 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

Figura 13 – OFDM com modulação 16-QAM.



Fonte: (GEIER, 2001).

#### 4.2.2 Os Padrões IEEE 802.15 WPAN

O IEEE 802.15 é um grupo de trabalho do IEEE pertencente ao comitê de padronização IEEE 802 que especifica o padrão WPAN (*Wireless Personal Area Network*). Os padrões IEEE 802.15 definem os protocolos de interconexão de dispositivos via comunicação por rádio em uma rede de área pessoal ou de curto alcance WPAN.

As WPAN são usadas para transmitir informações em pequenas distâncias em grupos privados com número reduzido de dispositivos participantes e, ao contrário das WLAN envolvendo pouca ou nenhuma infraestrutura. Isto permite soluções pequenas, de baixo custo e eficientes para uma vasta gama de dispositivos (IEEE 802.15.1, 2005).

Dentre os padrões internacionais definidos e adotados para redes de área pessoal, destacam-se as redes no padrão IEEE 802.15.1 conhecidas como Bluetooth<sup>5</sup> (IEEE 802.15.1, 2005); as redes pessoais de altas taxas no padrão IEEE 802.15.3 denominadas HR-WPAN (*High Rate Wireless Personal Area Network*) (IEEE 802.15.3, 2003); as de baixa taxa de transmissão no padrão IEEE 802.15.4 denominadas LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*) (IEEE 802.15.4,

<sup>5</sup> Bluetooth foi desenvolvido inicialmente pela Ericsson em 1994 originalmente para substituir a interface RS-232 cabeada para interligar dispositivos e periféricos sem fio.

2011) e as redes de área corporal WBAN (*Wireless Body Area Network*) no padrão IEEE 802.15.6 (IEEE 802.15.6, 2012).

#### 4.2.2.1 O Padrão IEEE 802.15.1

O IEEE 802.15.1 é um padrão baseado no grupo de interesse especial (SIG: *Special Interest Group*) do IEEE que especificou o Bluetooth e que utiliza tecnologia de rádio na banda não licenciada de 2,4 GHz para comunicação entre dispositivos fixos e móveis de curto alcance (IEEE 802.15.1, 2005). O objetivo original do Bluetooth era substituir as soluções cabeadas fornecendo uma interface universal para a comunicação entre dispositivos e periféricos. No entanto, começou-se a utilizar esta tecnologia para conectar vários dispositivos formando as redes de área pessoal sem infraestrutura (*ad hoc*). O baixo custo, reduzido tamanho e eficiência fez com que se tornasse uma das mais difundidas tecnologias para troca de dados entre dispositivos de curto alcance (SABLE, 2014). O padrão IEEE 802.15.1 especifica a arquitetura e operação de dispositivos Bluetooth nas camadas física (PHY) e acesso ao meio (MAC) sendo as demais camadas superiores especificadas pelo grupo de interesse Bluetooth. O Bluetooth, em sua versão original 1.0, possibilitava taxas de até 1Mbps (BLUETOOTH, 2015).

A versão 1.2 introduziu a técnica de salto de frequência adaptativo; na versão 2.0 taxas de até 3Mbps (*Enhanced data rate*) e na versão 3.0 taxas de até 24 Mbps (*High Speed*), neste caso, mesclando a tecnologia IEEE 802.15.1 para negociação e tecnologia IEEE 802.11 para transmissão. Em sua versão 4.1, o padrão incluiu suporte à internet das coisas (IoT: *Internet of Things*) e baixo consumo de energia (BLE: *Bluetooth Low Energy*); e na versão 4.2 adiciona características de conectividade IP. O BLE opera na faixa de 2.4GHz com 40 canais de 2MHz e modulação GFSK suportando taxas de até 1 Mbps (CAVALLARI; MARTELLI; ROSINI; BURATTI *et al.*, 2014).

Um dispositivo Bluetooth, em conformidade com o padrão, necessita operar na faixa de rádio não licenciada (ISM) de 2.401,5 a 2.480,5 MHz usando espalhamento de espectro, salto de frequência, em *full-duplex* usando TDD (*Time Division Duplex*)

em uma taxa nominal de 1600 saltos por segundo. Ele utiliza 79 canais com largura de banda de 1 MHz com uma taxa de 1Mbps. O alcance pode variar dependendo da classe do rádio utilizado, conforme Tabela 4.

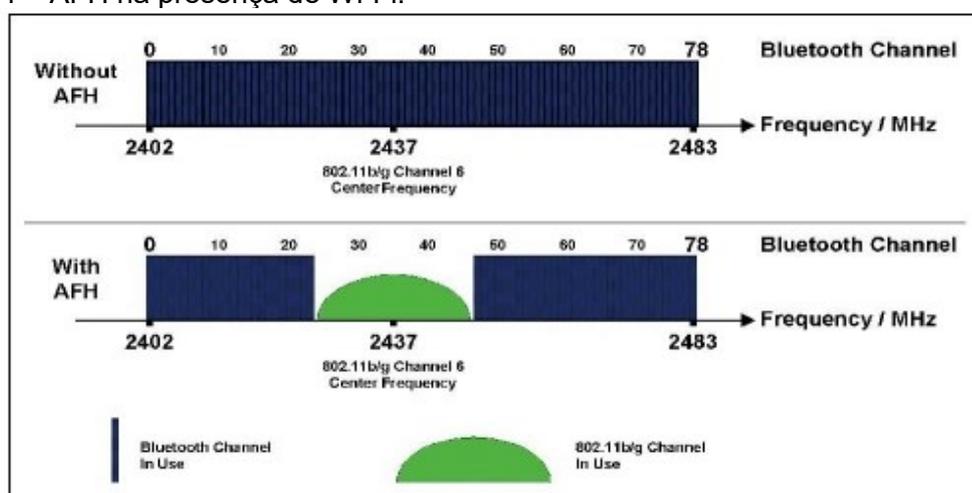
Tabela 4 – Classes de Potência.

Classe	Alcance (m)	Potência de Saída
1	100	100mW (20 dBm)
2	10	2,5 mW (4 dBm)
3	1 a 3	1 mW (0 dBm)

Fonte: (IEEE 802.15.1, 2005).

A comunicação entre dispositivos Bluetooth é realizada através do estabelecimento de um canal FHSS (*Frequency Hopping-Code Division Multiple Access*) onde o transmissor (mestre) envia um sinal em uma série pseudo-randômica de frequências. Para captar o sinal, o receptor (escravo) deve comutar os canais que utiliza para transmissão acompanhando a mesma série utilizada pelo transmissor. O dispositivo transmissor muda sua frequência 1600 vezes por segundo nos 79 canais disponíveis (opcionalmente em menos canais quando utilizar salto de frequência adaptativo), ocupando cada canal por 625  $\mu$ s (microsegundos), com o objetivo de minimizar potenciais interferências (BLUETOOTH, 2015). O uso do esquema de salto de frequência adaptativo é ilustrado na Figura 14:

Figura 14 – AFH na presença de Wi-Fi.



Fonte: Internet.

Na técnica opcional de salto de frequência denominada salto de frequência adaptativo (AFH: *Adaptive Frequency Hopping*), os dispositivos podem detectar os canais que estão sendo utilizados em sua área de cobertura, prevenindo seu uso, e conseqüentemente as interferências (IEEE 802.15.1, 2005; HODGDON, 2003). O AFH é uma técnica não colaborativa implementada em rádios *Bluetooth* para prevenir interferência, alterando dinamicamente a sequência de saltos de frequência e com isso restringindo o número de canais que os dispositivos podem atuar. Consiste de quatro mecanismos principais: identificação dos dispositivos (informa quais dispositivos suportam AFH), classificação dos canais (classifica os canais como bons ou ruins), distribuição da informação dos canais (informa aos dispositivos a classificação) e o mecanismo de salto adaptativo propriamente dito nos canais selecionados (IEEE 802.15.1, 2005).

#### 4.2.2.2 O Padrão IEEE 802.15.3 (HR-WPAN)

O IEEE 802.15.3 HR-WPAN (*High Rate Wireless Personal Area Network*) é um padrão que especifica a camada física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) para comunicação sem fio com alta taxa de transmissão para comunicação entre dispositivos fixos e móveis de curto alcance operando na faixa não licenciada. Este padrão veio complementar o que o Bluetooth não suportava: altas taxas de transmissão necessárias para aplicações de tempo real e grandes transferências de dados multimídia sem comprometer os requisitos de baixa complexidade, baixo custo e baixo consumo de energia. Ele opera com taxas de dados de 11 a 55Mbps com suporte a qualidade de serviço requerida para dados multimídia (IEEE 802.15.3, 2003). Este padrão foi estendido para o IEEE 802.15.3a o que seria uma primeira padronização para a tecnologia de banda ultra larga (UWB: *Ultra-wideband*) mas que foi descontinuado devido à falta de consenso no grupo de trabalho sobre quais técnicas de modulação utilizar. Em 2005 foi lançado o padrão IEEE 802.15.3b com o objetivo de melhorar a implementação e a interoperabilidade e aumentar a eficiência do padrão, e em 2009 o padrão IEEE 802.15.3c cujo objetivo era propor uma camada física alternativa baseada em onda milimétrica (mmW) operando em 60GHz com taxas

de dados maiores que 5Gbps. Como este padrão opera nas faixas de 3,1 a 10,6 GHz não será aprofundado no restante desta tese que aborda principalmente a operação na faixa de 2,4 GHz não licenciada.

#### 4.2.2.3 O Padrão IEEE 802.15.6 (WBAN)

Com a crescente redução do tamanho dos dispositivos eletrônicos e aumento de sua capacidade seria inevitável o seu uso para comunicação em torno de seres humanos. Alguns dispositivos são vestíveis e outros implantados para uso médico, e precisam se comunicar com outros dispositivos e seus controladores. Estes dispositivos podem ser utilizados para monitorar dados fisiológicos e ambientais em torno do corpo humano. A diversidade de aplicações médicas, esportes e entretenimento, de jogos e ambientes inteligentes trazem um conjunto de novos requisitos não contemplados pelos padrões disponíveis e em uso, portanto o padrão IEEE 802.15.6 WBAN (*Wireless Body Area Network*) foi criado para atender estes requisitos (CAVALLARI; MARTELLI; ROSINI; BURATTI *et al.*, 2014).

O IEEE 802.15.6 é um padrão que especifica a camada física (PHY) e a camada de acesso ao meio (MAC) para comunicação sem fio em curtas distâncias para uso principalmente nas proximidades ou dentro do corpo humano. Esse padrão opera com taxas de até 10Mbps com baixo consumo de energia entre dispositivos internos ou externos e com suporte à qualidade de serviço. O objetivo desta especificação é fornecer um padrão internacional para comunicação sem fio de curto alcance (área corporal), de baixíssima potência, e altamente confiável para uso dentro ou muito próximo de um corpo humano servindo para uma variedade de aplicações médicas e não médicas (ALAM; HAMIDA, 2014; KYUNG SUP; ULLAH; ULLAH, 2010). A taxa de dados tipicamente é de até 10Mbps, podendo ser oferecida para satisfazer um conjunto crescente de serviços de entretenimento e de saúde.

Convencionalmente, redes PAN não consideram questões inerentes ao uso de dispositivos muito próximos ao corpo humano ou dentro dele, e que são relevantes para aplicações na área da saúde (MOVASSAGHI; ARAB; ABOLHASAN, 2012). Elas também, usualmente, não suportam a combinação entre confiabilidade, qualidade de serviço (ex. garantia da entrega de mensagens de emergência), baixa potência, alta taxas de dados, vida útil das baterias e prevenção contra interferências, necessárias

para atender amplamente a gama das aplicações em rede de área corporal (HAYAJNEH; ALMASHAQBEH; ULLAH; VASILAKOS, 2014). Este padrão WBAN considera os efeitos das antenas em diferentes características das pessoas (ex. sexo, pele, peso), minimizando problemas de radiação (SAR: *Specific Absorption Rate*) no corpo humano e adaptando-se à mobilidade do usuário (IEEE 802.15.6, 2012).

Diversas tecnologias de rádio podem ser utilizadas para implementar uma WBAN, que depende das características do ambiente e da aplicação, tais como Bluetooth, ZigBee, UWB, RFID (*Radio Frequency Identification*), NFC (*Near Field Communication*), Sensium, Zarlink, Insteon, RuBee, Zwave e ANT, sendo as que operam na faixa de 2.4GHz: Bluetooth, ZigBee e ANT (MOVASSAGHI; ARAB; ABOLHASAN, 2012). Uma das primeiras tecnologias de rádio a serem adotadas para WBAN foi o Bluetooth, porém devido a requisitos como consumo de energia (GEORGAKAKIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS; DOULIGERIS, 2011); largura de banda e tamanho da rede (LATRÉ; BRAEM; MOERMAN; BLONDIA *et al.*, 2011), o mesmo não foi amplamente adotado. Posteriormente o BLE (*Bluetooth Low Energy*) aparecia como o mais adequado para implementação de WBAN pelo baixo consumo de energia devido ao baixo ciclo de operação. Este também não se mostrou adequado devido às aplicações na área médica terem requisitos de monitoramento contínuo e também não ser suportado por muitos fabricantes (VALLEJOS DE SCHATZ; MEDEIROS; SCHNEIDER; ABATTI, 2012). Existem muitas implementações WBAN utilizando o ZigBee devido à grande aceitação do mercado e menor consumo de energia em relação ao Bluetooth mas também não se mostrou adequado para WBAN pela baixa taxa de dados e o atraso que seriam críticos em aplicações médicas com situações de emergência (SHAH; NACHMAN; WAN, 2008).

O padrão IEEE 802.15.6 define três camadas físicas: a NB (*Narrowband*), UWB (*Ultra-Wide Band*) e a HBC (*Human Body Communications*), cada uma delas operando em uma única faixa de frequência, prevenindo interferência entre elas.

Os serviços de comunicação para implantes médicos MICS (*Medical Implant Communication Services*) utilizam uma banda licenciada de 402 a 405 MHz. Os serviços de telemetria médica sem fio WMTS (*Wireless Medical Telemetry Services*) usam uma banda licenciada entre 420 e 870 MHz. A FCC (*Federal Communications*

*Commission*) alocou 40 MHz de espectro entre 2,36 a 2,40GHz para um novo serviço denominado MBAN (*Medical Body Area Network*) ampliando as opções de frequência para uso de dispositivos médicos (FCC, 2013). Esta seria uma forma de mitigar o problema da interferência de outros dispositivos operando na faixa de 2,4 GHz (CAVALLARI; MARTELLI; ROSINI; BURATTI *et al.*, 2014). O problema destas faixas é a incapacidade de suportar aplicações com altas taxas de transmissão. Já as faixas ISM e UWB suportam este tipo de aplicação e estão disponíveis em praticamente todas as regiões do mundo (ULLAH; MOHAISEN; ALNUJEM, 2013).

Na faixa de 2,4 MHz a 2,4835MHz, a camada física NB opera utilizando 79 canais de 1MHz usando como técnica de modulação DBPSK. A camada física NB é responsável por: (a) ativar e desativar o rádio, (b) avaliar a disponibilidade do canal (CCA: *Clear Channel Assessment*), (c) transmissão e recepção de dados. Os principais mecanismos de coexistência implementados nesta camada NB são, nomeadamente: disponibilidade do canal (detecção de energia ou de portadora); mudança de canal; baixo ciclo de trabalho e potência de transmissão limitada.

#### 4.3 COEXISTÊNCIA ENTRE PADRÕES DE REDES SEM FIO

A coexistência entre padrões de redes sem fio pode ser definida como a capacidade de várias redes compartilharem o mesmo espectro de frequências sem interação ou interferência afetando o desempenho ou a transmissão e recepção de sinais. Coexistência entre dispositivos sem fio dependem basicamente de três fatores: frequência, espaço e tempo. Ela é possível nas seguintes condições: separação de frequência, distância que efetivamente diminui a relação sinal/ruído (SNR: *Signal-to-noise ratio*) e baixa ocupação do canal (LASORTE; RAJAB; REFAI, 2012).

Coexistência trata-se de uma questão importante em redes sem fio tanto que um dos primeiros esforços nesta direção foi a criação do grupo de trabalho IEEE 802.16.2 em 2001, posteriormente atualizado em 2004, que recomendou diretrizes e práticas de implementação para minimizar as interferências entre os sistemas de redes sem fio de banda larga. Em 2003 foi publicado o padrão IEEE 802.15.2 que foi revisado em 2011. Este padrão aborda a coexistência entre redes sem fio de curto alcance WLAN (IEEE 802.11b) e WPAN (IEEE 802.15.1) operando em faixas não licenciadas (IEEE 802.15.2, 2003). No mesmo ano, o padrão IEEE 802.15.4 já

recomendava práticas de coexistência com outros padrões de redes sem fio e este veio a se tornar referência de critérios para análise de interferência entre padrões e subsídio para o desenvolvimento de novos padrões. Com base no sucesso do grupo de coexistência IEEE 802.15.2, foi criado o grupo de trabalho IEEE 802.19 (IEEE802.19, 2005), cujo objetivo era assessorar o desenvolvimento dos padrões IEEE 802 que operavam em bandas não licenciadas. Este grupo deveria atuar nos fatores a serem considerados nos testes e na avaliação da coexistência de redes sem fio.

Análises para cada padrão de rede sem fio foram realizadas, mas sem uma metodologia padronizada para experimentos práticos de coexistência. Em IEEE802.19 (2005) foi apresentada uma proposta de metodologia para estimar a taxa de erro de pacotes PER (*Packet Error Rate*) causada por interferências. Esta metodologia vem sendo até então utilizada para análise de coexistência no grupo de estudos formado a partir do IEEE 802.19, denominado CUB (*Coexistence in Unlicensed Band*). Este grupo produziu diversas análises<sup>6</sup> relacionadas à coexistência dos padrões de redes sem fio. O ANSI (*American National Standard Institute*) igualmente formou um grupo de trabalho denominado ANSIC63.27<sup>7</sup> com o objetivo de criar procedimentos, métodos de avaliação e testes de coexistência para redes sem fio com base em indicadores de desempenho, porém com foco especial em dispositivos biométricos. Existem muitos fatores que afetam o nível de interferência, entre os quais a distância entre os dispositivos, o tráfego nas redes, a potência dos dispositivos, a taxa de dados, além dos diferentes tipos de informação que podem ter níveis de sensibilidade à interferência diferentes (IEEE 802.15.2, 2003). A seguir é apresentada uma revisão de trabalhos relacionados com a coexistência entre padrões de redes sem fio.

---

<sup>6</sup> Disponível em <http://grouper.ieee.org/groups/802/19/pub/ca.htm>

<sup>7</sup> Disponível em [http://www.c63.org/documents/misc/matrix/c63\\_standards.htm#C63\\_27](http://www.c63.org/documents/misc/matrix/c63_standards.htm#C63_27)

#### 4.4 TRABALHOS CORRELATOS

Existem na literatura inúmeros trabalhos sobre a coexistência entre os padrões na faixa de frequência não licenciada ISM. Muitos deles com experimentos práticos ou simulações, avaliando um ou mais padrões, em grupos ou aos pares, onde duas abordagens foram notadamente predominantes: a síncrona onde existia a cooperação entre os dispositivos e a assíncrona onde não existia a cooperação. A abordagem mais comum trata da seleção de uma tecnologia ou padrão e a análise dos efeitos das demais tecnologias sobre a mesma.

GOLMIE e MOUVEAUX (2001) realizaram uma análise probabilística da taxa de erros de pacotes *Bluetooth* na presença de redes IEEE 802.11. Os autores propuseram um modelo estimando a probabilidade de um pacote com erro ser recebido em um dispositivo Bluetooth por interferência de um dispositivo IEEE 802.11. Os autores assumem que a probabilidade de um pacote Bluetooth ser sobreposto por um pacote WLAN no tempo e na frequência depende da posição do pacote WLAN em relação ao pacote Bluetooth e as frequências de transmissão. Ambos trabalham com espalhamento de frequência, portanto existe uma probabilidade de colisões ocorrerem no mesmo tempo e frequência. Esta análise probabilística foi validada utilizando o simulador OPNET++ com tráfego de voz e dados observando pacotes perdidos e pacotes com erro apenas no receptor Bluetooth sem considerar interferência mútua. Para os testes, o cenário apresentado posiciona a fonte de interferência WLAN a 0,15 m do receptor Bluetooth e o emissor Bluetooth a 1m deste. Os resultados demonstraram que a taxa de pacotes perdidos foi cerca de 27% para tráfego de dados, e 25% para tráfego de voz, ocasionando severa degradação no desempenho da rede. Os autores concluem afirmando que os experimentos apresentam a importância da precisa definição do modelo de tráfego e distribuição a ser assumido na avaliação de interferências. Tanto a carga oferecida quanto o comprimento do pacote são parâmetros necessários para especificar completamente o sinal de interferência.

GARROPPO; GAZZARRINI; GIORDANO e TAVANTI (2011) apresentaram extensivos testes de coexistência entre redes IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.1 e IEEE 802.11, cujos objetivos foram além de apenas caracterizar a interferência mútua entre pares de tecnologias compartilhando o mesmo espectro, mas também a coexistência entre três tecnologias ativas no mesmo tempo e espaço, sendo um aspecto até então

não evidenciado. Os experimentos foram realizados em um laboratório onde os dispositivos foram posicionados nas duas extremidades distantes 9 m, combinando de diversas formas as três tecnologias. A análise iniciou observando o impacto da rede Wi-Fi sobre a ZigBee. A taxa média de perda de pacotes nos quatro canais foi de 40%. O teste de impacto da rede ZigBee sobre a Wi-Fi demonstrou que praticamente a rede Wi-Fi não foi afetada pela presença do ZigBee. Foram também realizados testes com Wi-Fi e Bluetooth demonstrando um forte impacto das redes Wi-Fi sobre o Bluetooth quando utilizada a modulação FHSS e que a técnica adaptativa (AFH) mostra-se indispensável para reduzir este impacto. Demonstrou também que a comunicação Wi-Fi essencialmente não foi afetada pela presença do Bluetooth. Ao passar para os experimentos com as três tecnologias, o primeiro teste foi com todos os transmissores em um lado da sala e todos os receptores do outro lado. As redes foram gradativamente ativadas, pela ordem: o ZigBee foi ativado e após algumas sessões o Bluetooth foi ativado, sendo que o impacto neste momento foi mínimo. Ao iniciar a transferência de dados Wi-Fi com 640 bytes de carga útil (*payload*), o desempenho das redes foi impactado levemente, o Bluetooth de 1Mbps caiu para cerca de 0,85 Mbps. Com a redução da carga útil do Wi-Fi (64 bytes) houve uma perda considerável no desempenho do Bluetooth (0,53 Mbps) e o ZigBee registrou cerca de 41% de *frames* perdidos. Concluindo os testes, os autores demonstraram que o Bluetooth e o ZigBee são fortemente afetados pela presença de comunicação Wi-Fi, mas a recíproca não é verdadeira. O cenário de pior caso ocorreu quando os transmissores Bluetooth e ZigBee ficaram próximos do receptor Wi-Fi. Outra questão importante é que o ZigBee é muito menos suscetível à posição do transmissor Wi-Fi do que o Bluetooth e ainda, o Bluetooth e o ZigBee não apresentaram problemas de coexistência significativos entre eles.

TORABI; BHATE e LEUNG (2013) propuseram uma estratégia otimizada para detectar espaços vazios em transmissões minimizando as chances de interferências de redes WLAN (IEEE 802.11) sobre WPAN (IEEE 802.15.4). Os autores afirmam que o comportamento mais agressivo da camada de enlace e alto poder de transmissão permite a WLAN ter mais vantagens no acesso ao espectro compartilhado e reforçam que em um cenário WPAN/WLAN as WPANs são mais vulneráveis à interferência.

Tipicamente as transmissões bem-sucedidas WPAN ocupam os espaços vazios (*white-spaces*) restantes da transmissão WLAN. A questão fundamental é quão frequentemente os espaços vazios com largura de banda necessária ocorrerão nas frequências ISM e se são suficientes para aplicações de tempo real ou de baixa latência. A proposta é tornar o acesso dinâmico e mais eficiente com uma implementação MAC oportunista. Os autores propuseram melhorias em métodos já demonstrados de varredura de espectro, principalmente: 1) *power-threshold*, que consiste em comparar a potência de cada fatia estreita no espectro com um valor limite sendo que nas partes do espectro onde o valor é maior que o limite, considera-se ocupada; 2) *edge sensing* que consiste em analisar o nível de energia de fatias consecutivas no espectro, onde a diferença entre elas é comparada com uma borda limite. Caso a diferença seja maior que este limite, é considerado o início de uma parte ocupada do espectro; 3) *cluster-edge sensing*, que corrige na detecção de falsos espaços vazios que a técnica *edge sensing* apresentou, classificando conjuntos de bordas como fortes e fracas, pois pequenas variações de potência para baixo poderiam ser interpretadas como final de transmissão e conseqüentemente o início de espaços vazios. Resultados estatísticos foram obtidos mostrando a disponibilidade de espaços vazios suficientes para alocar oportunisticamente transmissões baseadas no IEEE 802.15.4, coexistindo com WLANs, e comprovando a eficiência do método proposto.

TYTGAT; YARON; POLLIN; MOERMAN *et al.* (2015) apresentam extensivos testes de coexistência entre redes IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 baseados em mecanismos de prevenção com seleção de canais. Os autores explicam o conceito de interferência pelo cruzamento de tecnologias CTI (*Cross-Technology Interference*) e que prevenção por CTI significa atuar em três domínios: tempo, espaço e frequência, sendo que neste trabalho a abordagem foi pela frequência. A proposta tem foco em protocolos multicanal, tipicamente implementados para aumentar a vazão, explorando o paralelismo baseado na frequência. Foram feitas análises em uma rede de sensores sem fio ZigBee com 200 nodos sob interferência de uma rede Wi-Fi em uma área de 1600m<sup>2</sup>. Neste trabalho, foi realizada um estudo comparativo de diferentes mecanismos de seleção de canais candidatos com base em uma nova taxonomia de protocolo multicanal, utilizando medições a partir de testes de bancada. Foram avaliadas diferentes métricas para o mecanismo mais adequado usando o mesmo

conjunto de medidas que no estudo comparativo. Por fim, verificou-se a operação da melhor métrica de seleção de canal em uma implementação de prova de conceito nos testes realizados.

Nestes experimentos foi constatado que o protocolo RDT (RDT: *Receiver Directed Transmission*) mostrou-se mais apropriado para a proposta. Os autores então propuseram um novo mecanismo de seleção de canais para o RDT e verificaram sua operação pelos mesmos experimentos práticos anteriores. Protocolos multicanal tipicamente são compostos por três grandes mecanismos: seleção de canal, escalonamento de canal e controle de canal. A taxonomia proposta tem foco somente no comportamento dos protocolos em relação ao tempo e a frequência, o que facilita, segundo os autores, uma comparação da performance dos protocolos em ambiente sobre CTI. Foram descritas quatro abordagens para mecanismos de seleção de canais nomeadamente: *follow-the-master*, *pseudorandom*, *internal metric* e *external metric*. Na primeira abordagem, o mestre de alguma maneira informa aos escravos qual o canal que deve ser utilizado, por exemplo, um cliente Wi-Fi que faz uma varredura para encontrar o canal do *Access Point* e o cliente *Bluetooth* que segue o salto de frequência do mestre. A segunda abordagem trata de uma distribuição de probabilidades do canal estar ocupado (e.g. *round robin*, mestre *Bluetooth*). Na abordagem de métricas internas é estabelecido um *ranking* de canais sem a necessidade de informação dos demais nodos (abordagem assíncrona). Como exemplo tem-se o comportamento de um *Access Point* que seleciona o canal inicial baseado em alguma métrica independente de comunicação com os clientes. Ao contrário desta, a abordagem *external metric*, necessita de informações dos clientes para calcular uma métrica (abordagem síncrona). Importante ressaltar que método de seleção de canais distribuídos podem utilizar métricas internas (e.g. RDT) ou externas (e.g. Y-MAC (KAIGUI; JUNG-MIN; RUILIANG, 2011)) enquanto que métodos centralizados por definição utilizam somente métricas externas. O protocolo RDT utiliza o mecanismo *follow-the-master* para transmitir pacotes e o *metric-based* para receber pacotes.

Com relação ao escalonamento de canais foram utilizadas também quatro abordagens distintas: *single shot*, *slotted*, *internal triggered* e *external triggered*. Na

primeira abordagem o nodo coordenador seleciona o canal no momento da inicialização. Um exemplo típico é um cliente Wi-Fi que somente pode se conectar a um único *Access Point*. A segunda abordagem em contraste com a primeira, possibilita a escolha do canal a partir de algum chaveamento interno, como por exemplo um cliente Wi-Fi que pode se conectar a múltiplos *Access Points* em múltiplas frequências dependendo da potência de sinal dos mesmos (*internal trigger*). Quando esta informação de mudança provém de outros dispositivos caracteriza-se como uma *external trigger* e, como exemplo típico da abordagem *slotted* tem-se o Bluetooth. Os cenários de experimentos foram no período noturno quando o laboratório estava vazio (*APs idle*); em seguida emulando interferências Wi-Fi controladas (4,6 Mbps e 22Mbps) e por fim no período normal de funcionamento do laboratório. Baseados nos testes realizados nestes cenários, os autores concluíram que o melhor método de prevenir interferência Wi-Fi sobre ZigBee seria a combinação do mecanismo de seleção de canal baseado em métricas internas e escalonamento baseado em trigger interno, considerando o mais apropriado para reduzir a taxa de erro de pacotes (PER) em um cenário real.

MARTELLI e VERDONE (2012) observaram a interferência dos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 caracterizados na frequência e no tempo sobre uma rede WBAN composta de nodos vestíveis que se comunicam com um nodo coordenador. Foi avaliada a performance desta rede com três camadas físicas distintas e dois algoritmos CSMA/CA padronizados. Os estudos foram baseados em um framework de um projeto Europeu denominado WiserBAN<sup>8</sup>. Para a caracterização da interferência no domínio da frequência, foram analisados o SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) para cada pacote enquanto que no domínio do tempo realizada uma simulação da camada de enlace MAC. A rede WBAN foi composta de 5 nodos sendo um coordenador, dispostos sobre uma pessoa movimentando-se em uma trajetória pré-definida numa sala de 3m x 3,5m seguindo o modelo do projeto Europeu. Como fontes de interferência, foram dispostos na sala um *Notebook*, um *Access Point* e mais 5 nodos ZigBee sendo um coordenador. Entre o coordenador ZigBee e o *Access Point* foi estabelecida uma distância de 3 metros e entre o *notebook* e os nodos ZigBee uma distância de 0,8 m.

---

<sup>8</sup> Disponível em <http://www.wiserban.eu>. Acesso em 04/06/2015.

As camadas físicas utilizadas para WBAN também foram baseadas no *framework* Europeu, nomeadamente: a) IEEE 802.15.4 com modulação MSK (*Minimum Shift Keying*) utilizando a técnica de espalhamento DSSS e com taxa 250kbps; b) Modulação MSK sem DSSS a 2Mbps; c) BLE (*Bluetooth Low Energy*) com modulação GMSK e taxa de 1Mbps. Com relação ao CSMA/CA foram utilizadas duas implementações: a do padrão IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6. Foram simulados três tipos de tráfego distintos sendo a performance avaliada pela média da taxa de pacotes perdidos PLR (*Packet Loss Rate*) que representa a probabilidade de um pacote gerado por um nodo não ser recebido pelo coordenador. Segundo os autores, PLR seria a métrica principalmente afetada pela interferência. Os testes considerando o uso da primeira camada física com CSMA/CA dos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6 demonstraram que existe um aumento da taxa de pacotes perdidos principalmente sobre interferência Wi-Fi devido ao maior tráfego em relação às redes IEEE 802.15.4. Nestas condições, o CSMA/CA do padrão IEEE 802.15.6 mostrou-se mais eficiente devido ao maior tempo que os nodos avaliam o canal, portanto, foi utilizado nos testes seguintes com as demais camadas físicas. Nos testes nas duas outras camadas físicas a degradação da performance na presença de interferência foi menos evidente pois muitos pacotes foram perdidos por problemas de conectividade. O atraso foi considerado como o tempo entre a recepção do *beacon* pelo nodo e a correta recepção do frame do nodo pelo coordenador. O consumo de energia foi considerado como uma média da energia consumida por um nodo para enviar um pacote. Os autores concluíram que, para garantir uma performance aceitável, um método apropriado de seleção de canal é de grande importância para WBANs e, dada a grande variedade de ambientes onde operam, esta seleção deve ser periódica.

SARRA; MOUNGLA; BENAYOUNE e MEHAOUA (2014) apresentam neste trabalho testes de coexistência entre redes WBAN baseadas no padrão IEEE 802.15.4 e redes padrão IEEE 802.11. Foram explorados diversos efeitos da potência de transmissão, frequência e tamanho de pacotes na performance da rede WBAN sob forte interferência e em circunstâncias reais. Foi proposto um modelo e um algoritmo adaptativo que ajusta dinamicamente seus parâmetros com os indicadores de performance recebidos. Foram coletados indicadores como potência do sinal

recebido, número de transmissões esperada ETX (*Expected Transmission*), número de saltos até o nodo sorvedouro, SNR (*Signal to Noise Ratio*), taxa de pacotes entregues e carga das baterias. Para estabelecer a interferência, a rede WBAN foi disposta próxima de uma transferência de vídeo entre um *Access Point* e um computador. Foi adotado roteamento em múltiplos saltos (*multi-hop*) com protocolo CTP (*collection tree protocol*) visando garantir a confiabilidade, conectividade e a vida útil das baterias. Os testes mostraram que uma transmissão a -25 dBm produz um altíssimo valor de ETX enquanto que a -10 dBm e 0 dBm estes valores não excederam a 3,5 transmissões esperadas. E ainda, diminuindo o tamanho do pacote e a frequência de transmissão melhorou ainda mais esta métrica. Com relação ao número de saltos, a transmissão a -25 dBm foi considerada o pior caso e novamente diminuindo o tamanho do pacote e a frequência de transmissão melhorou também esta métrica.

Com relação a taxa média de pacotes recebidos, com uma potência de -25 dBm, atingiu-se 75% e nas outras duas potências atingiu-se 100%. Diminuindo o tamanho do pacote e a frequência de transmissão manteve-se os 100%. Quanto a taxa sinal-ruído, os resultados demonstram que com o aumento da potência de transmissão obtêm-se uma melhora na taxa. Por fim, quanto a carga das baterias, os testes mostraram que a carga das baterias diminui mais rapidamente em transmissões a uma potência de 0 dBm do que nas demais, obviamente quanto menor a potência menor o consumo. Também mostrou que com 0 dBm e -10 dBm e frequência de 5 segundos consumiu menos energia que com frequência de 1 segundo e ainda os nodos mantiveram mais carga das baterias com a diminuição do tamanho dos pacotes. Concluem mostrando que o modelo teve uma boa performance da WBAN sob forte interferência.

CHENG LEONG; BOLT; SYED; NG *et al.* (2015) utilizaram o posicionamento dos nodos receptores em distâncias de 1, 10 e 19 metros sem o deslocamento da fonte de interferência, atuando em função da frequência e da distância. POLEPALLI; XIE; THANGARAJA; GOYAL *et al.* (2009), observaram a interferência mútua entre redes IEEE 802.11n e IEEE 802.15.4 variando a taxa de dados com sobreposição de canal, demonstrando a importância da taxa de ocupação do canal na análise de interferência.

Constatou-se nos trabalhos selecionados, a importância de se avaliar a interferência em várias dimensões, sejam elas em função do tempo, espaço ou a frequência, sendo que estas métricas não são observadas em um experimento único nos trabalhos encontrados. PETROVA; RIIHIJARVI; MAHONEN e LABELLA (2006) e BERTOCCO; GAMBA e SONA (2008) analisaram a interferência em função da frequência, ANGRISANI; BERTOCCO; FORTIN e SONA (2008) e TORABI; BHATE e LEUNG (2013) em função da distância, POLLIN; TAN; HODGE; CHUN *et al.* (2008) e POLEPALLI; XIE; THANGARAJA; GOYAL *et al.* (2009) em função do tempo. A seguir, é apresentada uma avaliação experimental sobre a interferência conforme o padrão IEEE 802.15.2 (IEEE 802.15.2, 2003), em um cenário que varia a distância entre os coordenadores das duas redes, o canal utilizado e a taxa de ocupação pelas redes IEEE 802.11n.

#### 4.5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

As redes IEEE 802.15.4 estão se tornando um padrão *de facto* em nodos de Redes de Sensores sem Fio (RSSF) e também tem se tornado populares por terem suas camadas físicas e de controle de acesso ao meio utilizadas como base para outras importantes redes, tais como ZigBee e os padrões industriais ISA-100.11a e WirelessHART. Tipicamente utilizam a faixa de frequência de 2.4 GHz que atualmente é amplamente ocupada por outras redes, como por exemplo Bluetooth e Wi-Fi. Neste trabalho, analisa-se a interferência das redes IEEE 802.11n sobre redes IEEE 802.15.4. A principal motivação vem do fato que as redes IEEE 802.11n são as mais utilizadas atualmente e, principalmente, porque há poucos experimentos na literatura avaliando o seu impacto causado nas redes IEEE 802.15.4 (CHENG LEONG; BOLT; SYED; NG *et al.*, 2015; LASORTE; RAJAB; REFAI, 2012; POLEPALLI; XIE; THANGARAJA; GOYAL *et al.*, 2009), sendo que não consideraram as práticas recomendadas pelo IEEE 802.15.2 (IEEE 802.15.2, 2003). Segundo esta especificação, uma análise de interferência deve considerar diversos fatores ou dimensões, nomeadamente: a distância, o tráfego nas redes, a potência dos dispositivos, a taxa de dados, além do tipo de informação a ser transmitida.

Os trabalhos encontrados na literatura focam principalmente na análise do impacto dos padrões IEEE 802.11b e IEEE 802.11g sobre as redes IEEE 802.15.4 (ANGRISANI; BERTOCCO; FORTIN; SONA, 2008; POLLIN; TAN; HODGE; CHUN *et al.*, 2008; SUBBU; SOMAN, 2014; TYTGAT; YARON; POLLIN; MOERMAN *et al.*, 2015). Além disso, na maioria das vezes somente um dos aspectos que afetam o nível de interferência é considerado. Por exemplo, GARROPPO; GAZZARRINI; GIORDANO e TAVANTI (2011) avaliaram as interferências mútuas das tecnologias Wi-Fi, ZigBee e Bluetooth, porém, com os coordenadores de cada rede posicionados com distâncias fixas, apenas alternando a posição entre transmissores e receptores em várias possibilidades de interação.

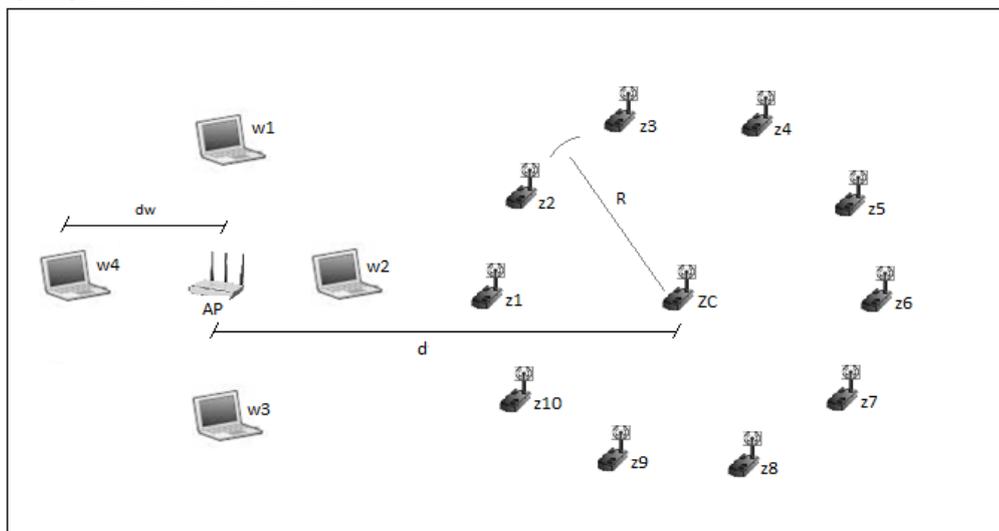
#### 4.5.1 Cenário

Este experimento foi realizado em um laboratório livre de interferência de outras redes para evitar distorções nos dados provenientes de outras fontes. Para tanto, varreduras frequentes, utilizando um analisador de tráfego, foram realizadas para garantir a inexistência de outras redes sem fio. Foram estabelecidos os seguintes cenários de testes:

- a) Rede IEEE 802.15.4 sem a presença de redes de interferência;
- b) Rede IEEE 802.15.4 operando em canal sobreposto com uma rede IEEE 802.11n;
- c) Rede IEEE 802.15.4 operando em canal não sobreposto com uma rede IEEE 802.11n.

A rede foi implementada no padrão IEEE 802.15.4 com 10 nodos (z1-z10) transmitindo dados a uma taxa máxima até um nodo coordenador (ZC). Os nodos foram organizados em topologia estrela com distância fixa entre os nodos e o coordenador ( $R = 1$  metro), e uma rede padrão IEEE 802.11n estruturada, com quatro nodos e um Access Point (AP) como nodo central a uma distância ( $d_w = 1$  metro), conforme a Figura 15.

Figura 15 – Cenário de Testes.



Fonte: do autor.

Na inicialização da rede, o coordenador envia uma mensagem a todos os nodos indicando o início do monitoramento das mensagens recebidas. A partir desta mensagem a rede de interferência é ativada e os nodos iniciam o envio das mensagens. Os nodos atuaram no modo de saturação onde as mensagens foram enviadas em intervalos de tempo de 250 ms com *payload* de 100 bytes até um máximo de 500 pacotes por nodo, totalizando em cada experimento 5000 pacotes, enviados a uma taxa média de 42,5 Kbps. Para eliminar os problemas de perdas e atrasos devidos a oscilações das cargas das baterias dos nodos, estes foram alimentados por uma fonte externa e contínua de +5V.

O nodo coordenador foi ligado a um computador via porta USB para coleta dos dados. Os dispositivos XBee foram conectados a uma plataforma de prototipação de código aberto Arduino UNO R3 com placa microcontroladora baseada no ATmega328P com 32 KB de memória flash, sendo que para o coordenador da rede foi utilizado o Arduino MEGA2560 com placa microcontroladora ATmega2560 com 256 KB de memória flash. Esta opção foi determinada após sucessivos testes, variando a quantidade de nodos entre 1 e 10 para determinar o conjunto ideal de parametrizações que possibilitassem a recepção e processamento dos pacotes além da execução da aplicação pelo nodo coordenador para o cenário proposto. Foram observadas limitações dos dispositivos XBee, que em sua especificação oferece

comunicação serial a 115200 baud, mas, em testes realizados com apenas 1 nó e o coordenador não foi possível obter taxa maior que 57600 baud sem perda de dados. A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados na rede IEEE 802.15.4.

Tabela 5 – Parâmetros da Rede IEEE 802.15.4.

<b>Dispositivo</b>	Digi XBee Series 1
<b>Frequência</b>	2,4 GHz
<b>Modulação</b>	O-QPSK
<b>Taxa Transmissão</b>	250 kbps
<b>Potência</b>	0 dBm
<b>Canais</b>	22 (centro em 2.460 MHz) 26 (centro em 2.480 MHz)
<b>Sensibilidade</b>	-85 dBm
<b>Taxa de Dados</b>	250 ms
<b>Quantidade de Dados</b>	100 bytes
<b>Tamanho do Pacote</b>	133 bytes
<b>Modo</b>	sem <i>beacon</i>
<b>ACK</b>	Ativado

Fonte: do autor.

Como fonte de interferência foi implementada uma rede padrão IEEE 802.11n injetando um tráfego UDP de 1500 bytes com taxas de 10, 20 e 30 Mbps. Esta taxa foi dividida em dois fluxos de dados entre as estações w1, w3 e w2, w4 (Figura 15). Este tráfego foi gerado utilizando a ferramenta de simulação iPerf<sup>9</sup>.

Nesses experimentos foram avaliadas a taxa de perda de pacotes, o atraso fim-a-fim e a potência do sinal recebido RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). Estas métricas foram obtidas a partir do nó coordenador da rede IEEE 802.15.4, sendo a taxa de perda média definida como a porcentagem de pacotes transmitidos que não chegaram ao coordenador, devido principalmente, ao atraso excessivo, colisões e congestionamento. O atraso fim-a-fim foi obtido a partir da média de tempo entre o envio de uma mensagem do nó para o coordenador e a chegada do seu reconhecimento (ACK). Para obter esta medida, a partir de cada nó foi enviada uma

<sup>9</sup> <http://www.iperfwindows.com/>

mensagem inicial para o coordenador para obter o primeiro tempo de envio/recepção calculando assim o atraso. Para cada nova mensagem foi enviado junto ao *payload* o atraso fim-a-fim do pacote anterior, sendo ao final obtida a média do atraso de todos os pacotes no coordenador. A potência média do sinal recebido foi obtida a partir de uma função disponível no próprio dispositivo XBee do coordenador. Foi também registrada a perda por nodo com o objetivo de verificar o comportamento dos mesmos em relação à distância do AP. A Tabela 6 apresenta os parâmetros para a rede IEEE 802.11n.

Tabela 6 – Parâmetros da Rede IEEE 802.11n.

<b>Dispositivo</b>	Draytek Vigor 2130vn
<b>Frequência</b>	2,4 GHz
<b>Modulação</b>	MIMO-OFDM
<b>Largura do Canal</b>	20/40MHz
<b>Taxa de Dados</b>	300 Mbps
<b>Sensibilidade</b>	-66 dBm
<b>Canal</b>	11 (centro em 2.462 MHz)
<b>Tipo de Pacote</b>	UDP
<b>Tamanho do</b>	1500 bytes

Fonte: do autor.

#### 4.5.2 Resultados

Em cada cenário proposto, os testes foram repetidos 10 vezes para cada distância (d) entre o AP e o nodo coordenador (1, 2, 4 e 8m) e também para cada carga de tráfego Wi-Fi entre as estações (10, 20 e 30 Mbps). Os dados foram coletados a partir do coordenador da rede IEEE 802.15.4 após cada repetição.

##### 4.5.2.1 Redes IEEE 802.15.4 em ambiente livre de interferência

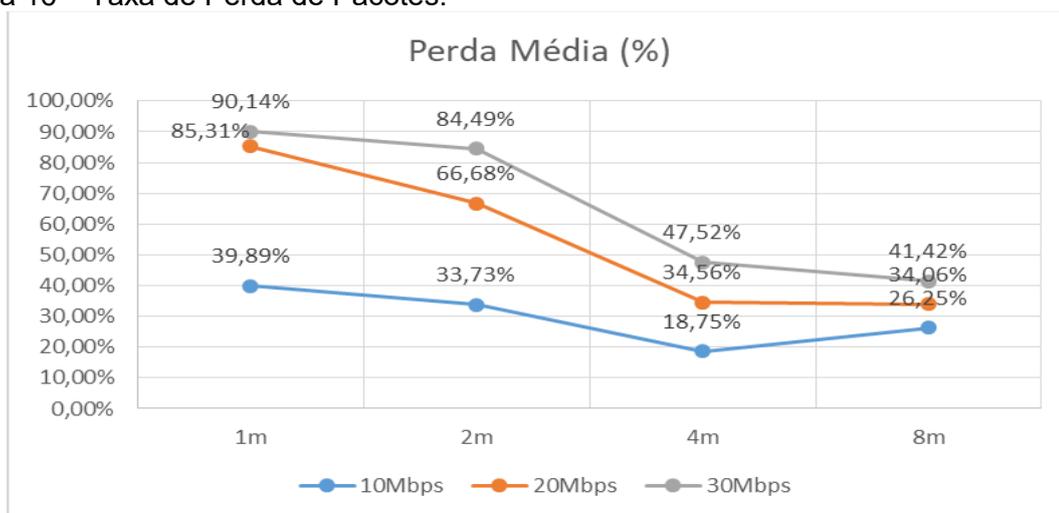
Inicialmente foi implementada uma rede padrão IEEE 802.15.4 sem a presença de outras redes, executando-se os testes para se obter um referencial de comportamento desta rede em um ambiente livre de interferência. Os resultados

obtidos mostram que a rede IEEE 802.15.4 sem a presença de redes Wi-Fi, apresentou uma taxa de perda média de pacotes de 12,07% com desvio padrão de 0,038; um atraso médio fim-a-fim de 4,76 ms com desvio padrão de 0,2375 e potência do sinal recebido média de -51,19 dBm com desvio padrão de 0,087. Estes valores de desvio padrão corroboram com a metodologia adotada e comprovam que 10 repetições são suficientes para a análise de cada cenário proposto, pois, o erro obtido com este número de repetições é relativamente baixo. Por exemplo, para um intervalo de confiança de 95%, o erro para a taxa de perda média de pacotes no ambiente livre de interferências é de  $\pm 0,0235$  % e; para o atraso médio fim-a-fim o erro é de  $\pm 0,147$  ms. Valores desta mesma ordem foram obtidos nos demais cenários e, portanto, não farão parte da discussão apresentada.

#### 4.5.2.2 Redes IEEE 802.15.4 em canal sobreposto

Neste cenário foi introduzida a rede Wi-Fi posicionando o AP nas distâncias estabelecidas com a injeção de tráfego UDP entre as estações, avaliando-se desta forma a rede IEEE 802.15.4 sob interferência. Os canais utilizados foram o canal 22 (2460 MHz) nos nodos IEEE 802.15.4 e o canal 11 (2462 MHz) nas estações IEEE 802.11n. A Figura 16 apresenta a taxa de perda média de pacotes.

Figura 16 – Taxa de Perda de Pacotes.



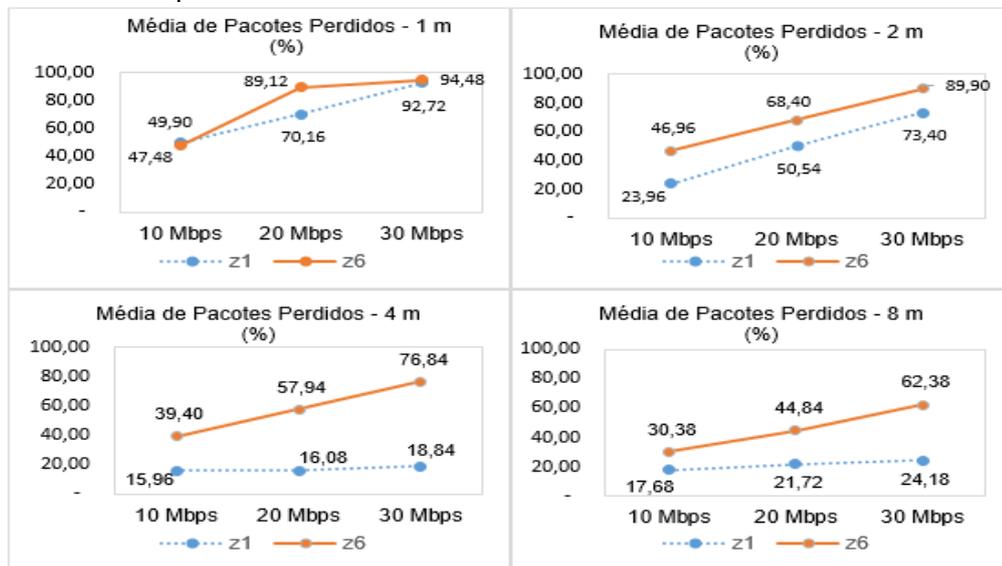
Fonte: do autor.

Os resultados demonstram que o funcionamento de uma rede IEEE 802.15.4 é altamente influenciado por uma rede Wi-Fi operando na mesma área de cobertura e

com canal de comunicação sobreposto. Observa-se na Figura 16, que a taxa de perda de pacotes diminui na medida em que a distância entre o AP e o coordenador IEEE 802.15.4 aumenta, além disso, esta taxa também aumenta na medida que a rede Wi-Fi gera mais tráfego. Portanto, a perda de pacotes está diretamente relacionada com a distância da rede de interferência bem como a ocupação do canal Wi-Fi.

A Figura 17 apresenta o comportamento do nodo da rede IEEE 802.15.4 posicionado mais próximo do AP da rede Wi-Fi (z1) e do nodo mais distante (z6).

Figura 17 – Taxa de perda dos nodos z1 e z6.



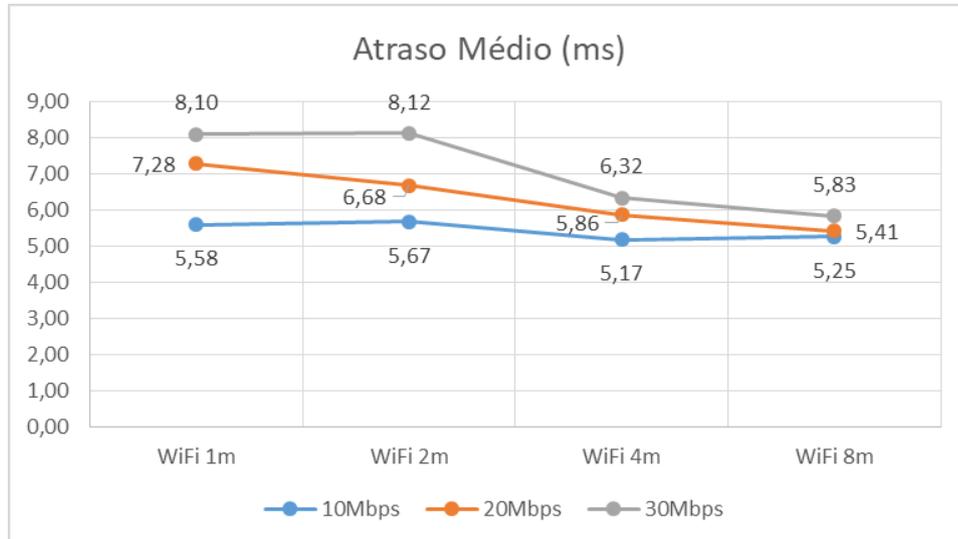
Fonte: do autor.

Pode-se constatar que o nodo mais distante do AP sofreu maior influência da rede de interferência, e isto se explica porque o nodo z6 estando mais distante do AP demora mais tempo para detectar que uma transmissão Wi-Fi está em curso e faz mais tentativas de transmissão com insucesso, pois quanto maior a distância maior o tempo de propagação, então pode-se concluir que, ao contrário do coordenador, os nodos mais próximos das fontes de interferência sofreram menos impacto no envio de pacotes.

Na Figura 18, pode-se verificar o comportamento da rede em relação ao atraso fim-a-fim. Atrasos maiores foram observados com a proximidade do AP e com o aumento do tráfego Wi-Fi. Considerando-se o atraso fim-a-fim médio da rede IEEE

802.15.4 sem interferência Wi-Fi de 4,76 ms, a proximidade do AP e com taxas de até 30 Mbps nas estações Wi-Fi pode-se observar um aumento significativo do atraso (8,10 ms).

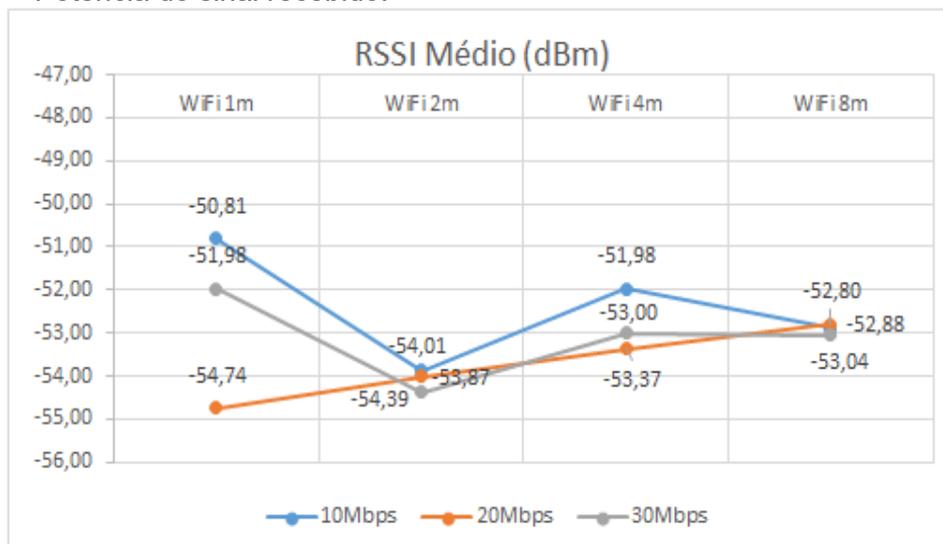
Figura 18 – Atraso fim-a-fim.



Fonte: do autor.

A Figura 19 apresenta os resultados relativos à média de potência do sinal recebido (RSSI).

Figura 19 – Potência do sinal recebido.



Fonte: do autor.

Os resultados demonstram que a qualidade do sinal diminuiu com o aumento da distância e a variação da taxa de ocupação do canal. Considerando a potência média do sinal da rede IEEE 802.15.4 sem a interferência Wi-Fi de -51,19 dBm, pode-

se observar uma redução gradativa na potência do sinal recebido com a proximidade do AP e com taxas de até 30 Mbps nas estações Wi-Fi.

#### 4.5.2.3 Redes IEEE 802.15.4 em canal não sobreposto

Para este experimento foi alterado o canal da rede IEEE 802.15.4 para uma faixa não sobreposta (2480 MHz), no canal 26. Nesta análise foi utilizado o pior cenário de interferência, ou seja, posicionando-se o AP a 1 metro do coordenador da rede IEEE 802.15.4 e com tráfego de 30 Mbps no conjunto de estações Wi-Fi. A Tabela 7 apresenta os resultados considerando canais não sobrepostos em comparação ao cenário com canais sobrepostos e ao cenário sem interferência de Wi-Fi.

Tabela 7 – Canais sobrepostos e não sobrepostos.

<b>Canal</b>	<b>Perda média (%)</b>	<b>Atraso médio (ms)</b>	<b>RSSI médio (dBm)</b>
<b>22</b>	90,14	8,10	-51,98
<b>26</b>	12,16	4,74	-49,44
<b>Sem Wi-Fi</b>	12,07	4,76	-51,19

Fonte: do autor.

Foi possível constatar que a utilização de canais sem sobreposição apresentou uma melhoria significativa na eficiência da rede IEEE 802.15.4, mesmo no pior cenário de interferência Wi-Fi analisado, com a utilização de canais não sobrepostos os resultados se assemelham ao cenário sem interferência Wi-Fi.

## 4.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este Capítulo demonstrou em experimentos práticos o impacto da interferência das redes IEEE 802.11n sobre as redes IEEE 802.15.4, considerando a distância, frequência e taxa de ocupação do canal. Foi verificada a variação na perda de pacotes, no atraso fim-a-fim e na potência do sinal recebido no coordenador da rede IEEE 802.15.4 em vários cenários. Constatou-se que a distância e a taxa de ocupação do canal são responsáveis pela degradação da rede IEEE 802.15.4, principalmente quando se usa canais sobrepostos pelos dois padrões. Os

experimentos demonstraram que quanto mais próximo o coordenador da rede IEEE 802.15.4 estiver da fonte de interferência Wi-Fi, maior será a perda de pacotes e o atraso fim-a-fim e menor a potência do sinal recebido. Observou-se que com o aumento da taxa de ocupação do canal pelo tráfego de dados das estações Wi-Fi, a taxa média de perda de pacotes e o atraso fim-a-fim aumentaram significativamente, além da redução na potência do sinal recebido RSSI pelo coordenador IEEE 802.15.4. Com a alteração do canal Wi-Fi para uma faixa não sobreposta, os resultados evidenciaram que as redes Wi-Fi não interferiram no tráfego da rede IEEE 802.15.4, pois, os resultados obtidos foram praticamente os mesmos do cenário sem interferência Wi-Fi. No entanto, com o crescimento exponencial das redes Wi-Fi, os APs são configurados ou se autoconfiguram para utilizar qualquer um dos 14 canais disponíveis, restando assim pouco ou nenhum espaço para outras redes sem sobreposição de canais. Diante disto, as soluções mais promissoras são aquelas que previnem a sobreposição de canais como por exemplo, utilizando técnicas de alocação dinâmica de canal. Por fim, observou-se os nodos individualmente, constatando-se que os nodos mais próximos do AP (z1) sofreram menos interferência que nodos mais distantes (z6) e, portanto, obtiveram melhores taxas de sucesso no envio de pacotes.

Mecanismos de coexistência, mitigação e análises de interferência entre tecnologias de redes sem fio têm sido extensivamente realizados, buscando a melhor eficiência das redes em ambientes heterogêneos. Este trabalho contribuiu apresentando resultados significativos nas três dimensões e serve como base para futuros trabalhos sobre interferência entre os demais padrões, como por exemplo IEEE 802.11ac. RSSFs estão cada vez mais presentes em diversas áreas de aplicação, e as interferências podem inviabilizar projetos que necessitam de respostas em tempo real e qualidade de serviço, como por exemplo na área da saúde. Diversos trabalhos encontrados na literatura analisaram um aspecto ou outro neste contexto de interferência e coexistência entre pares de padrões utilizando simuladores ou experimentos reais, mas ao que se observou não abordaram o conjunto de variáveis aqui apresentados em um experimento prático. Um aspecto não abordado neste trabalho foi a influência que o tipo de informação trafegada teria nos resultados, pois as informações podem ter níveis diferentes de sensibilidade à interferência. A

interferência nas faixas ISM é uma realidade em ambientes heterogêneos, e padrões de comunicação precisam ser desenvolvidos considerando estes aspectos.

O Capítulo 5 apresenta a arquitetura de comunicação proposta, os trabalhos relacionados e os experimentos práticos realizados para validação.

## 5 ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO E TESTES

### 5.1 APRESENTAÇÃO

As redes de área corporal sem fio (WBAN) necessitam atender requisitos de comunicação que dependem diretamente das aplicações, dos sensores utilizados e da infraestrutura disponível. Um dos requisitos mais importantes para monitoramento de dados clínicos de pacientes é a confiabilidade dos dados obtidos pelos sensores. A taxa de transmissão é um fator diretamente relacionado com a aplicação variando para cada grandeza monitorada. Com o objetivo de avaliar o funcionamento de uma arquitetura de comunicação para monitoramento de dados fisiológicos, na prática, foi construído um protótipo de um eletromiógrafo sem fio e uma aplicação para visualização dos sinais obtidos pelos sensores, que são descritos no Apêndice C. A infraestrutura foi planejada para atender uma aplicação de eletromiografia devido à sua crescente importância na área de fisioterapia, e, principalmente, devido aos seus requisitos de comunicação (altas taxas de transmissão).

Este Capítulo apresenta, parcialmente, os artigos publicados em CASAGRANDE; MORAES; CECHINEL; NEGRI *et al.* (2017) e CASAGRANDE; MORAES; MONTEZ; MORALES *et al.* (2018). Esses artigos tratam das avaliações experimentais, sobretudo da proposta inicial de uma arquitetura de comunicação para WBAN baseada em um *backbone* de nodos IEEE 802.15.4. São realizados experimentos práticos com o objetivo de verificar se as taxas de transmissão de dados são suficientes para a reconstrução de sinais fisiológicos. Finalmente, para embasar a arquitetura de comunicação proposta nesta tese, experimentos práticos sobre os mecanismos de associação do padrão IEEE 802.15.4 foram também realizados.

### 5.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Existem diversos trabalhos sobre aplicações WBAN que apresentam diferentes taxonomias e requisitos. CAVALLARI; MARTELLI; ROSINI; BURATTI *et al.* (2014) realizaram um estudo que inclui as principais aplicações, tecnologias e padrões para WBANs, onde as mesmas foram classificadas, de acordo com sua finalidade, como: cuidados com a saúde (*healthcare*); esportes; entretenimento e uso militar.

NEGRA; JEMILI e BELGHITH (2016) apresentaram uma classificação de aplicações divididas em dois grupos: médicas e não-médicas; sendo que as médicas são divididas nas que utilizam sensores implantados e nas que utilizam sobre a superfície do corpo humano. Dentre as aplicações médicas destacam-se a telemedicina ou monitoramento remoto de pacientes, reabilitação, ambiente de vida assistido e *bio-feedback*.

Em aplicações práticas, o tipo de sensor, a quantidade e a posição dependem do ambiente e da infraestrutura disponível. De acordo com o tipo de sinal medido, os sensores podem ser divididos em duas categorias (LAI; LIU; WEI; WANG *et al.*, 2013): os que coletam sinais com variação contínua ou discreta no tempo. A primeira categoria inclui sensores de eletrocardiografia (ECG), eletroencefalografia (EEG), eletromiografia (EMG) além de acelerômetros, giroscópios, sensores visuais e sonoros. Nesta categoria, a quantidade de dados e o consumo de energia são fatores importantes, pois em muitos casos devem atender requisitos de tempo real. A segunda categoria inclui sensores de temperatura, umidade, pressão sanguínea, saturação de oxigênio (SpO<sub>2</sub>). Como estes sinais têm pouca variação, a quantidade de dados transmitidos e o consumo de energia são consideravelmente menores do que a categoria anterior, portanto com requisitos menos rígidos.

PAKSUNIEMI; SORVOJA; ALASAARELA e MYLLYLA (2005) realizaram um estudo buscando determinar os principais parâmetros fisiológicos para monitoramento de pacientes do ponto de vista médico, sugerindo tecnologias de redes sem fio que atendessem os requisitos dos sinais monitorados. Foram estabelecidos como principais parâmetros: taxa de respiração, saturação de oxigênio, eletrocardiografia, eletroencefalografia, eletromiografia, temperatura e pressão sanguínea.

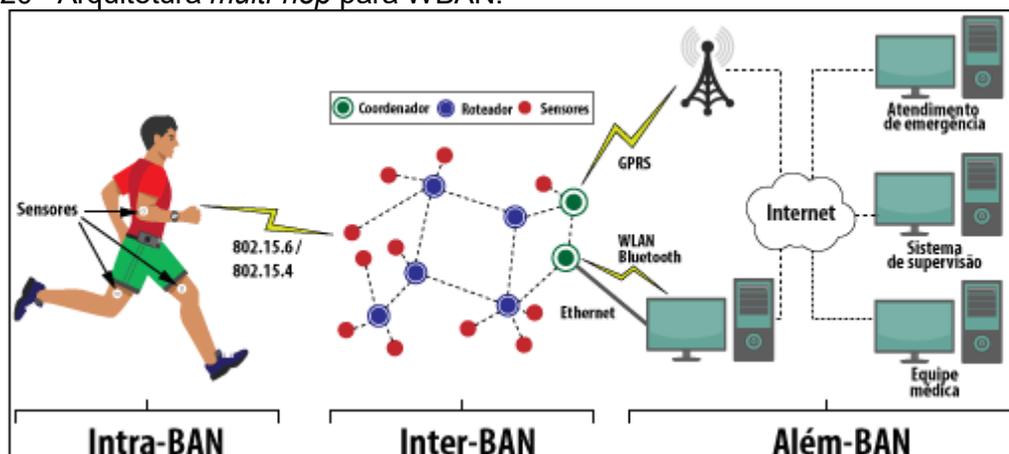
A partir dos trabalhos encontrados na literatura, é possível afirmar que existem muitas questões ainda a serem resolvidas no uso de tecnologias de RSSFs nas aplicações de monitoramento em saúde. Uma questão ainda pouco abordada é a adição de mobilidade na rede, que neste tipo de aplicação permite ao paciente se deslocar enquanto está sendo monitorado sem perder a conexão com a rede. Para tanto, uma infraestrutura de comunicação com múltiplos saltos é necessária para possibilitar o encaminhamento de mensagens entre o nodo móvel junto ao paciente e

o nodo coordenador da rede junto à aplicação clínica remota. Alguns trabalhos propõem soluções para resolver estas questões (CALDEIRA; RODRIGUES; LORENZ; ULLAH, 2015; MOUAWAD; CHALHOUB; HABIB; MISSON, 2013; RASYID; SAPUTRA; ISMAR, 2015). No entanto, além dos resultados serem obtidos somente por meio de simulações e em ambientes restritos a uma sala ou laboratório, não há clareza se essas soluções poderiam atender os requisitos das aplicações de WBAN em um cenário real. Portanto, é necessário realizar avaliações experimentais que permitam verificar se as tecnologias e padrões atuais disponíveis são adequadas para atender os requisitos das aplicações de monitoramento de dados fisiológicos utilizando múltiplos saltos, permitindo a livre movimentação de pacientes na área atendida pela rede.

### 5.3 ARQUITETURA MULTI-HOP PARA WBANs

Implementar uma WBAN depende das características do ambiente e da aplicação. A arquitetura proposta foi baseada em CHEN; GONZALEZ; VASILAKOS; CAO *et al.* (2011), e consiste de três camadas de comunicação, conforme ilustra a Figura 20.

Figura 20– Arquitetura *multi-hop* para WBAN.



Fonte: do autor.

A primeira camada denominada Intra-BAN é responsável pela comunicação entre os sensores que estão monitorando uma grandeza física relacionada ao corpo humano e um dispositivo central ou pela comunicação direta destes sensores com a

segunda camada, a Inter-BAN. Esta segunda camada é a responsável pela comunicação da WBAN, por intermédio de um *gateway*, com a terceira camada, a Além-BAN. Esta terceira camada é responsável pela distribuição da comunicação para outras redes onde se encontram serviços de monitoramento (cuidadores, atendimento de emergência, sistemas de supervisão de saúde, etc.).

A Figura 20 ilustra o contexto de aplicação e os desafios que são abordados nesta tese, utilizando múltiplas camadas com comunicação *multi-hop* para permitir a mobilidade na rede, adicionando-se múltiplos nodos roteadores na camada Inter-BAN. Esta camada baseia-se no conceito de um *backbone* de nodos em topologia de malha, que serve como infraestrutura de comunicação para que um ou mais nodos WBAN (representado na figura na camada Intra-BAN) se comuniquem por meio de um *gateway* com outras redes, transmitindo a informação para um sistema clínico remoto (POSTIGO-MALAGA; SUPO-COLQUEHUANCA; MATTA-HERNANDEZ; PARI *et al.*, 2016; SILVA; SILVA; BOAVIDA, 2010). Este *backbone* é formado por um conjunto de nodos roteadores seguindo um padrão de tecnologias de redes sem fio distribuídos ao longo de uma área de cobertura, ampliando a área de monitoramento e proporcionando o livre deslocamento de um paciente nesta área, enquanto suas funcionalidades são monitoradas.

A comunicação entre as partes desta arquitetura é suportada por diferentes tecnologias, sendo mais difundidas as que agregam características essenciais como o baixo consumo energético, baixa taxa de dados e baixa potência. Dentre estas tecnologias destacam-se: as baseadas no padrão IEEE 802.15.1 (IEEE 802.15.1, 2005) conhecido como Bluetooth ou mais recentemente BLE (*Bluetooth Low Energy*), as baseadas no padrão IEEE 802.15.4 como ZigBee e no padrão IEEE 802.15.6 (IEEE 802.15.6, 2012).

O padrão IEEE 802.15.6 foi projetado especificamente para atender os requisitos de aplicações WBAN. A camada Intra-BAN pode ser atendida por este padrão, permitindo que dados provenientes dos sensores sejam enviados a um nodo central junto ao paciente, e este nodo central, por intermédio de um *gateway*, transmite os dados para a camada Inter-BAN. Nesta camada, as tecnologias baseadas no padrão IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.1 aparecem como as principais candidatas a

atender os requisitos deste tipo de aplicação (GHAMARI; JANKO; SHERRATT; HARWIN *et al.*, 2016; NEGRA; JEMILI; BELGHITH, 2016). No entanto, como o IEEE 802.15.1 não permite múltiplos saltos, a solução mais apropriada baseia-se no padrão IEEE 802.15.4. Além disso, as principais implementações de RSSFs são notadamente as compatíveis com este padrão (TUNG; TSANG; LAM; TUNG *et al.*, 2014). Para a camada de distribuição ou Além-BAN são normalmente utilizadas tecnologias consolidadas como Wi-Fi ou 3G/4G que possibilitam o acesso à Internet (NEGRA; JEMILI; BELGHITH, 2016).

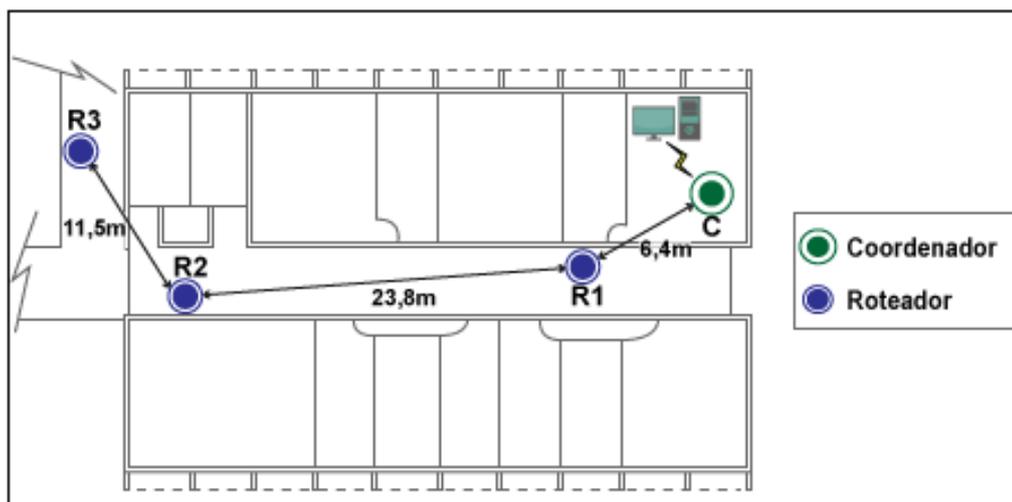
#### 5.4 EXPERIMENTOS PRÁTICOS

Visando avaliar se a arquitetura *multi-hop* atende os requisitos das aplicações de monitoramento de sinais fisiológicos, experimentos práticos utilizando as atuais tecnologias disponíveis foram realizados. No primeiro experimento, buscou-se avaliar se as RSSFs poderiam servir como infraestrutura de comunicação para que nodos WBAN se conectassem e enviassem dados a uma aplicação remota. Mais especificamente foi avaliado se, com as atuais tecnologias disponíveis e dispositivos *off-the-shelf* era possível atender as taxas de transmissão de dados necessárias às aplicações de monitoramento de sinais fisiológicos. Para tanto, utilizou-se uma arquitetura de comunicação baseada em um *backbone* de nodos roteadores que implementam o padrão IEEE 802.15.4. Um segundo experimento foi realizado com o objetivo de verificar o comportamento dos mecanismos de associação do padrão IEEE 802.15.4, e avaliar as possibilidades de melhorias. A seguir, é descrito o cenário proposto para realização dos experimentos.

##### 5.4.1 Cenário

Um cenário de testes na Universidade Federal de Santa Catarina, campus de Araranguá foi construído para a realização dos experimentos, onde uma rede padrão IEEE 802.15.4 com três nodos roteadores (R1, R2, R3) foi implementada. Esta rede consegue atender dois corredores em formato de “L”, sendo um interno e outro externo, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Cenário de testes.



Fonte: do autor.

O coordenador da rede foi posicionado no interior de um laboratório ligado a um computador para coleta dos dados. A posição dos nodos foi definida baseando-se em medições de potência de sinal (RSSI) entre nodos para se obter a distância ideal entre os mesmos, visando estabelecer no mínimo  $-70$  dBm entre os nodos, garantindo assim a qualidade de sinal e o mínimo de sobreposição, conforme especificação do fabricante dos dispositivos. Todos os nodos roteadores foram alimentados por uma fonte de  $+9,5$ V visando eliminar o efeito do uso de baterias. Foram utilizados módulos de comunicação XBee da Digi International, que especificam um máximo *throughput* de 35 Kbps<sup>10</sup> com apenas um salto sem encriptação e um *payload* máximo de 72 bytes.

#### 5.4.1.1 Avaliação da taxa de transmissão

Nesse primeiro experimento, buscou-se verificar o requisito da taxa de transmissão, onde os nodos deveriam transmitir dados em taxas suficientes que possibilitassem a reconstrução de um sinal fisiológico utilizando múltiplos saltos até um nodo coordenador (C). Assim, como ponto de partida, foram estabelecidas as

<sup>10</sup> <http://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>

taxas de dados de 18 Kbps, 24 Kbps, 30 Kbps e 36 Kbps com intervalo entre pacotes de 40 ms, 30 ms, 24 ms e 20 ms, respectivamente. O tamanho máximo dos pacotes foi de 90 bytes e o nodo coordenador da rede foi ligado a um computador via porta USB para executar a aplicação. Os dispositivos foram conectados a uma plataforma de prototipação de código aberto Arduino MEGA2560 com microcontrolador ATmega2560 com 256 KB de memória *flash*. Os dispositivos foram configurados para operar no canal 26 para prevenir possíveis interferências provenientes das redes Wi-Fi presentes no cenário, de acordo com os experimentos apresentados no Capítulo 4. A Tabela 8 apresenta os principais parâmetros e o modo de operação da rede.

Tabela 8 – Parâmetros da Rede IEEE 802.15.4.

<b>Dispositivo</b>	Digi XBee Series 2
<b>Frequência</b>	2,4 GHz
<b>Modulação</b>	O-QPSK
<b>Taxa Transmissão</b>	250 Kbps
<b>Potência</b>	+2 dBm
<b>Canal</b>	26
<b>Taxa de Dados</b>	18, 24, 30 e 36 Kbps
<b>Máximo Payload</b>	72 bytes
<b>Tamanho do Pacote</b>	90 bytes
<b>Modo</b>	Sem <i>beacon</i>
<b>ACK</b>	Desativado

Fonte: do autor.

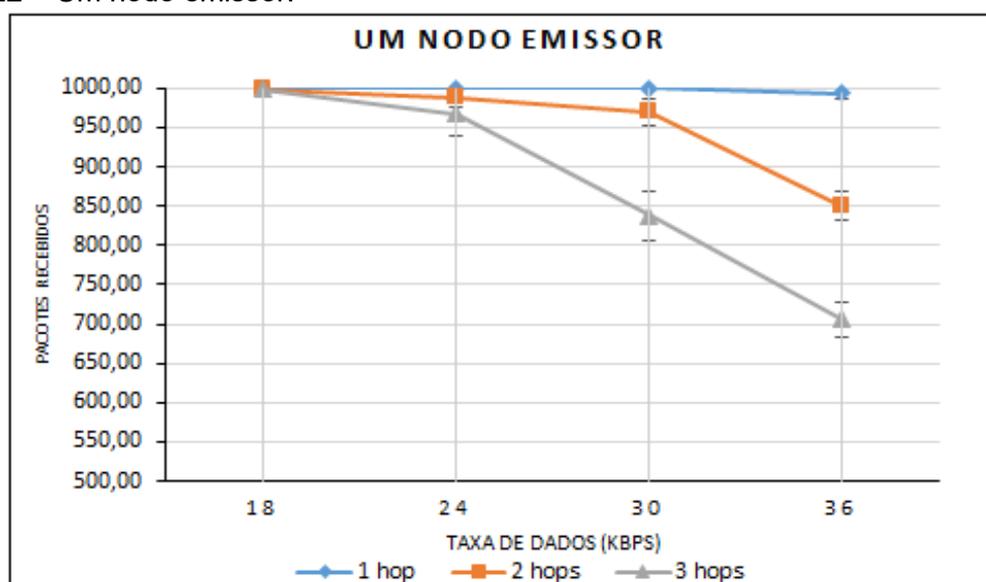
Os seguintes conjuntos de testes foram estabelecidos: a) um único nodo emissor posicionado próximo ao roteador R1 enviando um fluxo de dados para o coordenador com diferentes taxas, repetindo os testes com este nodo posicionado próximo a R2 e em seguida próximo a R3; b) três nodos emissores posicionados próximos a cada um dos roteadores, sendo que todos deveriam enviar um fluxo de dados nas taxas estabelecidas para o coordenador simultaneamente. O primeiro conjunto de testes teve o objetivo de analisar o comportamento da rede com apenas um nodo enviando fluxos de dados nas taxas definidas em diferentes números de saltos (*1-hop*, *2-hops* e *3-hops*). O segundo teste teve o objetivo de verificar uma operação com três nodos se conectando simultaneamente à rede e enviando dados

ao coordenador nas taxas estabelecidas. Neste experimento foi observada a quantidade média de pacotes recebidos com sucesso no coordenador. Em cada cenário proposto, os testes foram repetidos 10 vezes para cada taxa de dados (18, 24, 30 e 36 Kbps), calculando a média de pacotes recebidos com sucesso no coordenador a cada repetição. O intervalo de confiança foi estabelecido em 95%.

#### 5.4.1.2 Cenário com um nodo emissor

A Figura 22 apresenta os resultados de um único nodo conectado a cada um dos roteadores, o qual gera 1000 pacotes de 90 bytes para as diferentes taxas de dados.

Figura 22 – Um nodo emissor.



Fonte: do autor.

Notou-se neste experimento que com apenas um salto, praticamente 100% dos pacotes foram recebidos com sucesso, considerando as taxas de dados utilizadas. Já com dois saltos, taxas de até 30 Kbps ainda permitem uma média de pacotes recebidos com sucesso acima de 95%. Com três saltos, as taxas de 18 Kbps e 24 Kbps possibilitaram ainda uma taxa elevada de pacotes recebidos com sucesso. Estes resultados demonstram no cenário apresentado que em uma arquitetura *multi-*

*hop* de até 3 saltos, as taxas de dados devem ser iguais ou inferiores a 24 Kbps, pois acima deste limite, a taxa de perda de pacotes aumenta significativamente e não atende os requisitos das aplicações. Destaca-se ainda que, cada amostra ocupou 2 bytes, sendo os pacotes de 90 bytes com carga útil de dados (*payload*) de 72 bytes. Desta forma, para uma taxa de 24 Kbps tem-se 3.000 bytes/segundo sendo 2.400 bytes efetivamente de dados, o que resulta em 1.200 amostras/segundo. Portanto, a amostragem é suficiente para reconstrução de um sinal de EMG, por exemplo, que gira em torno de 1 KHz. Por ser este um dos parâmetros fisiológicos que exigem maior taxa de amostragem, os resultados demonstram ser possível atender de forma adequada o requisito de taxa de dados para aplicações de WBAN em uma arquitetura *multi-hop* (3 saltos) com as atuais tecnologias disponíveis.

#### 5.4.1.3 Cenário com três nodos emissores

Neste cenário, três nodos foram conectados respectivamente aos roteadores R1, R2 e R3, enviando um total de 3000 pacotes de 90 bytes nas diferentes taxas de dados. O objetivo deste teste foi avaliar o comportamento da rede com múltiplos nodos enviando dados simultaneamente. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Três nodos emissores.

	<b>18Kbps</b>	<b>24Kbps</b>	<b>30Kbps</b>	<b>36Kbps</b>
<b>Média Rec. (pacotes)</b>	2.847,90	1.990,40	1.695,40	1.524,70
<b>Erro (+/-) (pacotes)</b>	67,22	51,94	85,09	35,52
<b>% Sucesso</b>	94,93	66,35	56,51	50,82

Fonte: do autor.

Os resultados demonstraram que com taxas de dados de 18 Kbps obteve-se um percentual médio de 94,93% de pacotes recebidos com sucesso, no entanto com taxas maiores a perda de pacotes é muito significativa. Neste cenário, cada nodo enviou um fluxo de dados com a mesma taxa, simultaneamente, para o coordenador da rede, portanto a cada salto tem-se o incremento da taxa do nodo conectado ao roteador do próximo salto, cumulativamente até chegar ao coordenador. Por exemplo, quando o nodo conectado a R3 envia dados à uma taxa de 18 Kbps, tem-se entre R2 e R1 uma taxa 36 Kbps devido ao fluxo do nodo conectado em R2; e entre R1 e o

coordenador uma taxa de 54 Kbps devido ao fluxo do nodo conectado em R1. Este experimento demonstrou que com três nodos transmitindo fluxos simultâneos de dados com taxa de 18 Kbps, o percentual médio de pacotes recebidos com sucesso é acima de 94%, no entanto, esta taxa não atende o requisito de taxa de dados para reconstrução de um sinal de eletromiografia. Estes experimentos foram realizados com os nodos estáticos ao longo do cenário proposto, com o objetivo de observar as taxas de dados em múltiplos saltos. A seguir, um conjunto de testes para verificar o processo de associação utilizando um nodo móvel e múltiplos saltos foi realizado.

#### **5.4.2 Avaliação do processo de associação**

Um experimento prático de associação de nodos no cenário apresentado anteriormente (Figura 21) foi realizado. O principal objetivo foi avaliar o mecanismo de associação do protocolo IEEE 802.15.4. Este experimento consistiu inicialmente em deixar que um nodo móvel realizasse o processo de associação e desassociação sem influência do *software* de aplicação, definindo que, inicialmente, o nodo móvel esteja associado ao roteador R1, e ao se mover em direção ao roteador R2, este deve tentar se associar a R2 sem perder a comunicação com a rede. De acordo com os experimentos anteriores, utilizou-se um nodo móvel enviando dados a uma taxa 18 Kbps e pacotes de 90 bytes totalizando 3000 pacotes enviados. O nodo móvel percorre o trajeto a uma velocidade de aproximadamente 1 m/s (correspondente a uma pessoa caminhando).

Um segundo experimento consistiu em utilizar a estratégia de antecipação da decisão de *handover* quando a força do sinal (RSSI) entre o nodo móvel e o roteador associado estivesse abaixo de um limiar pré-estabelecido. Nesse método, o coordenador solicita o valor de RSSI do nodo móvel em relação a quem ele está associado, a cada intervalo de tempo correspondente ao recebimento de dez pacotes. As leituras foram realizadas através de um processo de janela deslizante, utilizando a média entre três valores de RSSI. Essa média, ao atingir um valor correspondente ao limiar de -87 dBm, o coordenador solicita ao nodo móvel que se associe ao roteador com melhor sinal.

Ao avaliar os primeiros experimentos, verificou-se a necessidade de desenvolver um algoritmo para otimizar a utilização da carga útil de dados dos pacotes. Uma vez que o maior valor lido do sensor de eletromiografia é 1023, seriam necessários 10 bits para alocar estes valores, porém, a leitura ficaria armazenada em uma variável de 16 bits. A carga útil de dados poderia armazenar até 72 bytes, portanto, utilizando uma variável para armazenar as leituras do sensor de eletromiografia, seria possível enviar apenas 36 amostras por pacote. Constatou-se que 6 bits não estavam sendo utilizados por amostra, então foi desenvolvido um algoritmo que utilizasse todos os bits do *payload*, otimizando-se assim a quantidade de amostras transmitidas por pacote.

Os resultados dos experimentos de associação demonstraram que o método padrão utilizado pelos dispositivos XBee não se mostrou eficiente, pois em média, a taxa de sucesso foi de 74,3% (2230 pacotes recebidos com desvio padrão de 224). Além disso, a média de tempo que o nodo móvel ficou desassociado foi de aproximadamente 7,51 segundos, com um desvio padrão de 4,89 segundos. Por este experimento, pôde-se verificar a ineficiência do método padrão de reassociação dos dispositivos utilizados no cenário apresentado. Por outro lado, com o método de antecipação da decisão de *handover* desenvolvido, obteve-se resultados significativamente melhores e mais estáveis. Em média, a taxa de sucesso aumentou para 93,8% (média de 2813 pacotes recebidos com desvio padrão de 89), e com um tempo médio em que o nodo móvel ficou desassociado de 3,37 segundos com desvio padrão de 0,31 segundos.

Um outro teste de associação foi realizado, desta vez, utilizando o protótipo de EMG sem fio como nodo móvel. Inicialmente, o nodo móvel com o EMG está associado ao roteador R1, e ao se mover em direção ao roteador R2, tenta se associar a ele sem perder a comunicação com a rede. De acordo com os experimentos anteriores, utilizou-se nestes testes uma taxa 24 Kbps, com o nodo móvel percorrendo o trajeto a uma velocidade 1m/s aproximadamente. Foi utilizada uma acadêmica voluntária para vestir o EMG sem fio e se deslocar pela área atendida pela rede. Foram realizadas 20 amostragens, onde, cada amostra ocupou 2 bytes, sendo os pacotes de 90 bytes com carga útil de dados de 72 bytes.

A aplicação precisaria receber cerca de 1000 amostras por segundo para possibilitar a reconstrução do sinal de EMG de forma satisfatória. De acordo com os

resultados obtidos nesse experimento, a quantidade de amostras recebidas atingiu o mínimo necessário para a reconstrução do sinal. Foi obtida uma taxa média de 91.67% de pacotes recebidos com sucesso (desvio padrão de 89). O tempo de re-associação foi em média de 3,54 s (desvio padrão de 0,37 ms).

Estes experimentos demonstraram uma melhora significativa nos resultados, quando utilizada a antecipação de associação dos nodos móveis. Foi possível verificar que o valor determinado de limiar como gatilho para que um nodo móvel tentasse uma nova associação, mostrou ser um avanço importante a ser considerado, visto que o tempo que o nodo móvel ficou sem conexão com a rede diminuiu em praticamente 50%.

## 5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este Capítulo apresentou a implementação e avaliação experimental de uma arquitetura de comunicação para monitoramento de dados fisiológicos em redes de sensores sem fio com múltiplos saltos. A construção do protótipo de eletromiógrafo sem fio e o desenvolvimento da aplicação de tratamento e visualização dos dados possibilitaram a execução do monitoramento de dados reais de EMG. Os sinais obtidos, como resultado das contrações musculares dos “pacientes” voluntários, foram comparados aos de um eletromiógrafo comercial e considerados válidos por um profissional da área de Fisioterapia.

Os experimentos práticos demonstraram, no cenário proposto, que as taxas de dados entre 18 Kbps e 24 Kbps são suficientes para atender às aplicações de monitoramento de dados fisiológicos de um paciente em um ambiente real, com as atuais tecnologias disponíveis e utilizando dispositivos de mercado. Com os experimentos, foi possível comprovar a possibilidade de aquisição de um sinal de EMG com frequência de amostragem suficientes para reconstrução do sinal, através de um equipamento vestível sem fio. Como os sinais de EMG são, em geral, os que requerem as maiores taxas de dados, pode-se concluir que a proposta atende as demais aplicações de monitoramento de sinais fisiológicos.

Foram realizados experimentos para avaliar o processo de associação de nodos móveis no padrão IEEE 802.15.4. Os resultados comprovaram que é possível implementar melhorias nos mecanismos de associação, reduzindo consideravelmente o tempo que o nodo móvel fica desassociado, e com isso, aumentar a eficiência da rede. Durante os experimentos e, baseado nos resultados preliminares, diversas melhorias foram sendo propostas. A mudança nos algoritmos do coordenador e nodo móvel em relação as trocas de mensagem para o processo de desassociação reduziu a quantidade de mensagens trocadas (além das necessárias para o monitoramento). Antes da mudança, o coordenador requisitava remotamente o RSSI e também a desassociação, o que causava um tráfego desnecessário de mensagens. Com a nova estratégia, o nodo móvel fica como responsável por requisitar o RSSI e se desassociar, quando necessário. O coordenador apenas deve enviar um pacote (sem dados) para atualizar o RSSI do nodo móvel. O armazenamento local e temporário de dados através da adição do cartão micro SD proporcionou a recuperação dos dados no momento em que o nodo se encontrava desassociado e, desta forma, foi possível garantir a integridade do sinal de EMG obtido.

A estrutura de rede proposta mostrou-se como topologia adequada para a execução da aquisição do sinal, possibilitando abranger áreas maiores devido ao uso de múltiplos saltos, permitindo um paciente se movimentar livremente na área de cobertura da rede durante uma avaliação de EMG. Concluiu-se que o esquema implementado (protótipo, *backbone* de nodos e aplicação) para monitoramento de dados fisiológicos é suficiente para atender esse tipo de aplicação, uma vez que permite a aquisição de dados em redes sem fio com topologia *multi-hop*.

Os dispositivos XBee utilizados nos experimentos práticos possuem certas limitações e não proporcionam a troca de parâmetros do CSMA/CA do protocolo IEEE 802.15.4. Por exemplo, eles não permitem a configuração dos expoentes de *backoff*, não permitem a utilização o modo *beacon-enabled*, além de não permitirem a formação de topologias mais complexas como *cluster-tree*. Diante dessas restrições, são necessários novos experimentos por meio de simulações, para permitir investigar e propor melhorias nos mecanismos de associação e re-associação, e conseqüentemente, obter avanços na arquitetura de comunicação proposta.

O Capítulo 6 apresenta o estado da arte com uma revisão sistemática da literatura sobre *handover*. São apresentados os problemas relacionados às restrições

do protocolo de comunicação, nomeadamente: escalonamento de *beacon*, tamanho do intervalo de *beacon*, tamanho de *buffers*, alocação de duração de superquadros (*superframe durations*), velocidade e direção do nodo móvel. A partir destas definições, é discutida uma proposta de melhorias nos mecanismos de associação e re-associação de nodos móveis, bem como uma configuração adequada de parâmetros da rede. Para validar a arquitetura proposta, possibilitar testes em escala e alterar os parâmetros da rede, os próximos experimentos serão realizados com auxílio de um simulador.

## 6 MELHORIAS NO MECANISMO DE ASSOCIAÇÃO

### 6.1 APRESENTAÇÃO

Este Capítulo é uma versão estendida do artigo submetido para a revista IEEE *Sensors Journal* (ISSN 1530-437X) intitulado “*A new association scheme for handling node mobility in cluster-tree wireless sensor networks*”, apresentando uma proposta de melhorias nos mecanismos de associação e re-associação do padrão IEEE 802.15.4. Essa proposta é baseada em um conjunto de estratégias, nomeadamente: antecipação da decisão de *handover*; utilização do mecanismo de associação rápida do padrão IEEE 802.15.4e; redução da varredura de canais; supressão da varredura de nodos órfãos; e a proposição de um conjunto adequado de parâmetros para o CSMA/CA. Destaca-se ainda que o problema enfatizado nesta tese é descrito, o estado da arte sobre os mecanismos de *handover* do padrão IEEE 802.15.4 é amplamente discutido e, por fim, os resultados, obtidos através de simulação, demonstram a eficiência da proposta.

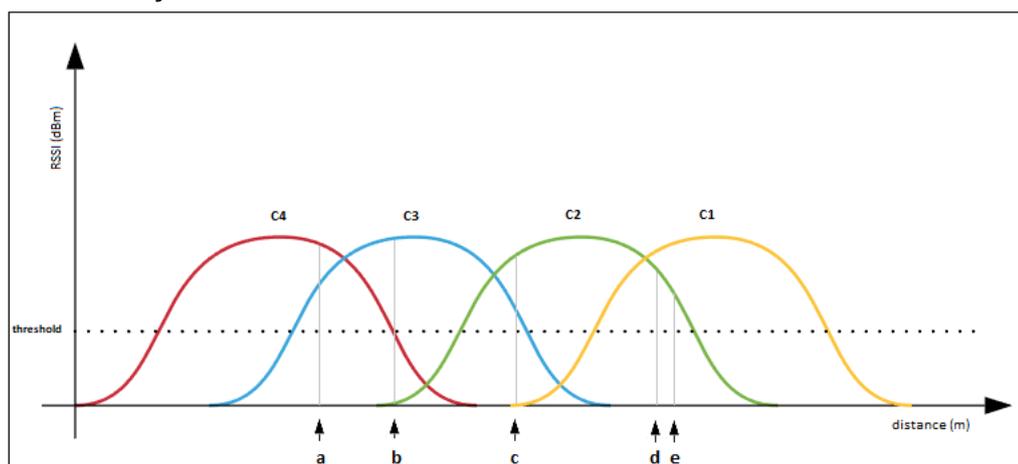
### 6.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O *handover* ou *handoff* é um requisito básico para aplicações de RSSF que exigem mobilidade e resposta em tempo real. Além da possibilidade de interromper a transmissão de dados por um tempo, esse processo aumenta o consumo de energia, o atraso na entrega de dados ou a perda de dados, além de comprometer a qualidade do serviço (POSTIGO-MALAGA; SUPO-COLQUEHUANCA; MATTA-HERNANDEZ; PARI *et al.*, 2016). O *handover* pode ser dividido em duas categorias: *soft handover* e *hard handover*. O *soft handover* usa a abordagem de “*make-before-break*”. Assim, o nodo continua sua comunicação normal, pois não finaliza a conexão original antes de fazer uma conexão com outro coordenador. Na categoria *hard handover*, o nodo usa a abordagem do “*break-before-make*”. Ele interrompe o *link* original e depois se conecta com outro coordenador (AYOUB; OUNI, 2013).

A decisão de realizar o *handover* pode ser baseada em vários parâmetros, tais como: indicador de intensidade de sinal recebido (RSSI), indicador de qualidade de link (LQI), velocidade do nodo móvel ou sistema de posicionamento global (GPS)

(CALDEIRA; RODRIGUES; LORENZ, 2013). O GPS é um parâmetro mais complexo para usar na decisão de *handover* porque implica no conhecimento de localização de todos os elementos presentes na rede, onde a tomada de decisão de transferência depende da posição do nodo móvel relativamente à posição do roteador. Além disso, é muito difícil de usar GPS em cenários internos devido às limitações de obtenção de sinais de satélite. O RSSI indica a potência do sinal de uma mensagem recebida por um nodo e o LQI indica a qualidade das mensagens recebidas por um nodo. O RSSI é um dos parâmetros mais utilizados para a decisão de *handover* (CALDEIRA; RODRIGUES; LORENZ; ULLAH, 2015). A Figura 23 ilustra o sinal RSSI entre os coordenadores e um nodo móvel (NM) como uma função da distância percorrida pelo NM e um limiar (*threshold*) desejado. Considerou-se que os coordenadores estão distribuídos simetricamente.

Figura 23 – Avaliação de RSSI.



Fonte: do autor.

As setas indicam alguns exemplos de possíveis casos de decisão de *handover*. No caso (a), o NM pode analisar o RSSI de C4 e C3, por exemplo. Como o RSSI de C4 é maior que C3 e esse valor é superior ao limiar estabelecido, nenhuma ação de associação é necessária. No caso (b), o NM é capaz de avaliar o RSSI de C4, C3 e C2. Como neste instante o RSSI de C4 está abaixo do limiar e o RSSI de C3 é maior que o de C4, será necessário desassociar de C4 e associar a C3. No caso (c), embora o C2 tenha um sinal RSSI melhor que o C3, o NM permanece associado ao C3 porque o seu valor ainda é maior que o limiar pré-definido. Um limiar de RSSI

é definido para evitar sucessivos *handovers* desnecessários, como nos casos (d, e). É importante destacar que essa métrica pode sofrer interferência do ambiente ao redor e, portanto, essa relação não é linear na maioria das situações. Esse comportamento pode reduzir a precisão de uma decisão com base na avaliação simples desse parâmetro (CALDEIRA; RODRIGUES; LORENZ, 2013).

O *handover* do padrão IEEE 802.15.4 usa uma abordagem *break-before-make* para re-associação que aumenta a latência da associação em comparação com a abordagem *make-before-break* (HUSSAIN; PYUN, 2014). Os nodos móveis continuam associados até que sua conexão seja perdida, assim, eles iniciam um novo processo de varredura para se conectar com outro coordenador, inicialmente executando a varredura órfã e posteriormente varrendo os demais canais em busca de um novo coordenador. Esperar pela perda de conexão e iniciar um longo processo de varredura pode aumentar a latência e o consumo de energia (FILHO; DENIS; MAMAN, 2015). Conseqüentemente, a melhoria dos mecanismos de *handover* é essencial para implementar aplicações de RSSFs com requisitos mais rigorosos.

### 6.3 ESTADO DA ARTE

Como método de busca de trabalhos relacionados visando estabelecer o estado da arte sobre os mecanismos de *handoff*, foi adotada uma revisão sistemática de literatura (RSL). Para esta RSL, inicialmente definiu-se um protocolo de busca para estabelecer critérios de busca e seleção de materiais, de acordo com os objetivos desta pesquisa. Este protocolo é apresentado no Apêndice B.

#### 6.3.1 Análise dos dados

A revisão dos trabalhos relacionados concentrou-se nas publicações de mecanismos de *handoff* a partir de 2013. Esta escolha teve como base o fato que CALDEIRA; RODRIGUES e LORENZ (2013) realizaram uma revisão da literatura sobre as abordagens mais importantes publicadas até 2012. Portanto, a discussão dos trabalhos relacionados com os mecanismos de *handoff*, apresentada nesta tese, inicia com a uma breve apresentação dos trabalhos contidos em CALDEIRA;

RODRIGUES e LORENZ (2013) e na sequência, os trabalhos resultantes da RSL, no período compreendido entre 2014 até 2019 são apresentados.

Caldeira et al. (2013) definem que a mobilidade interna é caracterizada pela mobilidade de nodos sensores entre diferentes pontos de acesso, mas sempre dentro do mesmo domínio de rede, ou seja, os endereços dos nodos permanecem sempre os mesmos. A decisão de *handover* pode ser baseada em vários parâmetros. No entanto, os mecanismos para obter estes parâmetros podem sobrecarregar a rede com o aumento no número de mensagens transmitidas e, conseqüentemente, reduzindo o seu tempo de vida. Segundo os mesmos autores, o parâmetro mais utilizado para avaliar a decisão de *handover* é o RSSI (*received signal strength indicator*), que em conjunto com outros parâmetros visam melhorar a eficácia da decisão. Entre os principais parâmetros considerados no referido trabalho estão: RSSI e LQI (*link quality indicator*), velocidade, direção do movimento e posição global (GPS). Porém, outros parâmetros podem ser utilizados no processo de decisão para o mecanismo de *handover*, nomeadamente, energia residual, tempo de conectividade, posição, número de saltos e distância (FILHO; DENIS; MAMAN, 2015).

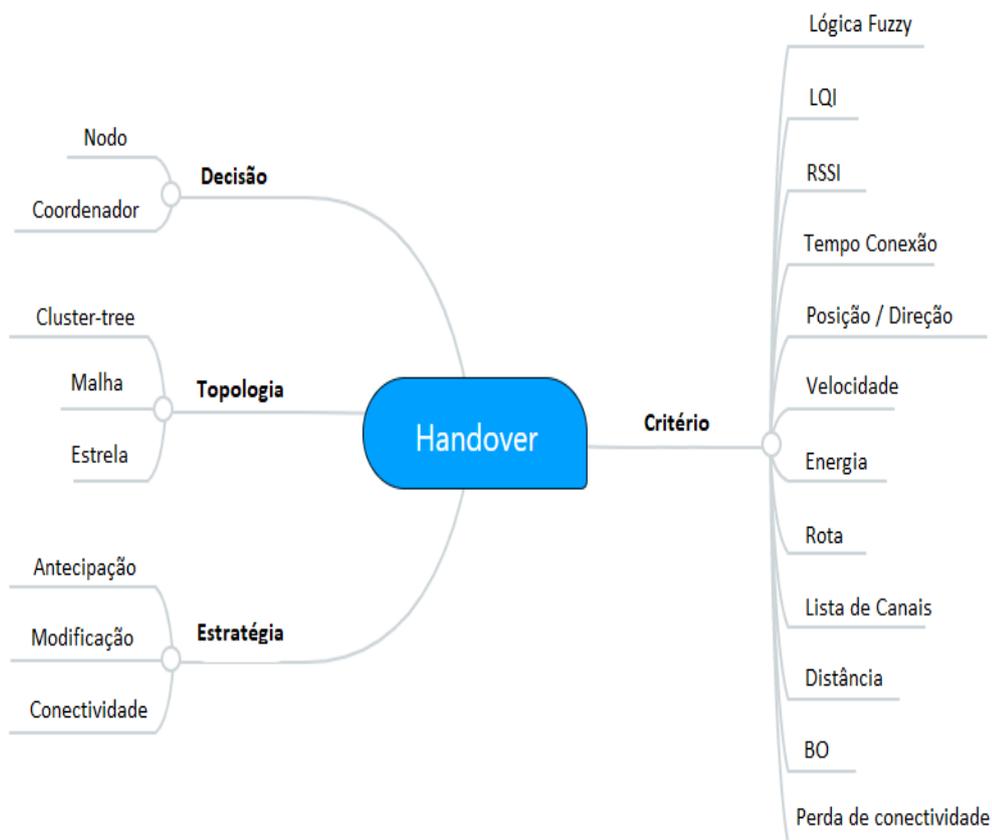
ZINONOS e VASSILIOU (2010) propuseram um mecanismo que utiliza vários agentes *proxy* que se comunicam entre si. Esta proposta foi baseada no protocolo de gerenciamento de mobilidade 6LoWPAN usando um conceito baseado em *proxy*. Quando um agente *proxy* verifica que um nodo móvel (NM) conectado a ele está com potência do sinal abaixo de um determinado limiar, ele informa aos *proxys* adjacentes para buscarem por pacotes provenientes deste NM. Estes recebem os pacotes e verificam o RSSI, então enviam ao *proxy* do NM que aceita a alteração baseado no RSSI, liberando o novo *proxy* para realizar o processo de conexão com o NM. Ficou demonstrado que o número de mensagens de sinalização foi muito menor utilizando esta abordagem de *proxys* que se comunicam entre si. Alguns outros trabalhos também utilizam uma rede de *proxys* como SILVA; SILVA e BOAVIDA (2012) e JARA; ZAMORA e GÓMEZ-SKARMETA (2010). Estas propostas utilizam um conjunto de nodos *proxy* em forma de *backbone* compartilhado para realizarem as tarefas que mais consomem recursos, aumentando assim a vida útil da rede e reduzindo o tempo de *handover*. Ainda em CALDEIRA; RODRIGUES e LORENZ (2013) foi descrito o

trabalho de FOTOUHI; ALVES; KOUBAA e BACCOUR (2010), que apresentam um conjunto de métricas para avaliar quando disparar o mecanismo de *handover*, destacando-se: RSSI, velocidade do nodo, número de saltos até o nodo sorvedouro (*sink*), tráfego, nível de energia e qualidade do *link*. Para estimar a qualidade do *link* utilizaram lógica *fuzzy*.

Também é citada a proposta de GONZÁLEZ-VALENZUELA; CHEN e LEUNG (2011) que apresenta um mecanismo onde inicialmente o nodo móvel envia uma mensagem utilizando todos os 16 canais disponíveis no padrão IEEE 802.15.4. Os APs vizinhos confirmam esta mensagem, que são usadas pelo NM para coletar os valores de RSSI de todos os APs. Mensagens de dados também são utilizadas para manter os valores de RSSI. Após o período de coleta, o NM escolhe se associar ao AP com o melhor RSSI. CALDEIRA; RODRIGUES e LORENZ (2013) consideraram que os mecanismos de associação ainda não eram satisfatórios diante das soluções disponíveis. Destacaram que os mecanismos para apoiar a mobilidade devem ser leves em termos de esforço computacional e utilizar o mínimo de troca de mensagens de sinalização. A maioria das soluções descritas usa trocas de mensagens para manter informações sobre a intensidade do sinal entre os nodos móveis e os pontos de acesso. Esta troca contínua de mensagens contribui para a drenagem das baterias, reduzindo o tempo de vida útil dos sensores e, por consequência, de toda a rede. Diante desta perspectiva, existem oportunidades para novas propostas de melhorias para o mecanismo de associação.

A seguir, os demais trabalhos que propõem soluções para o problema da associação em RSSFs com nodos móveis selecionados na revisão sistemática da literatura são apresentados, classificando-os de acordo com as suas principais características. Os trabalhos foram classificados pelas propostas de alterações no processo de associação, pelos critérios para a seleção do coordenador mais adequado para tentar se associar e pelas melhorias na conectividade entre o nodo móvel e o coordenador. A Figura 24 ilustra a taxonomia proposta.

Figura 24 – Taxonomia de classificação dos mecanismos.



Fonte: do autor.

A primeira categoria diz respeito às propostas de soluções que envolvam alterações no processo de associação do padrão IEEE 802.15.4. Já na segunda categoria, são classificados os trabalhos que apresentam soluções para a escolha do coordenador ideal para o nodo móvel se associar, utilizando-se para tanto de um ou mais critérios de seleção. Na última categoria são classificados aqueles trabalhos onde o intuito era melhorar ou ampliar a duração da conectividade entre o nodo móvel e o coordenador.

#### 6.3.1.1 Alterações no processo de associação

JAVED; ZEN; LENANDO e ZEN (2013) propõem uma modificação no formato do quadro de comando de solicitação de associação. A proposta é destinada a aplicações com grande mobilidade, onde nodos móveis dispõem de um período curto

de tempo para tentarem se associar a algum coordenador. Os autores propõem a combinação do comando de solicitação de dados com o comando de solicitação de associação, através da modificação do campo "*Frame Control*" do comando de solicitação de associação. O resultado é um novo comando de solicitação denominado "*Association Data*" que tem o mesmo tamanho do comando de solicitação de associação, mas sendo responsável por duas funções: a solicitação de associação e a solicitação de dados. Como resultado, quando um nodo encaminha o comando de solicitação de associação, também já envia o comando de solicitação de dados, fazendo com que o coordenador encaminhe ao nodo a resposta do pedido de associação logo após fazer a verificação de seus recursos. Com esta modificação, o processo de tentativa de associação não necessita mais do comando de solicitação de dados, sendo assim removido do processo. Desta maneira, alguns quadros de confirmação redundantes existentes durante o processo de tentativa de associação também são descartados sem afetar o mesmo.

STHAPIT; CHOI; KWON; PYUN *et al.* (2013) também propõem uma nova técnica para associação rápida, que impede que os nodos necessitem realizar a varredura de vários canais para adquirir informações da rede. O trabalho foca no problema de como um nodo adquire informações de outras RSSFs na sua área de cobertura em uma rede com *beacon* habilitado. Para obter informações sobre qualquer vizinho existente, o nodo necessita ouvir seus *beacons* ao longo de todos os canais disponíveis para redes IEEE 802.15.4, já que o nodo não conhece em qual canal o vizinho está operando. Então, neste trabalho é apresentado um novo esquema de associação chamado DBC (*dedicated beacon channel*), no qual os coordenadores transmitem seus quadros de *beacon* em um canal dedicado. Dessa forma, a proposta permite que um nodo adquira informações da rede sobre todos os coordenadores nos arredores através da varredura de apenas um único canal.

STHAPIT e PYUN (2014) apresentam o que entendem ser necessário para o suporte à mobilidade de nodos e estendem o trabalho anterior utilizando o DBC melhorado através de um algoritmo inteligente que aumenta o tempo de conectividade do nodo com um coordenador. Os autores propõem três estratégias para melhoria no processo de *handover* em redes com *beacon* habilitado. Primeiro, um algoritmo proativo foi desenvolvido para antecipar a futura perda de conectividade. Em segundo lugar, uma proposta que impede que os nodos façam uma varredura em vários canais.

Em terceiro, um algoritmo de seleção de coordenador para escolher o melhor coordenador foi desenvolvido. O objetivo é fornecer um mecanismo com o maior tempo de conectividade, reduzindo assim a frequência de *handover*. O primeiro algoritmo tenta antecipar a quebra de *link* analisando o histórico do LQI com sucessivas leituras. Assim, o algoritmo diminui o tempo necessário para que o nodo perceba a quebra do *link* com o coordenador. O segundo algoritmo permite que o nodo móvel faça a varredura em apenas alguns canais, obtendo informações de rede sobre todos os coordenadores nas proximidades. O nodo móvel varre apenas os canais considerados livres de interferência Wi-Fi (15, 20, 25 e 26). O terceiro algoritmo aumenta o tempo de conectividade do nodo, realizando *handover* para o coordenador que prover o maior tempo de conectividade. O algoritmo tenta antecipar se um nodo está se afastando ou indo em direção a um coordenador examinando o LQI dos vários *beacons* recebidos do mesmo coordenador. Os resultados analíticos e por simulação mostraram que a proposta é eficiente em termos de consumo de energia e redução de latência.

A proposta de (CALDEIRA; RODRIGUES; LORENZ, 2015) tenta minimizar a troca de mensagens contínua usada nas diversas abordagens para monitorar o valor do RSSI e garantir a comunicação contínua com os nodos sensores. A excessiva troca de mensagens contribui para a drenagem da bateria e, portanto, a vida útil dos nodos sensores é reduzida. RSSFs com coordenadores fixos podem ser considerados ambientes controlados, ou seja, após um curto período de tempo, os nodos são bem conhecidos pela infraestrutura e é incomum alterar esses nodos. Essa característica pode ser usada para promover a mobilidade dos nodos sensores. Os autores propõem um novo mecanismo denominado HandMAC4 (*Handover mechanism for MAC layer supporting continuous communication in mobile wireless sensor networks*) para redes padrão IEEE 802.15.4 sem *beacon*. A ideia é considerar que os APs podem procurar um nodo móvel específico em vez de monitorar continuamente o RSSI entre o nodo e o AP correspondente. Se um AP encontrar um nodo específico e este nodo escolher realizar o *handover*, o AP deixará de procurá-lo. Se o nodo se mover para uma área de cobertura sobreposta de outro AP, ele começará a receber notificações de confirmação (ACK) deste novo AP. Neste momento, o nodo pode decidir realizar

*handover* ou não. A decisão pode ser baseada na avaliação do valor do RSSI. Se o novo AP tiver um valor melhor de RSSI do que o atual, o *handover* será executado. Caso contrário, o nodo fica com o AP atual.

Em seguida, os autores CALDEIRA; RODRIGUES; LORENZ e ULLAH (2015) apresentam um estudo de avaliação de desempenho detalhado, considerando três técnicas de *handover*: O HandMAC4 proposto no trabalho anterior; as propostas baseadas em RSSI e as propostas baseadas em *backbone*. O trabalho baseado em RSSI combina soluções baseadas em monitoramento de valores de RSSI. A comparação desses valores com um limiar predefinido é usada para decidir se o *handover* deve ser realizado ou não. A proposta baseada em *backbone* combina soluções que usam um *backbone* compartilhado para interconectar todos os APs. Este *backbone* é usado para trocar informações entre APs adjacentes para garantir a comunicação aos nodos sensores. Nestas soluções o processo de *handover* é realizado através do *backbone*, prevendo o próximo AP na rota do nodo sensor. Sob esta abordagem, cada nodo sensor tem um AP correspondente. Este AP é responsável pela manipulação de *handover* de todos os nodos sensores a quais é correspondente. A escolha do AP correspondente para um determinado nodo sensor é baseada no melhor valor de RSSI disponível. A qualidade do *link* entre os nodos e seus APs está sempre sob monitoramento usando troca de mensagens em curtos intervalos de tempo. Se uma deterioração do valor do RSSI for detectada, então, o AP correspondente informa os APs adjacentes para que estes comecem a procurar por este nodo sensor. Esta comunicação é realizada através do *backbone*. Quando um novo AP detecta o nodo sensor, este AP torna-se o novo AP correspondente para esse nodo. Então, este novo AP informa o AP anterior deste nodo e o *handover* é completado. O estudo foi realizado por simulação e por teste de bancada usando vários cenários com diferentes números de nodos móveis e velocidades. Os resultados mostraram que o método denominado Hand4MAC foi mais eficiente frente as propostas avaliadas, sendo considerado pelos autores até então a melhor solução para garantir conectividade com nodos sensores com menor consumo de energia. Verificou-se que o Hand4MAC pode garantir percentagens de conectividade com os nodos sensores acima de 90% em todos os casos, as outras duas soluções não passaram de 88%. Além disso, este valor cai significativamente quando o número de nodos sensores aumenta, apresentando claramente problemas de escalabilidade.

Isso também demonstrou que a solução Hand4MAC consome pouca energia e este consumo não é influenciado pelo número de nodos móveis.

No artigo de YUN; KHAN e HAN (2015) é proposto um novo mecanismo de *handoff* rápido que elimina o atraso de varredura de canais. Este esquema utiliza as informações de qualidade de *link* (LQI) dos coordenadores vizinhos para selecionar um coordenador adequado para *handoff*. O esquema proposto é avaliado através de extensas simulações que mostram sua eficiência no contexto da troca de um coordenador para outro quando altas taxas de dados estão sendo transmitidas. O processo de varredura normalmente requer mais tempo do que outros processos e ocupa 90% de todo o processo de *handoff*. Quando o NM faz uma lista de todos os canais apropriados disponíveis, este envia pedido de conexão ao coordenador com o melhor sinal. O esquema proposto é dividido em duas fases: fase de inicialização da rede e fase de *handoff*. Na inicialização da rede são realizadas três etapas antes que o NM decida realizar um processo de *handoff*. O NM reúne informações sobre os coordenadores vizinhos durante o processo inicial de varredura, tais como o identificador (ID) do coordenador (endereço MAC), número do canal disponível e qualidade do *link* (LQI). Então o NM compartilha essas informações no período livre de contenção (CFP: *contention free period*) numa mensagem de *broadcast*. Cada NM monitora a qualidade do *link* para atualizar as informações. Na fase de *handoff*, o NM escolhe, dentre os coordenadores disponíveis em sua tabela de informações o coordenador que tiver melhor sinal, evitando novas varreduras. O esquema foi validado através de extensivos testes de simulações, reduzindo significativamente o atraso de *handoff* e a perda de pacotes durante o processo.

FILHO; DENIS e MAMAN (2015) apresentam uma abordagem para o mecanismo de *handover* sensível ao contexto para um grande número de nodos móveis, propondo modificações no padrão IEEE 802.15.4 com *beacon* habilitado. O módulo proposto usa lógica *fuzzy* FQDA (*Fuzzy Quantitative Decision Algorithm*) e agrupamento de métricas, isto é, avalia parâmetros (tamanho da bateria, força do sinal, energia, qualidade de *link*) em grupos de acordo com sua proximidade, permitindo a definição de perfis e dando importância e peso aos grupos de métricas relacionadas à aplicação. Um módulo de gerenciamento multi-contexto foi

implementado em um simulador. Este módulo pode teoricamente adaptar-se para comunicações tempo real *intra-cluster* dependendo nos padrões de contexto locais e temporais detectados. Por exemplo, em termos de atividade de nodos, mobilidade, autonomia energética, tráfego, e fornecer um mecanismo de transmissão que garanta a estabilidade de toda a rede. Nesta avaliação, quatro algoritmos diferentes para decisão de *handover* foram aplicados. O primeiro, um clássico, é mais conhecido como curva de histerese. Ele usa o valor RSSI com janela deslizante para prevenir o efeito ping-pong e tenta adaptá-lo em uma curva de histerese para cada AP. Os outros, incluindo esta proposta, usa a lógica *fuzzy* para avaliar as condições de operação e ambiente e depois, a partir das medições adquiridas e calculadas, inferir sua decisão de *handover*. A proposta de grupo ponderado com FQDA apresentou maior desempenho em comparação com os outros métodos avaliados. Este algoritmo pode ser estendido a um grande número de métricas e não exige recursos computacionais e de armazenamento, permitindo boa adaptabilidade ao problema da mobilidade em RSSF.

Em NEPALI e SHIN (2017) é apresentada uma técnica para prevenir a varredura em vários canais onde os nodos mantem uma lista de canais operando na sua vizinhança, durante a inicialização. Quando o nodo necessita encontrar um novo coordenador ele faz varredura somente nos canais vizinhos determinados na lista. A lista de vizinhos é enviada aos demais coordenadores por *broadcast* junto a carga útil do *beacon*. Os resultados por simulação demonstram uma redução expressiva no tempo total de associação do nodo móvel.

#### 6.3.1.2 Critérios de seleção do coordenador mais adequado

OUNI e AYOUB (2013) propõem novos critérios de associação/re-associação para aperfeiçoar a formação de topologias de árvore de cluster. Estes critérios são classificados de acordo com duas categorias: abordagem simples baseada em informações de um único salto; abordagem cooperativa baseada em múltiplos saltos de informação até o nodo *sink*. Esses critérios são baseados em parâmetros de energia e profundidade de modo que haja um compromisso entre conservação de energia e redução de latência. Os autores também propõem um esquema de re-associação de acordo com diferentes limiares, dependendo da energia restante

coordenadores ao longo do tempo, a fim de atualizar a topologia da rede e conseqüentemente realizar uma estratégia de balanceamento de carga. No procedimento de associação/re-associação simples, a escolha do coordenador baseia-se num único nível, ou informações de apenas um salto. Nesta abordagem, o critério de seleção é baseado principalmente na energia residual dos coordenadores candidatos. No procedimento de associação/re-associação cooperativa, a abordagem para a escolha do coordenador é baseada em informações de vários níveis ou saltos. Desta forma, para escolher o coordenador a se associar, um nodo deve confiar na informação fornecida por todos os coordenadores candidatos que compõem o caminho para o coordenador PAN. Para equilibrar o consumo de energia, o critério de seleção pode ser baseado na soma dos inversos, o mínimo ou a média da energia residual de todos os coordenadores que compõem o caminho para o coordenador da PAN. Além disso, o critério de seleção pode ser baseado no número de saltos (profundidade) entre os candidatos a coordenador e o coordenador da PAN, minimizando os atrasos de transmissão.

QIAN e DARGIE (2013) propuseram três contribuições com as seguintes premissas: o mecanismo de *handover* deve permitir a transmissão de pacotes de dados com um atraso mínimo, a transmissão de dados não deve interferir na descoberta dos APs vizinhos e vice-versa, e o mecanismo de *handover* deve ser acionado apenas quando necessário. O artigo apresenta um modelo matemático para investigar a latência associada ao *handover*. O modelo analítico quantifica a latência de *handover* em função da densidade da rede e do ciclo de trabalho. A proposta de melhoria do mecanismo de *handover* consiste no nodo móvel procurar por um novo AP sem interromper a comunicação com o AP atual, sempre que perceber que seus pacotes não podem ser completamente transmitidos antes de perder a conectividade. Uma vez que um nodo transmissor acessa o meio, ele transmite uma rajada de pacotes de dados. Baseado nos primeiros *beacons* de reconhecimento (ACKs) recebidos dos APs pretendidos, o NM pode estimar a distância relativa entre eles. Essa distância pode ser estimada utilizando-se diversas técnicas disponíveis. Se a distância calculada até o novo AP for maior que um limiar pré-estabelecido, o nodo móvel vai entender que seus pacotes de dados restantes não podem ser

completamente transmitidos antes da perda de conectividade. Como resultado, ele procurará um novo AP sem interromper a comunicação com o atual. Em outras palavras, o *handover* será acionado no máximo uma vez durante a transmissão de dados de um nodo móvel.

No trabalho de ZINONOS e VASSILIOU (2014) foi utilizada duas métricas, o RSSI e a perda da conectividade (*link loss*). A técnica consiste em utilizar inicialmente um limiar de valor de RSSI. Quando este valor estiver abaixo de um limiar pré-definido, o NM começará a procurar por um novo AP. Posteriormente, é utilizado um limite de histerese para perda do *link*. Quando o valor médio de perda do *link* estiver acima do limite pré-estabelecido, o NM começa a procurar por um outro ponto de acesso. Portanto, além da margem de histerese e do valor de RSSI, foi proposta uma nova decisão de *handover* baseada na comparação da perda de *link* entre dois *links*, o atual e o do AP candidato. Esta solução requer que o NM esteja associado a ambos os pontos para que seja capaz de testar a qualidade dos dois *links* antes de decidir. Os autores concluíram que não existe uma única solução para decisão de *handover*, mas sim uma combinação de decisões que pode melhorar o desempenho geral da rede.

FOTOUHI; ALVES; ZAMALLOA e KOUBÂA (2014) propõem um conjunto de métricas para avaliar quando deve ser disparado o mecanismo de *handover*, entre elas estão: RSSI, velocidade do nodo, número de saltos até o AP, tráfego, nível de energia e qualidade do *link*. Para estimar a qualidade do *link* o mecanismo utiliza lógica *fuzzy*. Este mecanismo de *handover* acontece em duas fases: primeiro o NM periodicamente manda mensagens ao seu AP registrado, onde este avalia o RSSI comparado com um limiar e a velocidade do nodo por uma estimativa dada por um sistema de lógica *fuzzy*, decidindo assim pelo *handover*. Caso decida pelo *handover*, inicia a segunda fase do mecanismo que consiste no NM mandar mensagens periódicas a todos os APs ao seu alcance para selecionar o que corresponda as demais métricas como RSSI, tráfego, distância e nível de energia. Essa abordagem de transmissão, apesar de simples tem uma limitação importante: as transmissões levam a redundância de informações aos APs vizinhos. Os parâmetros para decisão são avaliados em uma janela que determina o número mínimo de pacotes para estimar a qualidade do *link*, um limiar com margem de histerese (obtido por experimentação) e um monitoramento de estabilidade do AP candidato. Para tanto o NM envia uma quantidade de *beacons* para avaliar a estabilidade do AP candidato. Neste algoritmo

denominado SMART-HOP, o *handover* é iniciado pelo NM. O NM acompanha o nível de qualidade do *link* durante a fase de transmissão de dados. Um temporizador é responsável por detectar a inacessibilidade do AP correspondente. Portanto, o NM é capaz de detectar a degradação do *link* e inacessibilidade do AP dentro de um curto período de tempo. Então, o NM ocupa uma janela de tempo para avaliação dos APs vizinhos visando mudar para o melhor possível. A qualidade do *link* é um dos parâmetros que significativamente afeta o desempenho do *handover*. Foram aplicados critérios diferentes para estimar o status do *link*, como RSSI, SNR, LQI e estabilidade. Neste caso, devido à dinâmica imposta pela mobilidade, foi utilizada uma amostragem rápida de RSSI e SNR, que se mostraram métricas confiáveis. Resultados experimentais em ambiente controlado revelaram o melhor nível de limiar como -90 dBm e margem de histerese = 5 dBm, obtendo poucas dezenas de milissegundos de atraso de *handover* e taxa de média de pacotes recebidos em torno de 98%.

Em YAZDI; MORAVEJOSHARIEH e RAY (2014) é apresentado um estudo avaliando o desempenho do padrão IEEE 802.15.4 em um ambiente com nodos coordenadores estáticos e nodos móveis com diferentes velocidades. Os resultados mostraram a necessidade de melhorias no processo de *handover* do padrão. Diante disso, propuseram três métodos distintos do nodo móvel decidir o momento do *handover*: *Blind Schema*, *Predictive Schema* e *Threshold-Enabled Predictive Schema*. Enquanto no primeiro, o nodo sensor decide e seleciona o coordenador de destino para uma *handover* sem interrupções baseada apenas em RSSI, nos restantes dois esquemas a direção de movimento do nodo sensor também é considerada junto com o RSSI. Tanto para o segundo como para o terceiro esquema, empregou-se a seguinte ideia-chave: qualquer dispositivo, fixo ou móvel, em uma rede sem fio pode, a qualquer momento, estimar sua distância atual de qualquer estação vizinha medindo a força do sinal recebido (RSSI). No primeiro esquema, o NM ao perder a conectividade e se tornar órfão, escuta o canal por um período de um superquadro para rastrear *beacons* transmitidos pelos APs vizinhos. Com base nesses valores de RSSI, o NM calcula a distância relativa dos APs vizinhos a partir de sua localização atual e, eventualmente, seleciona o AP de menor distância. Embora a possibilidade de se conectar a um coordenador adequado aumente em comparação com o padrão IEEE 802.15.4, com

o aumento da velocidade dos NMs, este esquema pode realizar um grande número de tentativas de associação que acabam consumindo mais energia. No segundo esquema, O NM escolhe o AP mais adequado com base não somente nos valores de RSSI, mas também na direção do movimento do NM. O NM ao se tornar órfão, ouve o canal por um período de dois superquadros para rastrear *beacons* transmitidos pelo APs vizinhos, registrando os valores de RSSI. Depois disso, para cada um dos APs, o NM calcula a diferença entre os valores de RSSI medidos durante os dois períodos. Para todos os APs que aparecem em ambas as rodadas, o melhor AP é determinado com base na maior diferença de valores de RSSI. Isso porque, para um coordenador em particular, quanto maior a diferença entre os valores RSSI, maior a chance do NM estar se movendo em direção a esse AP. No caso dos esquemas anteriores, o NM aguarda quatro *beacons* consecutivos para considerar-se como nodo órfão. Uma vez órfão, o NM tenta associar-se a outro AP (*orphan scan* e *passive scan*). Assim, os esquemas sofrem um atraso devido a esta espera, que pode ser evitado se o NM puder antecipar a possível desconexão de seu atual AP e iniciar as atividades de associação rapidamente. Então, no último esquema proposto pelos autores, o NM tenta conectar-se a um AP apropriado quando o valor de RSSI recebido do seu AP atual ficar abaixo de um limiar pré-definido. Neste esquema, toda vez que o NM receber um *beacon* do AP associado, ele verifica se o valor de RSSI está abaixo do limiar pré-definido. Se estiver abaixo, muda imediatamente seu status para “nodo órfão” e inicia uma nova tentativa de associação. Assim, o processo de *handover* será mais rápido, pois o NM não precisa esperar a falha de quatro *beacons* consecutivos para iniciar o processo de associação.

O trabalho de AYOUB e OUNI (2014) propõe dois mecanismos de re-associação no padrão IEEE 802.15.4. Na primeira abordagem, o processo de *handover* é acionado pelo nodo pai com base em sua energia residual. O coordenador verifica periodicamente sua energia residual, se ficar abaixo de um limiar estabelecido, este envia aos nodos filhos um *beacon* especial informando que eles devem procurar outro coordenador. Então, se o nodo filho encontra múltiplos coordenadores candidatos na sua área de cobertura, associa-se aquele que atenda aos critérios de associação estabelecidos. A energia residual do coordenador é a soma das energias residuais dos coordenadores até o nodo sorvedouro (*sink*). Na segunda abordagem, o processo de *handover* é acionado pelo nodo móvel na mudança de local e perda de

sincronização. Primeiramente tenta reestabelecer a conexão com o nodo pai, caso falhe, tenta buscar novos coordenadores utilizando para tanto o mesmo critério de seleção. Segundo os autores, ambas as abordagens permitem minimizar a perda de pacotes de dados durante o processo de *handover*, enquanto otimizam o consumo de energia e garantem a confiabilidade e a extensão da vida útil da rede. Esta proposta garante confiabilidade, pois permite armazenar pacotes de dados durante o processo de re-associação, a fim de reduzir a quantidade de pacotes perdidos. Este trabalho considera todos os nodos móveis com exceção do sorvedouro (*sink*).

Já em AYOUB e OUNI (2015) propõe-se um procedimento de *handover* rápido baseado numa decisão de associação inteligente para lidar com a mobilidade de vários sensores e garantir a comunicação contínua em RSSF com topologia em árvore baseadas no padrão IEEE 802.15.4. Nesta proposta, o nodo móvel pode antecipar a mudança de coordenador ao detectar a degradação do indicador de qualidade do link (LQI) baseado nos *beacons* recebidos do coordenador e em um limiar. Então, isso permite realizar uma rápida re-associação com base no critério inteligente e retomar o encaminhamento de pacotes armazenados. Simulações mostraram que o procedimento de *handover* rápido garante melhor desempenho de rede do que abordagens semelhantes. Este procedimento é acionado por um nodo móvel quando detecta que a qualidade do *link* com seu coordenador atual está degradada e abaixo de um limiar pré-definido. Então, esse nodo móvel deve executar um procedimento de re-associação rápida, a fim de evitar a perda da conexão e a consequente perda de pacotes. A proposta de *handover* visa conservar a energia, reduzir o atraso fim-a-fim e minimizar a perda de pacotes. Resumindo, utiliza os seguintes métodos: antecipação da mudança do coordenador com base nos valores do indicador de qualidade do link; seleção do novo coordenador mais adequado com base em um critério de associação inteligente que permita otimizar o consumo de energia e o atraso fim-a-fim; e informar os nodos filhos para que eles armazenem todos os pacotes temporariamente até o final do procedimento de *handover* desencadeado por seus coordenadores pais. O critério de associação inteligente proposto é a soma dos inversos da energia remanescente dos coordenadores que compõem o caminho até o nodo sorvedouro (*sink*). Este critério permite selecionar o caminho mais curto com

o máximo de energia restante que pode otimizar o consumo de energia e diminuir a latência.

Em KAUR; SAINI e KAUR (2015) apresentam-se algumas abordagens de mecanismos de *handover* classificando-os de acordo como o processo é iniciado, ou seja, pelo coordenador ou pelo NM. Quando o processo inicia pelo NM, ao se afastar da área de cobertura do coordenador, este inicia a busca por outro coordenador candidato antes mesmo da desconexão, baseando-se na energia residual do coordenador e no indicador de qualidade do *link* (LQI). Ao encontrar um novo coordenador ele envia comando de desconexão do seu coordenador atual e solicita conexão com o outro coordenador selecionado. As que são baseadas no coordenador consistem no nodo iniciar o processo de *handover* quando verificar que a potência energética do seu coordenador for menor que um limiar estabelecido. De acordo com esta abordagem, o coordenador verifica periodicamente sua energia restante comparando com um valor crítico mínimo. Quando estiver abaixo deste limiar, o coordenador envia aos seus nodos um comando de desassociação e o *handover* é realizado. Os testes foram realizados por simulação e demonstraram um avanço em termos de aumento da média de pacotes recebidos na ordem de 8% em relação ao método especificado no padrão IEEE 802.15.4.

### 6.3.1.3 Melhoria na conectividade entre o nodo e o coordenador

Em HUSSAIN e PYUN (2013), a questão da descoberta de coordenador e da associação usando verificação passiva para nodos finais móveis é investigada. Os autores propõem um esquema chamado CADA (*coordinator assisted passive discovery and association*) para dispositivos finais móveis. Este esquema tem como objetivo proporcionar descoberta rápida de coordenadores e reduzir o tempo de associação durante uma mudança de *cluster*. Um coordenador pai de dispositivos finais utiliza o LQI para verificar a mobilidade dos nodos membros e tentar encontrar qualquer nodo móvel se afastando de seu *cluster*. Em caso de movimento, o coordenador pai se comunica com os coordenadores vizinhos para diminuir seus intervalos de *beacon*, auxiliando o dispositivo móvel na descoberta passiva rápida. O tempo de associação é reduzido através do pedido de atribuição de endereço de rede temporário para o eventual dispositivo móvel, recebido pelos coordenadores vizinhos

a partir do coordenador pai do nodo móvel. Isso ajuda a eliminar a necessidade de tempo de espera de resposta em dispositivos finais durante a troca de mensagens do processo de associação.

No trabalho de HUSSAIN e PYUN (2014) foi proposta uma modificação no procedimento de re-associação do IEEE 802.15.4 para diminuir a frequência de re-associação e latência para uma RSSF baseada em topologia em árvore de clusters com *beacon* habilitado e nodos móveis. O esquema denominado PRA (*preemptive re-association*) foi elaborado para detectar a perda de conectividade preventivamente. Além disso, o método realiza um procedimento de re-associação rápida e seleciona coordenadores que podem fornecer maior tempo de conectividade durante a re-associação. No caso de redes com o parâmetro ordem de *beacon* (BO) alto, o método também tenta diminuir o intervalo de *beacon* dos coordenadores que estão próximos dos dispositivos móveis. Em suma, em primeiro lugar, é utilizada uma abordagem *make-before-break* que reduz o atraso de detecção de perda de conectividade após mudança de *cluster*. Em segundo lugar, a varredura de órfão (*orphan scan*) não é utilizada porque nesta abordagem, o NM está conectado a um AP ao fazer a varredura, portanto não virando um nodo órfão. Em terceiro lugar, a varredura passiva (*passive scan*) é executada somente no canal atual para diminuir o tempo de varredura. Por fim, para redes com BO alto, diminui-se o valor de BO dos coordenadores vizinhos quando o coordenador pai percebe uma conectividade fraca com qualquer um dos seus nodos filhos. Isso ajuda o dispositivo filho com baixa conectividade a selecionar rapidamente o novo coordenador. Por outro lado, para diminuir a frequência de *handover*, é proposto um novo critério de seleção de coordenadores que leva em consideração a qualidade do *link* (LQI) entre o nodo móvel e o coordenador. Como resultado, a conectividade pode ser melhorada selecionando-se o coordenador com a melhor qualidade de sinal. Resultados de simulação mostraram que este método fornece de 5% a 30% a mais de conectividade por coordenador do que o padrão IEEE 802.15.4. Por outro lado, o procedimento de re-associação rápida reduz a latência de re-associação de 2 a 3,5 vezes em comparação com o padrão.

Em POSTIGO-MALAGA; SUPO-COLQUEHUANCA; MATTA-HERNANDEZ; PARI *et al.* (2016) é proposto um sistema híbrido com base nos valores de RSSI e um *backbone* de APs em malha. A proposta de arquitetura considera dois níveis de comunicação que integram três tipos de dispositivo: o nodo sensor, o nodo AP e o nodo coordenador. O nodo AP é composto por dois roteadores, um dos roteadores é responsável pelo gerenciamento das comunicações entre nodos sensores e o segundo é responsável pelas comunicações entre os nodos AP e o nodo coordenador, onde a malha do tipo *backbone* é formada. Isso é, os nodos APs são as pontes de comunicação entre os nodos e o roteador. Essa arquitetura permite a configuração de duas redes PAN. A primeira consiste nos APs e nos nodos, e a segunda entre os APs e os roteadores formando uma rede em malha. Assim, os nodos não precisam se associar ou desassociar sempre que eles se movem de um AP para outro porque todos os nodos terminais estão configurados com o mesmo PAN ID. Além disso, todos os APs são fixos, o que garante boa qualidade nas comunicações entre os APs e o nodo coordenador. A cada período de tempo, o nodo envia suas leituras para os APs e, dentre aqueles que recebem, o escolhido será o nodo AP que possuir o melhor nível de RSSI. O AP registra diretamente o nodo coordenador através do *backbone*. A seguir, é apresentada uma síntese dos trabalhos selecionados na revisão sistemática da literatura, classificando-os principalmente, nas categorias anteriormente apresentadas.

### **6.3.2 Síntese da RSL**

Nas seções anteriores, algumas das propostas de *handover* mais relevantes obtidas na RSL foram apresentadas de acordo com a principal estratégia usada para melhorar o processo de associação. Nesta seção, essas propostas são classificadas de acordo com os demais eixos, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados da revisão sistemática.

Eixos	Classificação / Referências	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Estratégia	Modificação	✓	✓		✓						✓									
	Antecipação		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Tempo de Handover		✓	✓																✓
Critérios	Lógica Fuzzy						✓													✓
	LQI			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	RSSI		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Tempo de Conectividade						✓													
	Movimento/direção/posição						✓		✓											✓
Topologia	Velocidade							✓												
	Energia								✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	caminho									✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Lista de Canais																			✓
	Distância			✓							✓									✓
Decisão	BO													✓						
	Link Loss														✓					
	Malha		✓													✓	✓	✓	✓	✓
	Cluster-tree			✓													✓	✓	✓	✓
	Estrela																			✓
Coordenador	Nodo		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Coordenador														✓					✓

Fonte: do autor.

Com relação à estratégia adotada para o *handover*, a maioria dos estudos antecipa a seleção de um coordenador mais apropriado ao detectar a degradação da

conexão entre o NM e o coordenador (referências 3-13, 15-17 - Tabela 10). Outra característica relevante é que a principal modificação no mecanismo de associação visa reduzir o número de canais de varredura em caso de perda de conectividade (ref. 2,5,14,19) e algumas propostas tentam reduzir o tempo de associação (ref. 3,4,18).

Em relação aos critérios utilizados para escolher o momento adequado para realizar o *handover*, pode-se observar na Tabela 10 que a grande maioria dos estudos é baseada no RSSI (ref. 3,7-9,12,13,15,18) e/ou LQI (ref. 4-6,8,11-14,16-17) para a tomada de decisão de *handover*. Outros trabalhos utilizaram como critério a energia residual dos nodos móveis (ref. 6-10,15-17). Também são encontrados alguns estudos que utilizam a direção do movimento ou a posição do nodo móvel como critério de decisão (ref. 5,9,15). Por fim, os trabalhos (ref. 3,9,18) consideraram como critério de decisão a distância do nodo móvel ao coordenador e os trabalhos (ref. 6,8,15) consideraram o caminho do nodo móvel até o coordenador. Algumas propostas são baseadas em múltiplos critérios (ref. 8,15) e os demais estudos consideraram apenas um ou no máximo dois critérios de selecionar o melhor momento para a decisão de *handover*.

Com relação à topologia adotada nos trabalhos analisados, a topologia *cluster-tree* foi predominantemente escolhida, seguida da topologia em malha. Este é um resultado esperado, pois as topologias em malha e *cluster-tree* possibilitam cobrir uma área maior, pois na topologia em estrela os nodos devem todos estar ao alcance do coordenador, o que limita a área de cobertura da rede.

Em relação à decisão do *handover* ser realizada pelo nodo móvel ou pelo coordenador, observou-se que em um grande número de trabalhos o nodo móvel é quem inicia o processo de tomada de decisão de *handover*. Apenas dois trabalhos propõem o processo de iniciação pelo nodo coordenador (ref. 4,13). Também foram encontrados trabalhos em que a tomada de decisão de *handover* é distribuída entre o NM e o coordenador (ref. 10,12,17).

Finalmente, estudos demonstram a influência dos parâmetros CSMA/CA no desempenho das RSSFs. No mecanismo de associação proposto neste trabalho, são modificados os parâmetros do CSMA/CA, a fim de reduzir o tempo gasto no processo de associação. No que diz respeito à eficiência de comunicação, muitos trabalhos com abordagem semelhante são encontrados na literatura (ANASTASI; CONTI; FRANCESCO, 2011; BOUGHANMI; SONG; RONDEAU, 2009; FRANCESCO;

ANASTASI; CONTI; DAS *et al.*, 2011; KIM; KANG, 2010; KOUBAA; ALVES; NEFZI; SONG, 2006; SEMPREGOM; MORAES; MONTEZ; PORTUGAL *et al.*, 2014; XIA; LI; HAO; KONG *et al.*, 2013). Neste trabalho, um conjunto adequado de parâmetros é selecionado para a transmissão de mensagens durante o processo de associação. Ao contrário de CHONG; HWANG; SUNG e NAM (2014), que abordam o aprimoramento do mecanismo de associação baseado no parâmetro CW, este trabalho tem como foco a definição dos parâmetros *macMinBE* e *macMaxBE*, que são os que mais impactam na eficiência de transmissão de mensagens.

Esta seção apresentou uma revisão sistemática da literatura com o estado da arte das propostas de melhorias para o mecanismo de associação em RSSF no padrão IEEE 802.15.4, proporcionando uma base teórica necessária para o desenvolvimento das melhorias no processo de *handover*. A partir do estudo da literatura, evidencia-se a necessidade de contribuição para o estado da arte em relação ao procedimento de associação do padrão IEEE 802.15.4.

#### 6.4 ESQUEMA PROPOSTO

O foco principal desta tese é propor suporte de mobilidade para nodos móveis em RSSF melhorando os mecanismos de associação e re-associação e, conseqüentemente, reduzindo o tempo em que um nodo perde a comunicação com a rede. Considerou-se uma infraestrutura de comunicação de monitoramento com nodos fixos em uma topologia de árvore de *cluster*, em que um ou mais nodos móveis geram fluxos de mensagens com requisitos de tempo garantidos. Com base na revisão sistemática da literatura, na definição do problema e nos resultados dos experimentos práticos, é possível propor melhorias para o processo de associação e re-associação de nodos móveis utilizando múltiplas estratégias. Em primeiro lugar, implementando o procedimento de associação FastA especificado no padrão IEEE 802.15.4e. Em segundo lugar, suprimindo a varredura órfã. Como o método de decisão de *handover* proposto é invocado antes que a conectividade com a rede seja perdida, a varredura órfã é desnecessária. Em terceiro lugar, reduzindo o número de canais na operação de varredura, já que a rede *cluster-tree* é configurada para operar

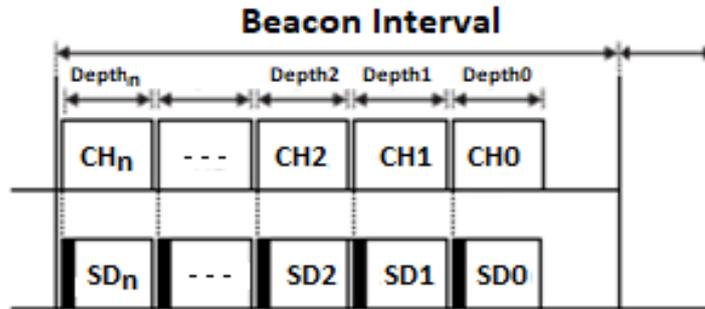
em um único canal. Além dessas estratégias, as principais contribuições deste trabalho estão focadas na melhoria da eficiência do processo de associação, destacando a antecipação do mecanismo de *handover* com base em uma decisão proativa e uma configuração adequada nos parâmetros do CSMA/CA do padrão IEEE 802.15.4.

#### 6.4.1 Formação da Rede

Ao implementar uma infraestrutura de comunicação para monitoramento baseada em RSSF no padrão IEEE 802.15.4 com topologia *cluster-tree* utilizando nodos móveis, diversos são os requisitos impostos pelos protocolos na formação da rede, tais como: possibilidade de colisão de *beacons* (escalonamento), integração de nodos móveis em uma rede pré-estabelecida (associação e re-associação); garantia da conectividade sem perda de pacotes (*handover*, *buffers*), além da garantia de cumprimento dos requisitos de tempo através da eficiente alocação de recursos (*superframe duration*).

##### 6.4.1.1 Escalonamento

Em redes de agrupamento de *cluster* (*cluster-tree*), o agrupamento de nodos é apenas lógico e dois nodos em *clusters* diferentes podem interferir uns com os outros. Quando dois *clusters* fisicamente próximos transmitem *beacons* ao mesmo tempo, o *beacon* e a transmissão de dados nesse *cluster* podem colidir. Portanto, quando os *beacons* em diferentes *clusters* não são cuidadosamente planejados, isso pode causar retransmissões e, eventualmente, perda de pacotes. A fim de evitar essa colisão *inter-cluster*, considerou-se o uso de um algoritmo de escalonamento baseado em LEÃO; MONTEZ; MORAES; PORTUGAL *et al.* (2017), que impede a sobreposição de quadros de *beacons* entre *clusters*. A avaliação da duração do superquadro é realizada através de uma abordagem de escalonamento com um esquema *bottom-up*, onde as durações dos superquadros são ordenadas em uma sequência de baixo para cima, ou seja, primeiro os *clusters* mais profundos, depois os *clusters* de menor profundidade e assim por diante até se chegar ao coordenador PAN. A Figura 25 ilustra o escalonamento *bottom-up* para o cenário proposto.

Figura 25 – Escalonamento *bottom-up*.

Fonte: (LEÃO; MONTEZ; MORAES; PORTUGAL *et al.*, 2017).

Considerou-se que os períodos ativos dos *clusters* são compostos apenas pelos períodos de contenção, ou seja, não está se considerando o tráfego de mensagens com restrições de tempo que exigem um intervalo de tempo garantido (GTS). Qualquer nodo pode enviar mensagens durante o período ativo de seu cluster. Para o modelo de tráfego de mensagens, assumiu-se que o NM envia periodicamente mensagens para um nodo *sink* através do roteamento de caminho da árvore (tráfego *upstream*). Para implementar um esquema de agendamento de *beacon*, considerou-se algumas restrições de protocolo, apresentadas a seguir.

#### 6.4.1.2 Tamanho do Intervalo de *Beacon*

O intervalo de *beacon* (BI) deve ser grande o suficiente para garantir que todas as durações de superquadro (SD) possam ser programadas e, deve ser o menor possível para reduzir o atraso fim-a-fim. Assim, o BI pode ser expresso por:

$$BI \geq \sum_{j=1}^{N_{CH}} SD_j, \quad (3)$$

onde BI é o intervalo de *beacon*;  $SD_j$  é a duração do superquadro  $j$  e  $N_{CH}$  é o número de *clusters-heads*.

Considerando  $S = (S_1, S_2, S_3 \dots S_i)$  um conjunto de fluxos de mensagens para transferir em um conjunto de períodos  $P = (P_1, P_2, P_3 \dots P_i)$ , respectivamente. Considere que um fluxo de mensagens  $S_i$  gera uma nova mensagem a ser transferida a cada

período  $P_i$ , e que qualquer nodo é capaz de enviar mensagens somente durante seu período ativo de *cluster*, há uma restrição óbvia imposta pela periodicidade do fluxo de mensagens no intervalo de *beacon*. Como o período de geração de mensagens não é sincronizado com as chegadas de *beacon*, pode ocorrer que uma mensagem seja gerada logo após o final do período ativo do *cluster*. Consequentemente, esta mensagem seria transmitida apenas durante o próximo período ativo. Para garantir que uma mensagem possa ser transferida em apenas um intervalo de *beacon* antes da próxima geração de mensagem, o período  $P_i$  deve ser sempre maior que o intervalo de *beacon* mais  $\delta$ , onde  $\delta$  é o tempo máximo necessário para transmitir uma mensagem. Assim:

$$BI \leq \min \{P\} - \delta \quad (4)$$

Das equações (3) e (4), tem-se:

$$\sum_{j=1}^{N_{CH}} SD_j \leq BI \leq \min \{P\} - \delta \quad (5)$$

Portanto, a equação (5) representa uma importante restrição de protocolo para redes *cluster-tree*.

#### 6.4.1.3 Tamanho de *Buffers*

Em uma rede *cluster-tree*, cada CH deve ser capaz de armazenar, no pior dos casos, todos os fluxos de mensagens provenientes de seus nodos filhos. Ou seja, tem-se a seguinte restrição de *buffer*:

$$B_j \geq \sum_{n \in S_{below}^j} S_n, \quad \text{para } 1 \leq n \leq N_{nodes}, \quad (6)$$

onde  $B_j$  é o tamanho do *buffer* do *cluster-head*  $j$  e,  $n$  é o número de mensagens geradas pelos fluxos de mensagens  $S_j$  localizados nos nodos filhos durante um intervalo de *beacon*.

O nodo móvel também deve ser capaz de armazenar todos os fluxos de mensagens durante um período de desconexão, ou seja, durante tempo suficiente para concluir todo o procedimento de nova associação. Essa restrição de *buffer* é dada por:

$$B_{MN} \geq \sum_{i \in S} \left\lceil \frac{P_i}{t_{handover}} \right\rceil, \quad (7)$$

onde  $B_{MN}$  é o tamanho do *buffer* do NM,  $P_i$  é o período do fluxo de mensagens  $i$  e  $t_{handover}$  é o tempo gasto para a re-associação.

#### 6.4.1.4 Alocação de superframe durations (SD)

Nesta subsecção é apresentado um esquema de alocação de duração de superquadro, conforme proposto em LEÃO; MONTEZ; MORAES; PORTUGAL *et al.* (2017), que aloca uma duração de superquadro para cada *cluster* proporcionalmente à quantidade de nodos descendentes deste *cluster*. Este esquema considera que a topologia da rede é conhecida na configuração do sistema. Inicialmente, o esquema define um valor para o BI considerando a restrição imposta pela Equação 5. Considera-se também um número  $X$  de mensagens transferidas durante a duração mínima de um superquadro ( $SD_{min}$ ). Esta duração mínima corresponde ao parâmetro SO configurado para 0 (Equação 2). É considerado ainda um número  $N$  de nodos descendentes hierarquicamente abaixo do *cluster-head* analisado, incluindo seus nodos filhos e os nodos filhos acumulados de cada *cluster-head* filho. Portanto, a duração dos superquadros dos *cluster-heads* pode ser obtida por:

$$SD_j = \left\lceil \frac{N}{X} \right\rceil \times SD_{min}, \quad (8)$$

onde  $j$  é o número do *cluster-head* analisado.

De acordo com as restrições impostas pela Equação 2:

$$SD_j = SD_{min} \times 2^{SO_j} \quad (9)$$

Das Equações 8 e 9, é derivada a seguinte equação:

$$\left\lceil \frac{N}{X} \right\rceil \times SD_{min} = SD_{min} \times 2^{SO_j}$$

Logo:

$$SO_j = \left\lceil \log_2 \left( \left\lceil \frac{N}{X} \right\rceil \right) \right\rceil \quad (10)$$

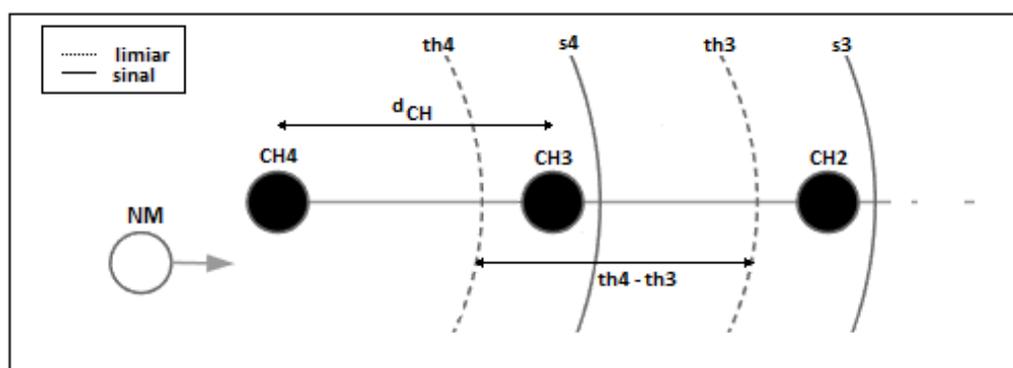
onde  $j$  é o número do cluster-head analisado. A partir da Equação 10 é possível calcular o parâmetro de ordem dos superquadros (SO) de cada cluster-head, alocando de forma proporcional a duração dos superquadros, evitando a sobreposição de quadros de beacons entre os clusters.

Além das restrições de protocolos, outros fatores também podem influenciar na modelagem da rede, como a velocidade e a direção do nodo móvel. A próxima seção trata das questões relacionadas ao movimento dos nodos.

#### 6.4.2 Movimento do nodo

A velocidade e a direção do nodo são questões importantes a serem consideradas no procedimento de *handover*. Se um nodo sensor se move mais rápido, o tempo para realizar a transferência de ponto de acesso deve ser menor. Por outro lado, se um nodo se move mais devagar, há mais tempo para concluir a transferência. Essa situação geralmente cria problemas para um nodo em movimento, porque ele recebe um *beacon* de um coordenador e tenta se associar, mas pode não concluir o processo de associação devido ao seu deslocamento. A Figura 26 ilustra uma análise da velocidade do nodo móvel em relação ao tempo de *handover*.

Figura 26 – Velocidade do nodo móvel.



Fonte: do autor.

Como exemplificado na Figura 26, o NM está inicialmente associado ao CH4 e se move em direção ao CH3. Quando o NM alcança o limiar de CH4 ( $th_4$ ), inicia o procedimento de busca de um CH com melhor sinal para uma nova associação. Nesta situação, o processo de *handover* deve ser concluído antes do NM atingir o limiar de CH3 ( $th_3$ ). Se NM se mover muito rápido, enquanto aguarda uma resposta do CH3, ele já pode estar fora do alcance de CH3. Assumindo que os *cluster-heads* são idênticos e estão distribuídos simetricamente, a distância entre os limiares ( $th_4 - th_3$ ) pode ser considerada igual a distância entre os CHs ( $d_{CH}$ ). Dessa forma, o tempo necessário para realizar o processo de *handover* ( $t_{handover}$ ) pode ser expresso pela seguinte equação:

$$t_{handover} \leq \frac{d_{CH}}{V_{NM}}, \quad (8)$$

onde  $V_{NM}$  é a velocidade do nodo móvel.

Se o NM se mover muito rápido, o limiar deve ser menor, pois o tempo para realizar o *handover* é menor. Portanto, a velocidade do nodo móvel é outra restrição importante a ser considerada no modelo.

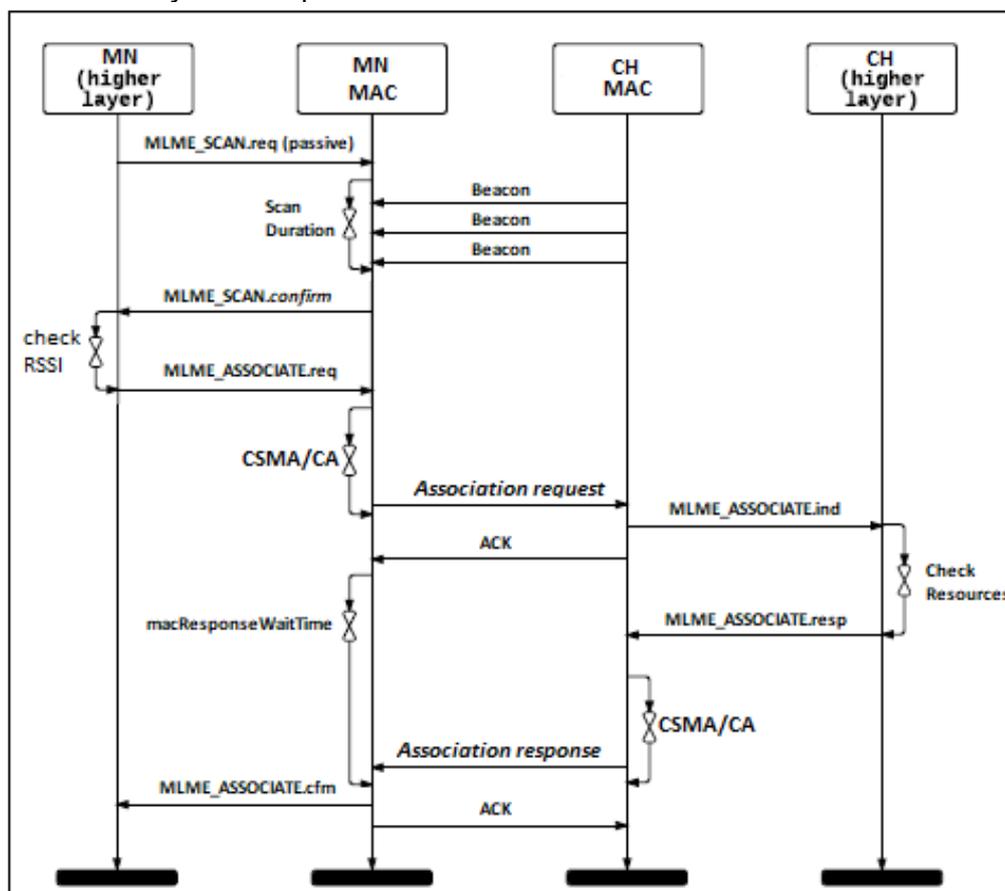
Com relação à direção do nodo, considerou-se um *backbone* de nodos fixos, onde um NM se move por toda área de cobertura em linha reta, ou seja, do nodo sorvedouro até o nodo fixo mais distante e retorna. Assumindo que toda a área de mobilidade da rede é coberta por CHs (Figura 26) e um NM está associado em determinado momento ao CH4, por exemplo, o pior caso ocorre quando o NM estiver se deslocando em direção ao nodo CH3, atingir o limiar de CH4 ( $th_4$ ), conseguir se associar imediatamente ao CH3, e em seguida mudar de direção. Como mencionado anteriormente, o procedimento de *handover* deve ser concluído antes do NM atingir o próximo limiar, neste exemplo, o limiar de CH3 ( $th_3$ ). Portanto, no pior caso e para o cenário proposto, é possível afirmar que a direção do nodo móvel não faz diferença no processo de associação.

#### 6.4.3 Antecipação da decisão de *handover*

Como descrito anteriormente, a decisão de *handover* pode ser baseada em vários parâmetros. Os mecanismos usados para obter esses parâmetros podem

sobrecarregar a sinalização da rede e, assim, reduzir a vida útil dos nodos. Nessa proposta, considerou-se uma decisão de *handover* com base na média do RSSI de consecutivos *beacons* recebidos pelo nodo móvel a partir dos coordenadores vizinhos. A média do RSSI de cada coordenador é obtida usando uma técnica de janela deslizante, evitando possíveis erros de leitura no valor de RSSI devido à distância, interferências e colisões de pacotes. Essa janela deslizante é formada inicialmente por três leituras consecutivas de RSSI, sendo calculada a primeira média a ser comparada ao limiar. Ao realizar uma nova leitura, este último valor fará parte da composição da nova média com os dois últimos valores. O nodo móvel mantém uma tabela com os valores de RSSI obtidos dos coordenadores próximos, os quais serão utilizados para a tomada de decisão de *handover*. Esta tabela é atualizada periodicamente enquanto o nodo móvel se move na área de cobertura da rede. A Figura 27 ilustra a sequência de troca de mensagens do mecanismo de associação antecipada.

Figura 27 – Associação antecipada.



Fonte: do autor.

Quando um nodo móvel é ativado na rede *cluster-tree*, ele inicia um processo de associação ouvindo *beacons*. Ao receber *beacons* de um CH, o nodo móvel verifica as informações do quadro de *beacon*, identificando os dados do *cluster*, o período ativo e o valor do RSSI. Em seguida, o nodo móvel prepara um pedido de associação e envia para o CH candidato e espera por um pacote de confirmação (ACK) e um pacote de confirmação de associação. Esse CH, ao receber a solicitação de associação de um nodo móvel, envia um pacote de confirmação e avalia se há recursos para a associação. Se a associação for possível, o CH envia um pacote de confirmação de associação ao nodo móvel e este envia um pacote de confirmação ao CH. A partir desse ponto, o nodo móvel começa a enviar pacotes de dados no período ativo do CH associado.

O nodo móvel, ao receber *beacons*, armazena os três últimos valores lidos de RSSI (parametrizável). Ao se movimentar, ele escuta os *beacons* provenientes dos CHs vizinhos. Em seguida, o nodo móvel verifica, a partir de cada *beacon* recebido, se o RSSI é superior ao limiar de RSSI estabelecido. Conforme experimentos anteriores e dados da literatura, o valor do limiar de RSSI foi estabelecido em -87 dBm (SRINIVASAN; LEVIS, 2006). Se a média dos valores de RSSI dos *beacons* recebidos for maior que esse limiar, o nodo móvel verificará se esse valor é maior que a média dos valores de RSSI do CH atual, armazenado anteriormente. Se a média dos valores de RSSI recebidos for maior, o nodo móvel solicitará a associação com o novo CH. Se o processo de associação estiver concluído durante o período ativo do novo CH, o nodo móvel será sincronizado com o novo CH e começará a enviar pacotes de dados no período ativo do CH. Então, o nodo móvel gera um pacote de desassociação para o CH anterior, que é enviado durante o período ativo. Se o nodo móvel não completar o processo de associação, ele manterá a associação com o CH anterior.

#### **6.4.4 Seleção adequada de parâmetros do CSMA/CA**

Essa abordagem destina-se a selecionar valores adequados para os parâmetros do CSMA/CA em um procedimento de associação, visando reduzir o tempo total gasto neste processo. O comportamento do CSMA/CA com *slot* é afetado

por quatro parâmetros de inicialização, a saber: expoente de *backoff* mínimo (*macMinBE*), expoente máximo de *backoff* (*macMaxBE*), valor inicial do CW (*CWinit*) e número máximo de retornos (*macMaxCSMABackoffs*). Alterar o valor de qualquer um desses parâmetros pode acarretar um impacto significativo no desempenho da rede. Os parâmetros *macMinBE* e *macMaxBE* definem os valores de BE, que fornecem o intervalo gerado  $[0, 2^{BE}-1]$  para selecionar a duração aleatória dos períodos de *backoff* para os quais um nó deve aguardar antes de tentar acessar o canal de comunicação. Portanto, esses dois parâmetros influenciam diretamente no desempenho da rede.

Os nodos que utilizam valores de BE mais altos geralmente aguardam mais tempo para acessar o canal de comunicação. No entanto, também reduz a probabilidade de dois ou mais nodos transmitirem mensagens ao mesmo tempo, o que diminui as colisões e aumenta a taxa de dados enviados com sucesso. Com valores BE menores, os nodos aguardarão um tempo menor para disputar o canal de comunicação. No entanto, se o número de nodos concorrentes com valores de BE menores for grande, a probabilidade de os nodos avaliarem o meio como ocupado também aumentará, juntamente com a probabilidade de colisões.

O objetivo desta estratégia é atribuir valores de parâmetros CSMA/CA diferentes ao *macMinBE* e *macMaxBE* para o coordenador PAN e para os nodos, visando melhorar a probabilidade de associação bem-sucedida e o reduzir o tempo dos pacotes de reconhecimento do coordenador PAN. Sempre que um nodo desejar transmitir uma mensagem de solicitação de associação, valores diferenciados serão atribuídos de acordo com o tipo de nodo.

Em um trabalho anterior realizado no grupo de pesquisa e descrito em CONSTANCE; LAU; MORAES; ARAUJO *et al.* (2017), um conjunto de experimentos por simulação foi realizado para avaliar o tempo total gasto durante o processo de associação. Para tanto, foi utilizada uma RSSF padrão IEEE 802.15.4 com vários nodos e diferentes combinações dos parâmetros *macMinBE* e *macMaxBE*. A atribuição de valores diferenciados para os parâmetros *macMinBE* e *macMaxBE* foi realizada conforme os Algoritmos 1 e 2 abaixo. Sempre que um nodo desejar transmitir uma mensagem de solicitação de associação, os valores diferenciados serão atribuídos de acordo com o tipo de nodo (coordenador ou nodo).

Algoritmo 1. Nodo	Algoritmo 2. Coordenador
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>macMinBE</i> = 3</li> <li>2. <i>macMaxBE</i> = 5</li> <li>3. <i>macMinBEAssociation</i> = ?</li> <li>4. <i>macMaxBEAssociation</i> = ?</li> <li>5. <b>if</b> <i>typeMessage</i> = <i>association</i> <b>then</b></li> <li>6.   <i>BE</i> = <i>macMinBEAssociation</i></li> <li>7. <b>else</b></li> <li>8.   <i>BE</i> = <i>macMinBE</i></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li><i>macMinBE</i> = 3</li> <li><i>macMaxBE</i> = 5</li> <li><i>macMinBEPANAssociation</i> = ?</li> <li><i>macMaxBEPANAssociation</i> = ?</li> <li><b>if</b> <i>typeMessage</i> = <i>association</i> <b>then</b></li> <li>   <i>BE</i> = <i>macMinBEPANAssociation</i></li> <li><b>else</b></li> <li>   <i>BE</i> = <i>macMinBE</i></li> </ol>

Foram realizados extensivos testes com parâmetros alternativos e os resultados foram comparados ao tempo total gasto no processo de associação dos nodos usando os valores *default* do padrão IEEE 802.15.4 (*macMinBE* = 3 e *macMaxBE* = 5). Quando a estratégia de mudança do parâmetro MAC é utilizada, o processo de troca de mensagens de associação via CSMA/CA é realizado com os parâmetros alternativos (*macMinBEAssociation* e *macMaxBEAssociation* para o nodo e *macMinBEPANAssociation* e *macMaxBEPANAssociation* para o coordenador).

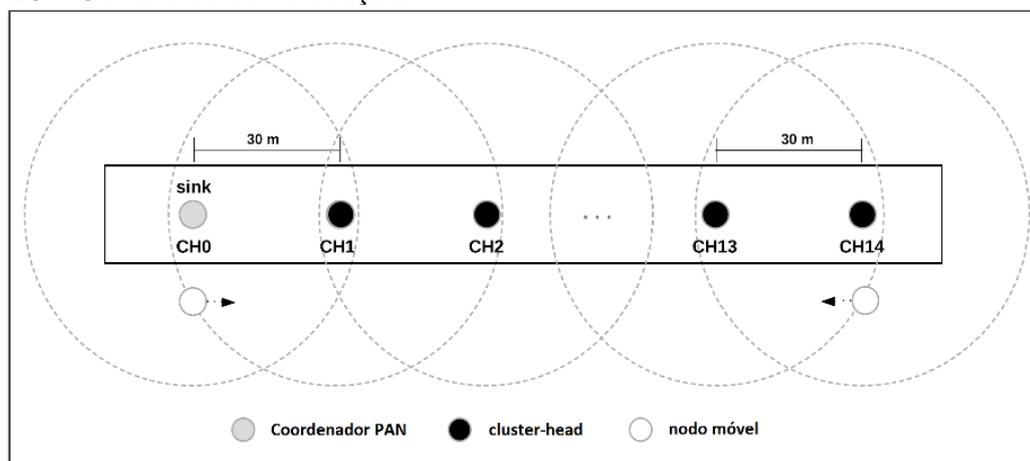
Os resultados mostraram que uma seleção adequada dos parâmetros CSMA/CA tem um impacto significativo no desempenho do processo de associação. Para redes com uma quantidade grande de nodos, utilizando-se os parâmetros *default* do padrão IEEE 802.15.4, os resultados foram piores do que os com parâmetros diferenciados utilizados no processo de associação. Além dos resultados, esta estratégia também se justifica porque os nodos que usam valores de BE mais altos aumentam a probabilidade de sucesso no envio de suas solicitações de associação e o coordenador usando valores reduzidos de BE tem maior prioridade ao transmitir respostas de solicitação de associação. Para fornecer o maior nível de prioridade possível para o coordenador, o mesmo foi configurado com os valores de *macMinBEPANAssociation* = 1 e *macMaxBEPANAssociation* = 1, e para os nodos, os melhores resultados foram obtidos com os valores de *macMinBEAssociation* = 8 e *macMaxBEAssociation* = 8. Estes valores serão utilizados no decorrer da avaliação do esquema proposto.

## 6.5 AVALIAÇÃO DA PROPOSTA

### 6.5.1 Modelo da Rede

O mecanismo de comunicação proposto é baseado nas redes padrão IEEE 802.15.4 em topologia *cluster-tree*. O modelo apresenta um conjunto de nodos fixos atuando como *cluster-heads* (CH0 a CH14), organizados no formato de um *backbone* (uma ramificação da árvore), dispostos de modo a cobrir uma determinada área, conforme ilustra a Figura 28.

Figura 28 – Cenário de comunicação.



Fonte: do autor.

Como mostra a Figura 28, quinze nodos fixos (CHs) foram dispostos a cada 30 metros simulando uma pista oficial de corrida cuja extensão é de 450 metros. Exemplos típicos de cenários reais semelhantes ao experimento proposto podem ser encontrados em um ambiente externo como uma estrada, ou ambiente interno como um corredor de hospital, por exemplo. O coordenador da PAN (CH0) é um FFD especial atuando como a raiz da árvore e nodo sorvedouro (*sink*). O nodo *sink* pode atuar como um *gateway* entre a RSSF e outras redes (por exemplo, internet). A disposição dos *cluster-heads* (CH) garante que a área de cobertura entre os CHs adjacentes seja sobreposta. Além disso, considerou-se que todos os CHs estavam conectados a uma fonte de alimentação evitando possíveis problemas com a falta de bateria. Considerou-se também, para efeito de análise, nodos móveis movendo-se ao

longo da área de cobertura da rede. Nesse cenário, o NM é inicialmente associado ao CH0 e se move em direção ao nodo mais profundo (CH14) e retorna.

### 6.5.2 Análise Numérica

Nesta subseção, é apresentado um exemplo para ilustrar o uso do esquema de alocação de superquadros proporcional, verificando o cumprimento dos requisitos impostos pelo protocolo de comunicação. Considera-se o exemplo de uma rede *cluster-tree* composta de 15 *cluster-heads*, conforme ilustra a Figura 28. Por uma questão de simplicidade, todos os valores representados nesta subseção são múltiplos de  $SD_{min}$  (mínima duração do superquadro). Considerou-se também que cada nodo móvel manipula um fluxo de mensagens. No contexto desta proposta, os *cluster-heads* não geram nenhum fluxo de mensagens. Baseado na subseção 6.4.1.4 e, para efeito dessa análise, assume-se o parâmetro X como três, ou seja, é possível enviar 3 fluxos de mensagens por  $SD_{min}$ . Considera-se também um limite de associação de nodos filhos para cada *cluster-head* igual a seis ( $maxchildren = 6$ ). Como pior caso, analisou-se o *cluster-head* mais profundo da árvore (CH14), com um máximo de nodos possíveis associados. De acordo com a Equação 8, tem-se:

$$SD_{14} = \left\lceil \frac{6}{3} \right\rceil \times SD_{min} ,$$

A duração do superquadro do CH14 é igual a  $2 \times SD_{min}$ , portanto, o CH14 necessita de dois  $SD_{min}$  para enviar os fluxos de mensagens de seus nodos filhos. De acordo com a Equação 10, é possível calcular o  $SO_{14}$ , como segue:

$$SO_{14} = \left\lceil \log_2 \left( \left\lceil \frac{6}{3} \right\rceil \right) \right\rceil = 1$$

Seguindo o mesmo raciocínio para os demais *cluster-heads*, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 11:

Tabela 11 – Exemplo de cálculo de SD e SO.

CH	Nodos descendentes	SD	SO
14	6	2 x $SD_{min}$	1
13	12	4 x $SD_{min}$	2
12	18	6 x $SD_{min}$	3
11	24	8 x $SD_{min}$	3
10	30	10 x $SD_{min}$	4
9	36	12 x $SD_{min}$	4
8	42	14 x $SD_{min}$	4
7	48	16 x $SD_{min}$	4
6	54	18 x $SD_{min}$	5
5	60	20 x $SD_{min}$	5
4	66	22 x $SD_{min}$	5
3	72	24 x $SD_{min}$	5
2	78	26 x $SD_{min}$	5
1	84	28 x $SD_{min}$	5
0	90	30 x $SD_{min}$	5

Fonte: do autor.

Após definir a duração do superquadro para todos os *cluster-heads*, as restrições de protocolo e tempo precisam ser verificadas. O intervalo de *beacon* (BI) deve satisfazer a restrição imposta pela Equação 5, onde a soma dos SDs deve ser menor ou igual ao valor de BI, e o valor de BI menor ou igual ao menor período dos fluxos de mensagens. Considerando que a soma das durações dos superquadros no exemplo é igual a  $240 \times SD_{min}$ , o valor de BI inicial para calcular os SDs deve considerar que o parâmetro BO seja igual a 8 ( $BI = 2^8 \times SD_{min} = 256 \times SD_{min}$ ), satisfazendo a primeira restrição da Equação 5. Quando  $SO = 0$ , tem-se a menor duração do superquadro ( $SD_{min}$ ), que equivale a 15,36 ms (Equação 2). Para cumprir os *deadlines* dos fluxos de mensagens, de acordo com a Equação 5, BI deve ser menor que o menor período das mensagens. Nesta análise, BI é igual a 3,932 segundos ( $256 \times 15,36$ ), portanto, para satisfazer a segunda restrição da Equação 5, o menor período dos fluxos de mensagens deve ser de aproximadamente 4 segundos, o que corresponde a uma taxa de dados de 0.25 pacotes/segundo por nodo.

### 6.5.3 Simulação

A infraestrutura de comunicação proposta foi implementada no simulador de rede OMNeT++ 4.6 com *framework* Castalia 3.3<sup>11</sup>. O modelo de simulação da rede foi baseado em LEÃO; MORAES; MONTEZ; PORTUGAL *et al.* (2017).

O Castalia é um simulador de evento discreto de código aberto para RSSFs e redes corporais sem fio (WBAN), desenvolvido pelo National ICT Australia (NICTA) e baseia-se na plataforma OMNeT ++. Castalia é um simulador muito popular, amplamente utilizado por pesquisadores e desenvolvedores para testar protocolos usando modelos de canais e rádios realistas. O Castalia implementa um modelo de canal sem fio avançado, baseado em dados medidos empiricamente. Além disso, o simulador fornece modelos de comunicação de rádio baseados em rádios reais. O Castalia originalmente disponível fornece um modelo baseado no padrão IEEE 802.15.4, porém bastante limitado. Basicamente, ele implementa as funcionalidades do CSMA/CA e uma topologia em estrela ativada por *beacon*, incluindo um procedimento de associação, um modo de transferência direta de dados e a comunicação com *slots* garantidos (GTS). Já o modelo implementado por LEÃO; MORAES; MONTEZ; PORTUGAL *et al.* (2017) fornece um conjunto de funcionalidades para topologia *multi-hop*, tais como: formação de rede em árvore de cluster, programação de rede, endereçamento hierárquico, comunicação direta e indireta de dados, definição do domínio de colisão e comunicação de dados com o nodo coordenador da PAN.

Nessa simulação foi implementada uma rede padrão IEEE 802.15.4 em topologia *cluster-tree*. Foram dispostos 15 nodos fixos (CH0 a CH14) posicionados a cada 30 metros, em forma de um *backbone*, simulando uma pista de atletismo oficial, cuja extensão é de 450 metros (Figura 28). O nodo CH0 é o coordenador da PAN e o nodo CH14 é o mais profundo no ramo da árvore de *clusters*. A quantidade de nodos móveis foi estabelecida entre 1 e 40 nodos, e os mesmos são ativados em intervalos de tempo diferenciados (*offset*), dependendo da velocidade com que se deslocam na pista. Esta estratégia serve para evitar que os nodos se movimentem em grupo. Foi

---

<sup>11</sup> <https://castalia.forge.nicta.com.au>

estabelecido um tempo inicial de 150 segundos para a formação completa da rede. A estratégia do intervalo de ativação de nodos móveis foi definida considerando que um nodo móvel somente é ativado após o nodo anterior ter percorrido 30 metros, ou seja, estando alinhado ao próximo *cluster-head*. A Tabela 12 apresenta os intervalos de ativação dos nodos móveis.

Tabela 12 – Intervalo de ativação dos nodos móveis.

Nodos Móveis	Distância (m)	Offset (s)		Nodos Móveis	Distância (m)	Offset (s)	
		1,4 m/s	5 m/s			1,4 m/s	5 m/s
1	0	150,00	150	21	600	578,57	270
2	30	171,43	156	22	630	600,00	276
3	60	192,86	162	23	660	621,43	282
4	90	214,29	168	24	690	642,86	288
5	120	235,71	174	25	720	664,29	294
6	150	257,14	180	26	750	685,71	300
7	180	278,57	186	27	780	707,14	306
8	210	300,00	192	28	810	728,57	312
9	240	321,43	198	29	840	750,00	318
10	270	342,86	204	30	870	771,43	324
11	300	364,29	210	31	900	792,86	330
12	330	385,71	216	32	930	814,29	336
13	360	407,14	222	33	960	835,71	342
14	390	428,57	228	34	990	857,14	348
15	420	450,00	234	35	1020	878,57	354
16	450	471,43	240	36	1050	900,00	360
17	480	492,86	246	37	1080	921,43	366
18	510	514,29	252	38	1110	942,86	372
19	540	535,71	258	39	1140	964,29	378
20	560	557,14	264	40	1170	985,71	384

Fonte: do autor.

Por exemplo, se o nodo móvel 1 se desloca com uma velocidade de 1,4 m/s, o nodo móvel 2 somente será ativado na rede em 171,43 segundos, ou seja 21,4 segundos após o nodo móvel 1 ter sido ativado, e assim por diante. Os nodos móveis são ativados junto ao coordenador da PAN (CH0), se deslocam na área de

abrangência da rede até o final da pista (CH14), e retornam ininterruptamente, possibilitando a associação com os demais CHs. A simulação termina quando todos os pacotes dos nodos móveis forem enviados ou se atinja um limite máximo de tempo total de simulação.

Em relação ao tráfego de monitoramento, os nodos móveis geram mensagens periódicas na mesma taxa, enviando-as para o coordenador da PAN (*sink*) de acordo com as regras de comunicação definidas no protocolo IEEE 802.15.4. Por uma questão de simplificação foi definido que cada nodo móvel gera um fluxo de 1000 mensagens endereçadas ao coordenador da PAN e o tempo total de simulação foi definido em 50000 segundos. Além disso, foi estabelecido o número máximo de nodos filhos por *cluster* igual a seis. A Tabela 13 apresenta os parâmetros de configuração da rede.

Tabela 13 – Parâmetros de configuração da rede.

<b>Dispositivo</b>	CC2420
<b>Frequência</b>	2,4 GHz
<b>Tamanho do ambiente</b>	450m x 10m
<b>Taxa de transmissão</b>	250 kbps
<b>Potência</b>	-3 dBm
<b>Número de nodos</b>	1 a 40
<b>Tempo de simulação</b>	50000 s
<b>Número de pacotes/nodo</b>	1000
<b>aBaseSlotDuration</b>	60
<b>aNumSuperframeSlots</b>	16
<b>aUnitBackoffPeriod</b>	20
<b>BeaconOrder</b>	8
<b>SuperframeOrder</b>	1 a 5

Fonte: do autor.

As métricas analisadas na simulação são:

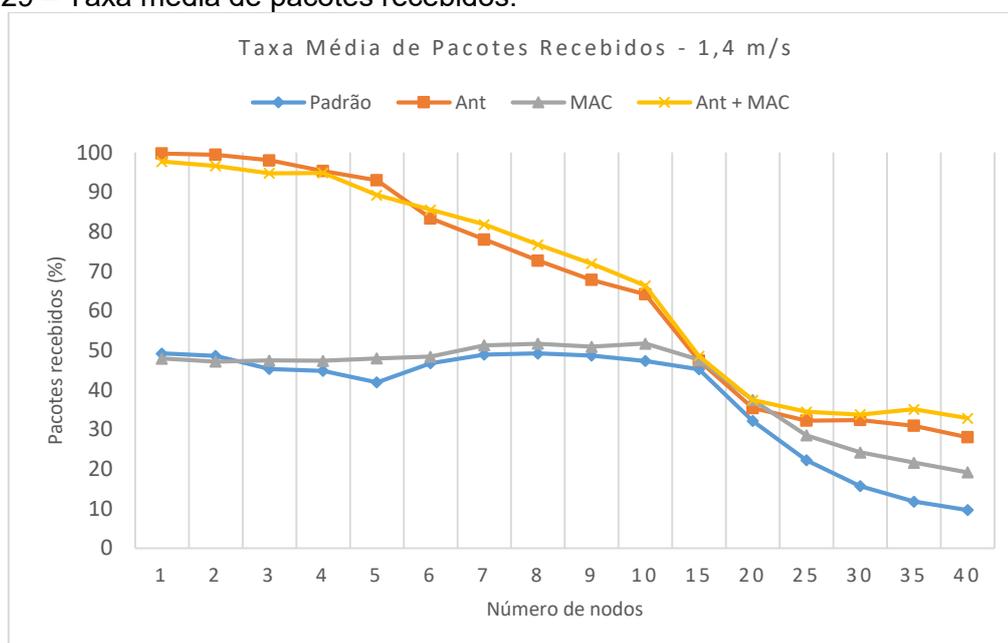
- Taxa média de pacotes recebidos: percentual médio de pacotes recebidos no coordenador da PAN, em relação ao número de pacotes enviados pelos nodos móveis;
- Atraso fim-a-fim: tempo médio de transmissão medido desde a geração dos pacotes de dados na camada de aplicação do nodo móvel até a sua recepção na camada de aplicação do coordenador da PAN;
- Tempo desconectado: tempo médio que os nodos móveis ficaram desconectados da rede.

Foram definidos dois cenários para as simulações: a) nodos móveis se deslocando à uma velocidade de 1,4 m/s, simulando uma pessoa andando; b) nodos móveis se deslocando à uma velocidade de 5 m/s, simulando uma pessoa correndo.

#### 6.5.3.1 Cenário com velocidade de nodos de 1,4 m/s

As simulações foram realizadas comparando o mecanismo de *handover* do padrão IEEE 802.15.4 com as melhorias propostas nesta tese. O primeiro conjunto de testes foram realizados com uma quantidade variável de nodos móveis (1 a 40) se movimentando a uma velocidade de 1,4 m/s. A Figura 29 apresenta a taxa média de pacotes recebidos no nodo sumidouro.

Figura 29 – Taxa média de pacotes recebidos.



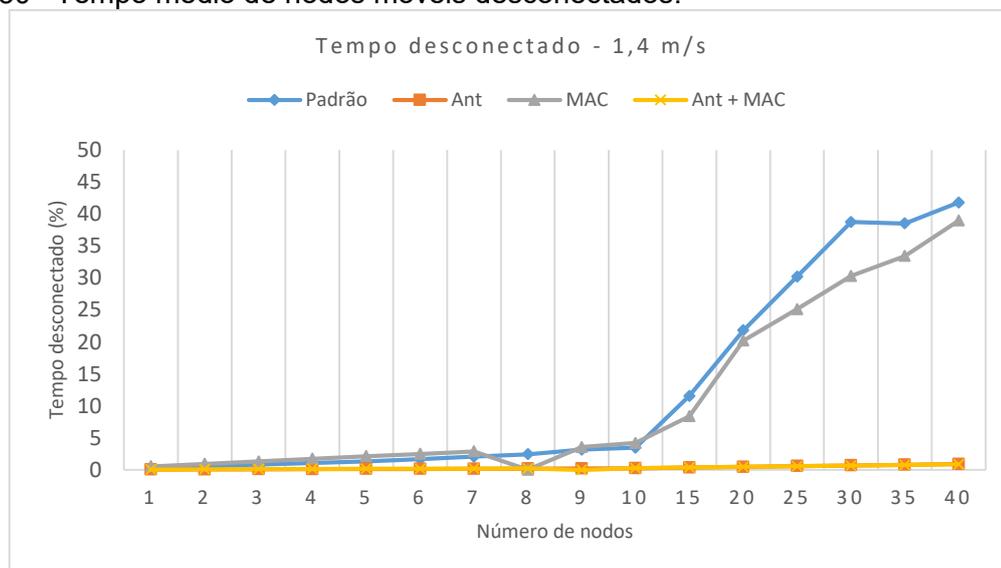
Os resultados das simulações evidenciam os avanços obtidos com as melhorias propostas. Quando a rede foi configurada de acordo com o padrão, mesmo com apenas um nodo móvel ativo, a taxa de entrega de pacotes ficou abaixo de 50%. Na medida em que aumenta o número de nodos móveis, a taxa de entrega reduz consideravelmente até a rede ficar totalmente congestionada. Este comportamento já era esperado devido ao funcionamento do mecanismo de contenção do CSMA/CA, ou seja, quanto maior o número de nodos tentando acessar o meio, maior a contenção, o que resulta no baixo desempenho da rede com relação à entrega de pacotes. Os resultados demonstram a ineficiência do mecanismo de associação do padrão IEEE 802.15.4 quando se utilizam nodos móveis em redes de topologia multiponto.

Ao se utilizar a estratégia de alteração dos parâmetros MAC do mecanismo de associação padrão, os resultados demonstraram que, com uma quantidade baixa de nodos móveis, não houve uma melhora significativa na entrega de pacotes. No entanto, na medida que se aumentou o número de nodos móveis, os resultados passaram a ser melhores que os do padrão. Com relação à entrega de pacotes, esses resultados permitem concluir que essa estratégia funciona melhor que o padrão quando se tem um número elevado de nodos móveis.

Quando a rede foi configurada para a estratégia de antecipação de associação proposta, os resultados foram muito expressivos. Com até 5 nodos móveis ativados, a taxa média de pacotes entregues ao *sink* foi maior que 90%. Esse comportamento se repete tanto na estratégia de antecipação utilizada isoladamente, como na combinação dessa estratégia com a alteração dos parâmetros MAC. Mesmo quando o número de nodos móveis aumentou consideravelmente, os resultados demonstraram que o esquema proposto foi mais eficiente que o do padrão IEEE 802.15.4.

Com relação ao tempo que os nodos móveis ficaram desconectados da rede, os resultados foram muito significativos, se comparados ao mecanismo de associação do padrão IEEE 802.15.4. A Figura 30 apresenta os resultados do percentual de tempo médio que os nodos móveis ficaram desconectados da rede.

Figura 30 –Tempo médio de nodos móveis desconectados.



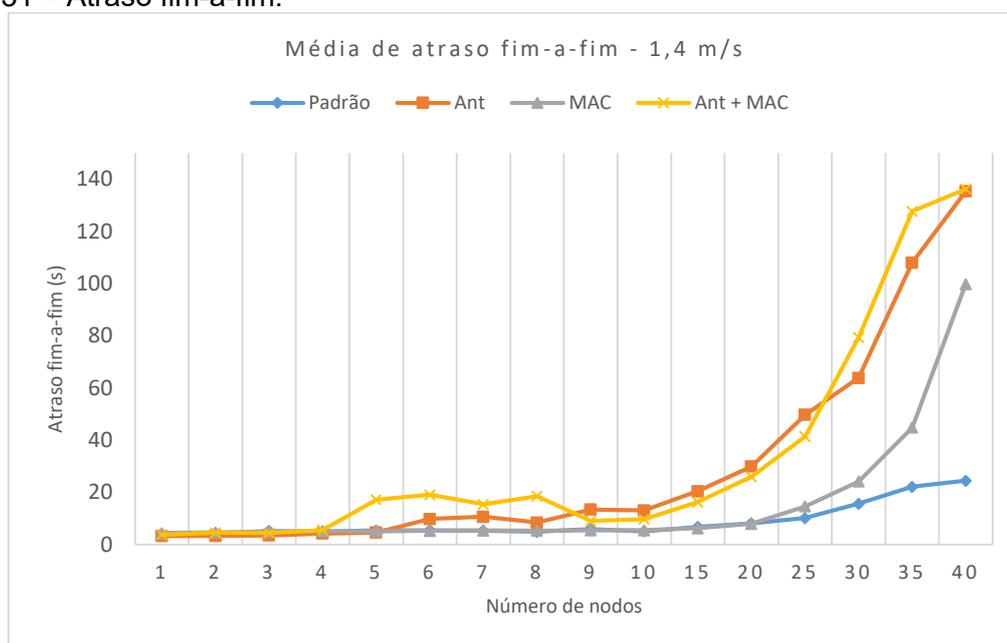
Os resultados demonstraram que o método de antecipação de associação possibilita aos nodos móveis ficarem praticamente o tempo todo sincronizados com a rede durante o seu deslocamento na área de cobertura. Isto porque os nodos móveis estão sempre verificando a intensidade do sinal de RSSI dos *beacons* recebidos dos CHs vizinhos, para avaliar se existe um CH com sinal melhor. Portanto, antes que o NM perca a sincronização com o CH atual, ao verificar que o seu sinal de RSSI ultrapassou o limiar pré-estabelecido e que existe um CH com melhor sinal, ele solicita imediatamente a associação (estratégia *make-before-break*). Caso a associação não seja bem-sucedida, o nodo móvel permanece associado ao CH atual. Isto efetivamente faz com que os nodos móveis se mantenham sincronizados com a rede, permitindo o envio de seus fluxos de mensagens nos períodos ativos dos seus nodos pais (CHs). Mesmo para uma quantidade grande de nodos móveis, o método proposto demonstrou sua eficiência.

Quando foi utilizado o método de associação do padrão IEEE 802.15.4, na medida que se aumentou o número de nodos móveis, o tempo médio que os nodos ficaram desconectados da rede também aumentou. Por exemplo, quando foram utilizados 40 nodos móveis, obteve-se a média de 41,8% do tempo dos nodos desconectados da rede, ou seja, praticamente a metade do tempo sem acesso à rede. Quando foram alterados apenas os parâmetros MAC de forma isolada, o comportamento da rede em relação ao tempo de sincronização dos nodos móveis foi

semelhante ao padrão. Ou seja, o que fez com que os nodos móveis não perdessem a sincronização com a rede foi o método de antecipação proposto.

Com relação ao atraso-fim-afim, os resultados quando foi utilizado o método proposto foram muito semelhantes aos do padrão, quando haviam poucos nodos móveis na rede. Conforme aumentou o número de nodos móveis, o atraso fim-a-fim foi maior e crescente na estratégia proposta, enquanto que no padrão manteve-se um atraso fim-a-fim baixo, em torno de 20 segundos. Estes resultados eram esperados, tendo em vista que, na medida que se aumentou a quantidade de nodos móveis, o padrão também apresentou um percentual muito alto de tempo que os nodos móveis ficaram desconectados da rede (Figura 30). Portanto, como são considerados para efeito do cálculo do tempo de atraso, apenas os pacotes que conseguiram ser entregues no coordenador da PAN, os resultados do padrão não podem ser considerados melhores. A Figura 31 apresenta os resultados do atraso fim-a-fim.

Figura 31 – Atraso fim-a-fim.

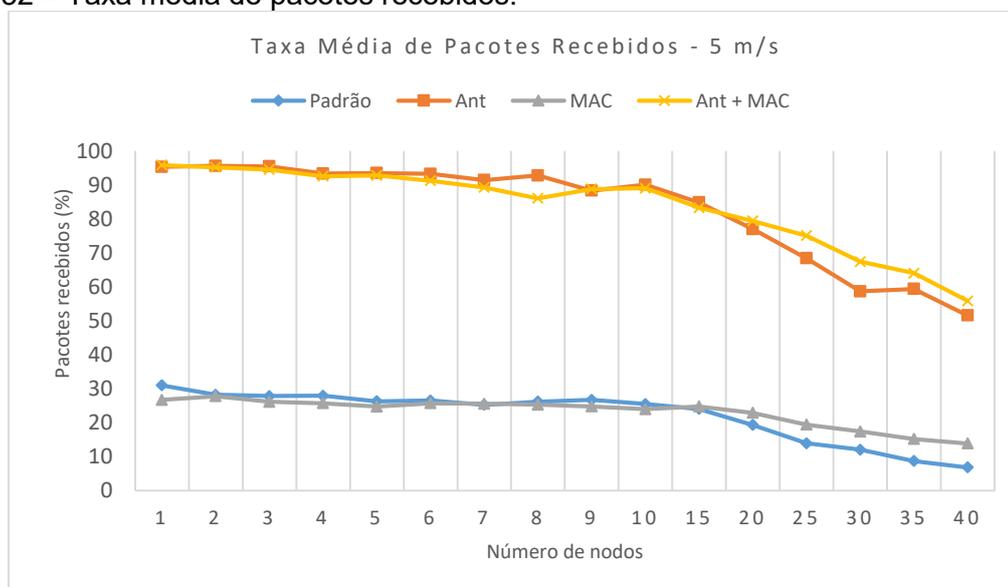


### 6.5.3.2 Cenário com velocidade de nodos de 5 m/s

Da mesma forma como no cenário anterior, os testes foram realizados com o mesmo número de nodos móveis (1 a 40), porém, se movimentando a uma velocidade de 5 m/s.

Os resultados demonstraram que mesmo com apenas um nodo móvel e utilizando os mecanismos do padrão IEEE 802.15.4, a taxa de entrega de pacotes ficou abaixo de 31%, contra praticamente 100% no método proposto. Pode-se observar também que, com o método proposto e com até 40 nodos móveis, obteve-se um resultado acima de 55% na taxa de entrega de pacotes. As alterações nos parâmetros MAC não fizeram uma diferença significativa na taxa de entrega de pacotes com poucos nodos. Foi possível notar que este método, em conjunto com a associação antecipada, apresenta melhores resultados com uma grande quantidade de nodos móveis. Por outro lado, é possível concluir que no cenário proposto e com a utilização de nodos móveis, o método de associação do padrão IEEE 802.15.4 é completamente ineficiente com relação à entrega de pacotes. A Figura 32 apresenta a taxa média de pacotes recebidos no nodo sumidouro.

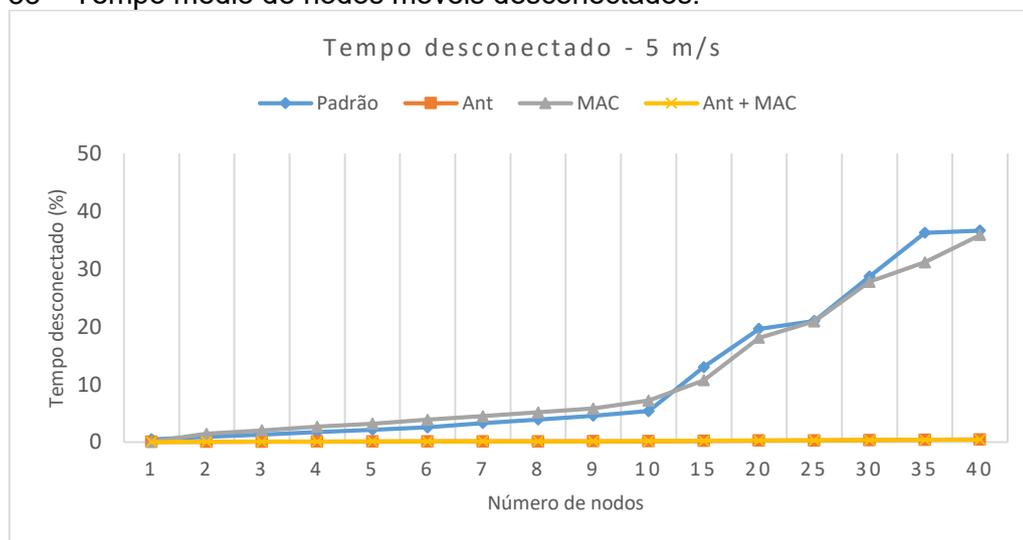
Figura 32 – Taxa média de pacotes recebidos.



Quanto ao tempo que os nodos móveis ficaram desconectados da rede, os resultados foram muito semelhantes aos do cenário com velocidade de 1,4 m/s. A

Figura 33 apresenta os resultados do percentual de tempo médio que os nodos móveis ficaram sem acesso à rede

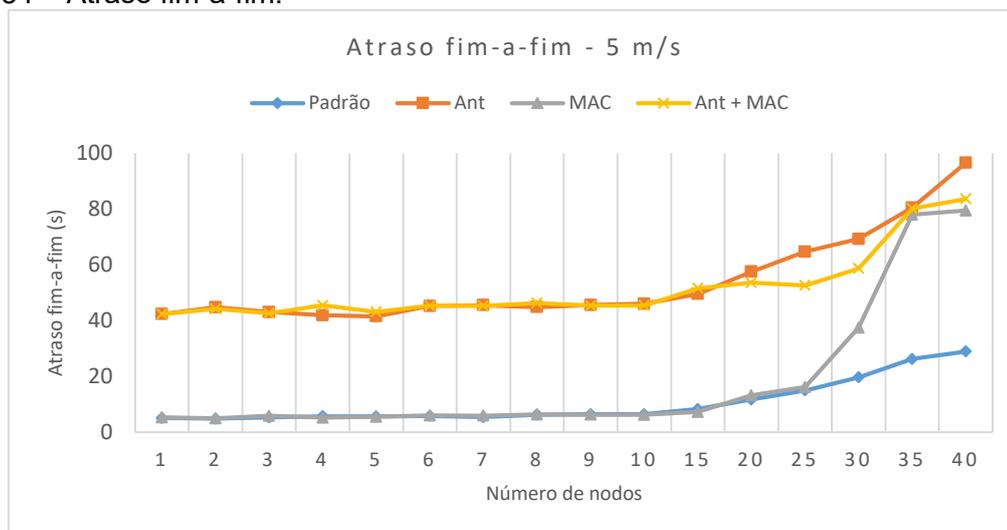
Figura 33 – Tempo médio de nodos móveis desconectados.



Quando a rede foi configurada para os parâmetros do padrão IEEE 802.15.4, os resultados demonstraram que a partir de 10 nodos móveis, há um crescimento muito grande no percentual de tempo que os nodos ficam sem acesso à rede. Por outro lado, com o método proposto, os nodos móveis praticamente não perderem a sincronização com a rede. É possível concluir que, com o método proposto e no cenário apresentado, mesmo aumentando a velocidade e o número de nodos móveis, a sincronização dos nodos com a rede foi mantida.

Em relação ao atraso-fim-a-fim, quando a rede foi configurada no padrão, os resultados não foram muito diferentes do cenário anterior. A Figura 34 apresenta os resultados do atraso fim-a-fim.

Figura 34 – Atraso fim-a-fim.



Com a configuração proposta e utilizando apenas 1 nó móvel, o atraso fim-a-fim obtido foi de aproximadamente 40 segundos. Este resultado mostra que, apesar de ter havido um aumento do atraso fim-a-fim com nós a uma velocidade mais alta, houve um evidente ganho na taxa média de entrega de pacotes (Figura 32), mesmo quando se aumentou muito o número de nós móveis.

## 6.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este Capítulo apresentou inicialmente uma revisão sistemática da literatura com o estado da arte das propostas de melhorias para o mecanismo de associação em RSSF padrão IEEE 802.15.4. Esta revisão proporcionou um embasamento teórico necessário para fundamentar o desenvolvimento das melhorias propostas nesta tese. Foram evidenciadas as características fundamentais das melhorias dos mecanismos de associação e re-associação disponíveis na literatura, sintetizando e classificando os trabalhos com base nestas características.

Na sequência, uma proposta de infraestrutura de comunicação para dar suporte à mobilidade de nós em RSSFs foi apresentada e validada por simulação. Além disso, um conjunto de melhorias nos mecanismos de associação do padrão IEEE 802.15.4 foi incorporado na proposta apresentada. Os experimentos foram realizados comparando-se os mecanismos de associação do padrão IEEE 802.15.4 com a implementação das melhorias propostas.

Os testes em simulador foram realizados variando-se as estratégias propostas, o número e nodos móveis e a velocidade. As proposições de melhorias no mecanismo de associação de nodos móveis foram extensivamente avaliadas, resultando em uma das principais contribuições desta tese. Os resultados das simulações mostraram que com velocidades de 1,4 m/s e 5 m/s, as taxas de entrega de pacotes do método proposto foi muito superior às do padrão IEEE 802.15.4, comprovando o melhor desempenho da rede com as estratégias de melhorias propostas. Quanto ao percentual do tempo que os nodos móveis ficaram desconectados da rede, os resultados comprovaram que, no método proposto, os nodos móveis praticamente não perderam a conexão com a rede enquanto se movimentaram na área atendida pela rede. Comparando-se esses resultados com os do padrão IEEE 802.15.4, foi possível constatar que, com o aumento do número de nodos móveis, o padrão apresentou perdas significativas de conexão dos nodos móveis com a rede.

## 7 CONCLUSÃO

Nesse Capítulo são revistos os objetivos do trabalho e as suas principais motivações, apresentando uma visão geral das contribuições e discutidas as principais conclusões do trabalho de pesquisa proposto nesta tese. Por fim, algumas melhorias da proposta atual para trabalhos futuros são sugeridas.

### 7.1 REVISÃO DOS OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES

O processo de associação de nodos móveis em RSSF no padrão IEEE 802.15.4 é um tema que requer muitas pesquisas devido à existência de diversos desafios referentes a mobilidade dos nodos. Como forma de minimizar esses desafios, algumas melhorias têm sido propostas nos mecanismos de associação dos protocolos de comunicação. A associação e re-associação de nodos móveis é um processo que dispende muito tempo, com a conseqüente perda de pacotes e atrasos na entrega, que podem inviabilizar diversas aplicações de monitoramento, tanto na área da saúde quanto nas mais diversas áreas. Esta tese se inclui neste contexto, fazendo uso de diversas estratégias para permitir que aplicações de monitoramento de grandezas fisiológicas tenham seus requisitos de comunicação atendidos. As contribuições geradas por esta tese buscaram responder às perguntas realizadas no Capítulo 1:

1. É possível atender os requisitos de monitoramento para reabilitação de pacientes com o uso de RSSFs operando em ambientes abertos?
2. Qual a infraestrutura de comunicação em rede necessária para atender as aplicações de reabilitação de pacientes que permita a mobilidade, conforto e respeite requisitos de restrições temporais e QoS?

### 7.2 VISÃO GERAL DA PESQUISA

Esta pesquisa iniciou com uma revisão dos trabalhos mais relevantes relacionados ao tema abordado na tese. Buscou-se, através de uma revisão sistemática da literatura, trabalhos que abordassem as tecnologias aplicadas ao processo de reabilitação de pacientes. No Capítulo 3 foi apresentada uma fundamentação teórica sobre as principais tecnologias de comunicação de redes

utilizadas na área de saúde, com destaque às RSSFs e WBANs. Foi destacado com mais profundidade o padrão IEEE 802.15.4, que foi a tecnologia de rede escolhida para proposição de melhorias dos mecanismos de comunicação. O objetivo desta etapa foi proporcionar uma visão sobre a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da tese.

Como a proposta desta tese era prover suporte de mobilidade em RSSF no padrão IEEE 802.15.4 em ambientes abertos, as questões de interferência de outras redes precisavam ser avaliadas. No Capítulo 4 foi investigado o problema da interferência em redes heterogêneas, abordando as camadas físicas dos principais protocolos de comunicação de redes sem fio, bem como a coexistência entre elas. Esta avaliação foi realizada através de experimentos práticos, principalmente, sobre a interferência das redes IEEE 802.11 sobre as redes IEEE 802.15.4.

No Capítulo 5 foi avaliada experimentalmente uma arquitetura de comunicação para o monitoramento de dados fisiológicos de pacientes utilizando RSSFs com nodos móveis. Para esta avaliação, um exame de eletromiografia foi escolhido devido ao seu requisito de alta taxa de transferência de dados. Para os testes, um protótipo de um eletromiógrafo sem fio foi construído e uma aplicação de monitoramento de sinais de EMG foi implementada. Foram realizados diversos experimentos práticos para verificar as taxas de transmissão de dados necessárias a este tipo de aplicação, e testes para avaliar o comportamento do mecanismo de associação de nodos móveis do padrão IEEE 802.15.4.

Por fim, o Capítulo 6 abordou o principal problema enfatizado nessa tese, ou seja, os mecanismos de associação e re-associação do padrão IEEE 802.15.4. Inicialmente, o estado da arte sobre os mecanismos de *handover* em RSSF, através de uma revisão sistemática da literatura, foi estabelecido. Em seguida, foi sistematizada a proposta de melhorias nos mecanismos de associação de nodos móveis utilizando um conjunto de estratégias. Foram também descritas as restrições protocolares para a formação da rede, como o escalonamento e o tamanho do intervalo de *beacon*, o tamanho dos *buffers*, a alocação de duração de superquadros e o movimento do nodo. A arquitetura proposta foi validada por extensivos testes em

simulador, explorando as proposições de melhorias, resultando em uma das principais contribuições desta tese.

A eficiência do método proposto foi comprovada, tanto em relação às taxas de entrega de pacotes que foram muito superiores às obtidas com o padrão, como na manutenção do sincronismo dos nodos móveis com a rede. Os resultados demonstraram que é possível melhorar os mecanismos de associação do padrão IEEE 802.15.4, possibilitando a utilização de RSSFs com nodos móveis em aplicações de monitoramento em ambientes abertos.

### 7.2.1 Principais Contribuições

Uma das principais contribuições desta tese foi a proposta de melhorias no processo de associação do padrão IEEE 802.15.4, quando se utiliza nodos móveis. Dessas melhorias, destaca-se principalmente, a antecipação da decisão de associação de nodos móveis e a proposição de um conjunto adequado de parâmetros para o CSMA/CA. Para implementar as melhorias, foram utilizadas múltiplas estratégias, como: um método para a decisão da antecipação de *handover* utilizando os próprios *beacons* dos coordenadores da rede, a utilização do mecanismo de associação melhorado do IEEE 802.15.4e, a redução da varredura de canais e a supressão da varredura de nodos órfãos. As principais contribuições desta tese podem ser sumarizadas nos seguintes itens:

- 1) Uma revisão sistemática da literatura sobre o estado da arte das RSSFs aplicadas à reabilitação de pacientes;
- 2) Um estudo experimental sobre a interferência entre redes de comunicação padronizadas;
- 3) Um conjunto de experimentos práticos avaliando taxas de transmissão e o processo de associação do protocolo IEEE 802.15.4;
- 4) Um protótipo de eletromiógrafo sem fio e uma aplicação para monitoramento de sinais de EMG;
- 5) Uma revisão sistemática da literatura sobre *handover*;

- 6) Uma proposta de arquitetura de comunicação de RSSF multiponto que suporta nodos móveis em ambientes abertos, com validação experimental e por simulador.

Como contribuição científica desta tese, foram obtidas as seguintes submissões e publicações:

- CASAGRANDE, R.; MORAES, R.; MONTEZ, C.; VASQUES, F.; et al. *A new association scheme for handling node mobility in cluster-tree wireless sensor networks*. Submetido para *IEEE Sensors Journal*, 2019. ISSN 1530-437X.
- CASAGRANDE, R.; MORAES, R.; MONTEZ, C.; MORALES, A. S. et al., 2018, *Interference of IEEE 802.11n Networks upon IEEE 802.15.4-Based WBANs: An Experimental Study*. 2018 *IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Porto, Portugal 2018. P. 388-393.
- CASAGRANDE, R.; MORAES, R.; CECHINEL, A.; NEGRI, J. et al. Análise Experimental de Redes IEEE 802.15.4 como *backbone* para WBAN. In: *VII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC'2017)*, 2017, Curitiba, PR, Brazil. 2017. Proceedings of VII SBESC.
- CASAGRANDE, R.; NEGRI, J.; CECHINEL, A.; MONTEZ, C. et al. Análise Experimental da Interferência de Comunicação de redes IEEE 802.11n sobre redes IEEE 802.15.4. In: *XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT'2016)*, 2016, Santarém, PA, Brasil. Santarém, PA, Brasil: 2016. Anais do XXXIV SBrT 2016.

### 7.3 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros, algumas estratégias de configuração da rede com possibilidade de aplicação nas mais diversas áreas, como por exemplo:

- Configurar a rede com diferentes números de *clusters*;
- Modelar a rede para atender outras aplicações na área da saúde ou esporte, como por exemplo, uma pista de atletismo oval, uma maratona ou campos de futebol;

- Aperfeiçoamento da arquitetura para aplicações de missão crítica, como dados de batimentos cardíacos;
- Divisão da rede para atender uma área de monitoramento com mais de um ramo da árvore de *clusters*;
- Utilização do nodo *sink* no meio do ramo da árvore;
- Mobilidade do nodo *sink* com antecipação de associação;
- Nodo *sink* implementado em um VANT, possibilitando o monitoramento de grandezas em diversas áreas, em ambientes abertos ou plantas industriais;
- Utilizar uma função de distribuição para o lançamento dos nodos móveis;
- Analisar o consumo energético dos nodos móveis;
- Avaliar a utilização de outros padrões de redes para implementar a infraestrutura de comunicação, devido às altas taxas de dados impostas pelas aplicações.

Enfim, existem inúmeras possibilidades de aplicação destas soluções para monitoramento de grandezas em diversas áreas do conhecimento. Espera-se que as contribuições desta pesquisa possam ser um avanço nas possibilidades de aplicação das RSSF, tanto na área da saúde quanto nos processos industriais. Esta pesquisa proporcionou um aprofundamento teórico-prático na formação do pesquisador sobre essas tecnologias, suas aplicações e os desafios a serem superados. Finalmente, pretende-se explorar e contribuir ainda mais para outros paradigmas das RSSFs, tais como: novos mecanismos de comunicação para aplicações em saúde e Internet das Coisas.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, C.; MENDES, P., 2013, **Wireless sensor networks for biomedical applications**. 1-4.
- AKPAKWU, G. A.; SILVA, B. J.; HANCKE, G. P.; ABU-MAHFOUZ, A. M. A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges. **IEEE Access**, 6, p. 3619-3647, 2018.
- AKYILDIZ, I. F.; WEILIAN, S.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. A survey on sensor networks. **IEEE Communications Magazine**, 40, n. 8, p. 102-114, 2002.
- ALAM, M.; HAMIDA, E. Surveying Wearable Human Assistive Technology for Life and Safety Critical Applications: Standards, Challenges and Opportunities. **Sensors**, 14, n. 5, p. 9153-9209, 2014.
- ALEMDAR, H.; ERSOY, C. Wireless sensor networks for healthcare: A survey. **Computer Networks**, 54, n. 15, p. 2688-2710, 2010.
- ANASTASI, G.; CONTI, M.; FRANCESCO, M. D. A Comprehensive Analysis of the MAC Unreliability Problem in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 7, n. 1, p. 52-65, 2011.
- ANATEL. **Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências na Faixa de 2.400 MHz a 2.483,5 MHz por Equipamentos utilizando DSSS ou OFDM**. 2005. Disponível em: <http://legislacao.anatel.gov.br/resolucoes/20-2005/323-resolucao-397>. Acesso em: 17/03/2015.
- ANGRISANI, L.; BERTOCCO, M.; FORTIN, D.; SONA, A. Experimental Study of Coexistence Issues Between IEEE 802.11b and IEEE 802.15.4 Wireless Networks. **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**, 57, n. 8, p. 1514-1523, 2008.
- ARAUJO, A. R.; VALLONE, M. L. D. D. C. E.; PERDIGÃO, I. C. D.; AMARAL, S. G. F. *et al.*, 2014, **Technologies for rehabilitation: Problems and opportunities in the Physiotherapy Clinic at PUC Minas - Brazil**. 402-407.
- AYOUB, Z.; OUNI, S., 2015, Cham. **A Fast Handover Procedure Based on Smart Association Decision for Mobile IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks**. Springer International Publishing. 1-7.
- AYOUB, Z. T.; OUNI, S., 2013, **New Re-association Procedures for Reliable Handover in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks**.

AYOUB, Z. T.; OUNI, S., 2014, Cham. **New Re-association Procedures for Reliable Handover in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks**. Springer International Publishing. 3-14.

AZMI, N.; KAMARUDIN, L. M.; MAHMUDDIN, M.; ZAKARIA, A. *et al.*, 2014, **Interference issues and mitigation method in WSN 2.4GHz ISM band: A survey**. 403-408.

BANERJI, S.; CHOWDHURY, R. S. On IEEE 802.11: Wireless LAN Technology. **International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT)**, 3, n. 4, Agosto, 2013 2013.

BAQAI, A.; MEMON, K.; MEMON, A. R.; SHAH, S. M. Z. A. Interactive Physiotherapy: An Application Based on Virtual Reality and Bio-feedback. **Wireless Personal Communications**, 106, n. 4, p. 1719-1741, June 01 2019. journal article.

BARBOSA, J. L. V., 2015, **Ubiquitous computing: Applications and research opportunities**. 1-8.

BARONTI, P.; PILLAI, P.; CHOOK, V. W. C.; CHESSA, S. *et al.* Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. **Computer Communications**, 30, n. 7, p. 1655-1695, 2007.

BELLO, L. L.; ÅKERBERG, J.; GIDLUND, M.; UHLEMANN, E. Guest Editorial Special Section on New Perspectives on Wireless Communications in Automation: From Industrial Monitoring and Control to Cyber-Physical Systems. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 13, n. 3, p. 1393-1397, 2017.

BERTOCCO, M.; GAMBA, G.; SONA, A., 2008, **Assessment of Out-of-Channel Interference Effects on IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks**. 1712-1717.

BLUETOOTH, S. I. G. **Bluetooth Basics**. 2015. Disponível em: <http://www.bluetooth.com/Pages/Basics.aspx>. Acesso em: 24/03/2015.

BORA, D. J.; KUMAR, N.; DUTTA, R. Implementation of wireless MEMS sensor network for detection of gait events. **IET Wireless Sensor Systems**, 9, n. 1, p. 48-52, 2019.

BOTTA, A.; DE DONATO, W.; PERSICO, V.; PESCAPÉ, A. Integration of Cloud computing and Internet of Things: A survey. **Future Generation Computer Systems**, 56, p. 684-700, 2016/03/01/ 2016.

BOUGHANMI, N.; SONG, Y.-Q.; RONDEAU, E., 2009, English, Ansan, South Korea. **Online adaptation of the IEEE 802.15.4 parameters for wireless networked control systems**. <https://hal.inria.fr/inria-00430957/document>  
<https://hal.inria.fr/inria-00430957/file/papierFet.pdf>. CDROM. Disponível em: <https://hal.inria.fr/inria-00430957>.

BUONOCUNTO, P.; MARINONI, M., 2014, **Tracking limbs motion using a wireless network of inertial measurement units**. 66-76.

CALDEIRA; RODRIGUES, J.; LORENZ, P.; ULLAH, S. Impact of sensor nodes scaling and velocity on handover mechanisms for healthcare wireless sensor networks with mobility support. **Computers in Industry**, 69, p. 92-104, 2015/05/01/ 2015.

CALDEIRA, J.; RODRIGUES, J. J. P. C.; LORENZ, P. **MAC layer handover mechanism for continuous communication support in healthcare mobile wireless sensor networks**. 2015.

CALDEIRA, J. M. P. L.; RODRIGUES, P.; LORENZ, P. Intra-Mobility Support Solutions for Healthcare Wireless Sensor Networks—Handover Issues. **IEEE Sensors Journal**, 13, n. 11, p. 4339-4348, 2013.

CASAGRANDE, R.; MORAES, R.; CECHINEL, A.; NEGRI, J. *et al.* Análise Experimental de Redes IEEE 802.15.4 como backbone para WBAN. *In: VII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC'2017)*, 2017, Curitiba, PR, Brazil. 2017. Proceedings of VII SBESC.

CASAGRANDE, R.; MORAES, R.; MONTEZ, C.; MORALES, A. S. *et al.*, 2018, **Interference of IEEE 802.11n Networks upon IEEE 802.15.4-Based WBANs: An Experimental Study**. 388-393.

CASAGRANDE, R.; NEGRI, J.; CECHINEL, A.; MONTEZ, C. *et al.* Análise Experimental da Interferência de Comunicação de redes IEEE 802.11n sobre redes IEEE 802.15.4. *In: XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBRT'2016)*, 2016, Santarém, PA, Brasil. Santarém, PA, Brasil: 2016. Anais do XXXIV SBRT 2016.

CAVALLARI, R.; MARTELLI, F.; ROSINI, R.; BURATTI, C. *et al.* A Survey on Wireless Body Area Networks: Technologies and Design Challenges. **Communications Surveys & Tutorials, IEEE**, 16, n. 3, p. 1635-1657, 2014.

CHANDRAMOULI, D.; LIEBHART, R.; PIRSKANEN, J. **5G for the Connected World**. Wiley, March, 2019 2019. 520 p., v. 1). 978-1-119-24708-1.

CHEN, M.; GONZALEZ, S.; VASILAKOS, A.; CAO, H. *et al.* Body Area Networks: A Survey. **Mob. Netw. Appl.**, 16, n. 2, p. 171-193, 2011.

CHENG LEONG, L.; BOLT, M.; SYED, A.; NG, P. *et al.*, 2015, **Dynamic performance of IEEE 802.15.4 devices under persistent WiFi traffic**. 1-6.

CHONG, J.; HWANG, Y.; SUNG, D.; NAM, Y. A comprehensive analysis of association process for IEEE 802.15.4 wireless networks. 16, p. 70-77, 2014.

CHOQUETTE, S.; HAMEL, M.; BOISSY, P. Accelerometer-based wireless body area network to estimate intensity of therapy in post-acute rehabilitation. **J Neuroeng Rehabil**, 5, n. 1, p. 1-11, 2008. journal article.

CONSTANTE, L.; LAU, J.; MORAES, R.; ARAUJO, G. *et al.*, 2017, **Enhanced association mechanism for IEEE 802.15.4 networks**. 1-8.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 8, n. 2, p. 56-58, 2014.

FAISAL BASHIR, H.; JAE-YOUNG, P. Coordinator Discovery and Association in Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 Network. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 9, n. 10, p. 635234, 2013/10/01 2013.

FCC. **Medical Body Area Networks**. Washington D.C., 2013. Disponível em: <http://www.fcc.gov/document/medical-body-area-networks>. Acesso em: 05/04/2015.

FELISBERTO, F.; COSTA, N.; FDEZ-RIVEROLA, F.; PEREIRA, A. Unobstructive Body Area Networks (BAN) for efficient movement monitoring. **Sensors (Basel)**, 12, n. 9, p. 12473-12488, 2012.

FENG, T.; XU, G.; GUO, Y.; GAO, X. *et al.*, 2012, **Motor functional rehabilitation monitoring system design and implementation based on wearable body area network**. 2327-2332.

FILHO, L. H. S.; DENIS, B.; MAMAN, M., 2015, **Design and Analysis of Distributed Mobility Management Schemes for Wireless Sensor Networks**. 1-7.

FILIFE, L.; FDEZ-RIVEROLA, F.; COSTA, N.; PEREIRA, A. Wireless Body Area Networks for Healthcare Applications: Protocol Stack Review. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 2015, p. 23, 2015.

FOTOUHI, H.; ALVES, M.; KOUBAA, A.; BACCOUR, N., 2010, Brussels, Belgium. **On a Reliable Handoff Procedure for Supporting Mobility in Wireless Sensor Networks**.

FOTOUHI, H.; ALVES, M.; ZAMALLOA, M. Z.; KOUBÂA, A. Reliable and Fast Hand-Offs in Low-Power Wireless Networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, 13, n. 11, p. 2620-2633, 2014.

FRANCESCO, M. D.; ANASTASI, G.; CONTI, M.; DAS, S. K. *et al.* Reliability and Energy-Efficiency in IEEE 802.15.4/ZigBee Sensor Networks: An Adaptive and Cross-Layer Approach. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, 29, n. 8, p. 1508-1524, 2011.

GARROPPO, R. G.; GAZZARRINI, L.; GIORDANO, S.; TAVANTI, L., 2011, **Experimental assessment of the coexistence of Wi-Fi, ZigBee, and Bluetooth devices**. 1-9.

GEIER, J. T. **Wireless LANs: Implementing High Performance IEEE 802.11 Networks**. Sams, 2001. 345 p. 0672320584.

GEORGAKAKIS, E.; NIKOLIDAKIS, S.; VERGADOS, D.; DOULIGERIS, C. An Analysis of Bluetooth, Zigbee and Bluetooth Low Energy and Their Use in WBANs. *In*: LIN, J. e NIKITA, K. (Ed.). **Wireless Mobile Communication and Healthcare**: Springer Berlin Heidelberg, 2011. v. 55, cap. 22, p. 168-175. (Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering).

GHAMARI, M.; JANKO, B.; SHERRATT, R.; HARWIN, W. *et al.* A Survey on Wireless Body Area Networks for eHealthcare Systems in Residential Environments. **Sensors**, 16, n. 6, p. 831, 2016.

GOLMIE, N.; MOUVEAUX, F., 2001, **Interference in the 2.4 GHz ISM band: impact on the Bluetooth access control performance**. 2540-2545 vol.2548.

GONZÁLEZ-VALENZUELA, S.; CHEN, M.; LEUNG, V. C. M. Mobility Support for Health Monitoring at Home Using Wearable Sensors. **IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine**, 15, n. 4, p. 539-549, 2011.

HA, I. Technologies and Research Trends in Wireless Body Area Networks for Healthcare: A Systematic Literature Review. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 2015, p. 14, 2015.

HADJIDJ, A.; SOUIL, M.; BOUABDALLAH, A.; CHALLAL, Y. *et al.* Wireless sensor networks for rehabilitation applications: Challenges and opportunities. **Journal of Network and Computer Applications**, 36, n. 1, p. 1-15, 2013.

HAYAJNEH, T.; ALMASHAQBEH, G.; ULLAH, S.; VASILAKOS, A. A survey of wireless technologies coexistence in WBAN: analysis and open research issues. **Wireless Networks**, 20, n. 8, p. 2165-2199, 2014/11/01 2014.

HEEGARD, C. Evolution of 2.4 GHz Wireless LANs. *In*: BING, B. (Ed.). **Wireless Local Area Networks: The New Wireless Revolution**. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002. v. 1, cap. 2, p. 216.

HODGDON, C. **Adaptative Frequency Hopping for Reduced Interference between Bluetooth and Wireless LAN**. 2003. Disponível em: <http://www.design-reuse.com/articles/5715/adaptive-frequency-hopping-for-reduced-interference-between-bluetooth-and-wireless-lan.html>. Acesso em: 25/03/2015.

HONEINE, P.; MOURAD, F.; KALLAS, M.; SNOUSSI, H. *et al.*, 2011, **Wireless sensor networks in biomedical: Body area networks**. 388-391.

HOWITT, I.; GUTIERREZ, J. A., 2003, **IEEE 802.15.4 low rate - wireless personal area network coexistence issues**. 1481-1486 vol.1483.

HUSSAIN, F. B.; PYUN, J.-Y. Coordinator Discovery and Association in Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 Network. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 9, n. 10, p. 635234, 2013/10/01 2013.

HUSSAIN, F. B.; PYUN, J.-Y. Preemptive re-association scheme for beacon-enabled wireless personal area networks. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, 2014, n. 1, p. 97, 2014/06/17 2014.

IEEE802.19. **Estimating packet error rate caused by interference –A coexistence assurance methodology**. 2005. Disponível em: <https://mentor.ieee.org/802.19/documents>. Acesso em: 15/04/2015

IEEE 802.11. **IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)**, n. IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, p. 1-2793, 2012.

IEEE 802.11ac. **IEEE Std 802.11ac-2013 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012, IEEE Std 802.11aa-2012, and IEEE Std 802.11ad-2012)**, n. IEEE Standard for Information technology-- Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-- Specific requirements--Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications--Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz, p. 1-425, 2013.

IEEE 802.15.1. **IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002)**, n. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. - Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs), p. 0\_1-580, 2005.

IEEE 802.15.2. **IEEE Std 802.15.2-2003**, n. IEEE Recommended Practice for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands, p. 1-150, 2003.

IEEE 802.15.3. **IEEE Std 802.15.3-2003**, n. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), p. 0\_1-315, 2003.

IEEE 802.15.4. **IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)**, n. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), p. 1-314, 2011.

IEEE 802.15.4e. **IEEE Std 802.15.4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011)**, n. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer, p. 1-225, 2012.

IEEE 802.15.6. **IEEE Std 802.15.6-2012**, n. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks, p. 1-271, 2012.

ITU. **Radio Regulations, Edition of 2012**. 2012. Disponível em: <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2012>. Acesso em: 16/03/2015.

JARA, A. J.; ZAMORA, M. A.; GÓMEZ-SKARMETA, A. F. An Initial Approach to Support Mobility in Hospital Wireless Sensor Networks based on 6LoWPAN (HWSN6). **JoWUA**, 1, p. 107-122, 2010.

JAVED, M.; ZEN, K.; LENANDO, H. B.; ZEN, H., 2013, **Fast association process (FAP) of beacon enabled for IEEE 802.15.4 in strong mobility**. 1-8.

JIN-SHYAN, L.; YU-WEI, S.; CHUNG-CHOU, S., 2007, **A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi**. 46-51.

JOBS, M.; LANTZ, F.; LEWIN, B.; JANSSON, E. *et al.*, 2009, **WBAN mass: A WBAN-based monitoring application system**. 1-5.

KAIGUI, B.; JUNG-MIN, P.; RUILIANG, C. Control Channel Establishment in Cognitive Radio Networks using Channel Hopping. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, 29, n. 4, p. 689-703, 2011.

KATHURIA, M.; GAMBHIR, S., 2014, **Quality of service provisioning transport layer protocol for WBAN system**. 222-228.

KAUR, S.; SAINI, K. S.; KAUR, M., 2015, **Reliable message handover approach by re-association procedure in MWSN**. 234-238.

KIM, M.; KANG, C. Priority-Based Service-Differentiation Scheme for IEEE 802.15.4 Sensor Networks in Nonsaturation Environments. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 59, n. 7, p. 3524-3535, 2010.

KINSELLA, K.; PHILLIPS, D. R. **Global Aging: the challenge of success**. Population Bulletin, 2005. Disponível em: [www.prb.org/pdf05/60.1globalaging.pdf](http://www.prb.org/pdf05/60.1globalaging.pdf). Acesso em: 20 de Março de 2016.

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, 33, n. 2004, p. 1-26, 2004.

KOUBAA, A.; ALVES, M.; NEFZI, B.; SONG, Y.-Q., 2006, English, Dresden, Germany. **Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for Time-Critical Events in Wireless Sensor Networks**. Disponível em: <https://hal.inria.fr/inria-00114519>.

KURAN, M. S.; TUGCU, T. A survey on emerging broadband wireless access technologies. **Computer Networks**, 51, n. 11, p. 3013-3046, 2007.

KURUNATHAN, H.; SEVERINO, R.; KOUBAA, A.; TOVAR, E. IEEE 802.15.4e in a Nutshell: Survey and Performance Evaluation. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, p. 1-1, 2018.

KYUNG SUP, K.; ULLAH, S.; ULLAH, N., 2010, **An overview of IEEE 802.15.6 standard**. 1-6.

LAI, X.; LIU, Q.; WEI, X.; WANG, W. *et al.* A Survey of Body Sensor Networks. **Sensors**, 13, n. 5, p. 5406, 2013.

LARIVIÈRE, C.; DELISLE, A.; PLAMONDON, A. The effect of sampling frequency on EMG measures of occupational mechanical exposure. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, 15, n. 2, p. 200-209, 2005.

LASORTE, N. J.; RAJAB, S. A.; REFAI, H. H., 2012, **Experimental assessment of wireless coexistence for 802.15.4 in the presence of 802.11g/n**. 473-479.

LATRÉ, B.; BRAEM, B.; MOERMAN, I.; BLONDIA, C. *et al.* A survey on wireless body area networks. **Wireless Networks**, 17, n. 1, p. 1-18, 2011.

LEÃO, E.; MONTEZ, C.; MORAES, R.; PORTUGAL, P. *et al.* Superframe Duration Allocation Schemes to Improve the Throughput of Cluster-Tree Wireless Sensor Networks. **Sensors**, 17, n. 2, 2017.

LEÃO, E.; MORAES, R.; MONTEZ, C.; PORTUGAL, P. *et al.* CT-SIM: A simulation model for wide-scale cluster-tree networks based on the IEEE 802.15.4 and ZigBee standards. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 13, n. 3, p. 1550147717698471, 2017/03/01 2017.

LI, C.; WANG, L.; SUN, T.; YANG, S. *et al.* Topology Analysis of Wireless Sensor Networks Based on Nodes' Spatial Distribution. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, 13, n. 5, p. 2454-2453, 2014.

LOUREIRO, A.; NOGUEIRA, J. M.; RUIZ, L.; RUIZ, R. *et al.*, 2003, **Redes de sensores sem fio**.

LUCAS, F. J.; MOLINA, F.; TOVAL, A. A systematic review of UML model consistency management. **Information and Software Technology**, 51, n. 12, p. 1631-1645, 2009.

MACWAN, S.; GONDALIYA, N.; RAJA, N. Survey on Wireless Body Area Network. **International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering**, 5, n. 2, p. 4, 2016.

MAJEDI, N.; NAEEM, M.; ANPALAGAN, A. Telecommunication integration in e-healthcare: technologies, applications and challenges. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, p. n/a-n/a, 2016.

MARTELLI, F.; VERDONE, R., 2012, **Coexistence Issues for Wireless Body Area Networks at 2.45 GHz**. 1-6.

MELZI, S.; BORSANI, L. P.; CESANA, M., 2009, **The Virtual Trainer: Supervising Movements Through a Wearable Wireless Sensor Network**. 1-3.

MOUAWAD, A.; CHALHOUB, G.; HABIB, G.; MISSON, M., 2013, **A performance study of mobile nodes in a Wireless Sensor Network**. 136-140.

MOVASSAGHI, S.; ARAB, P.; ABOLHASAN, M., 2012, **Wireless technologies for Body Area Networks: Characteristics and challenges**. 42-47.

NARANG, G.; NARANG, A.; SINGH, S.; LEMPIAINEN, J., 2013, **Use of unobtrusive human-machine interface for rehabilitation of stroke victims through robot assisted mirror therapy**. 1-6.

NASSER, N.; YUNFENG, C., 2010, **Anytime and anywhere monitoring for the elderly**. 429-433.

NEGRA, R.; JEMILI, I.; BELGHITH, A. Wireless Body Area Networks: Applications and Technologies. **Procedia Computer Science**, 83, p. 1274-1281, 2016.

NEPALI, S.; SHIN, S., 2017, **Neighbour aware fast association scheme over IEEE 802.15.4**. 294-298.

NERINO, R.; CONTIN, L.; PINTO, W. J. G. D. S.; MASSAZZA, G. *et al.* A BSN based service for post-surgical knee rehabilitation at home. *In*: Proceedings of the 8th International Conference on Body Area Networks, 2013, Boston, Massachusetts. 2555410: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), p. 401-407. DOI: 10.4108/icst.bodynets.2013.253679.

NETO, A.; JUNIOR, J.; NEUMAN, J.; CERQUEIRA, E., 2013, **Context-aware eHealth information approach for the Brazilian primary healthcare system**. 274-276.

OUNI, S.; AYOUB, Z. T. Cooperative Association/Re-association Approaches to Optimize Energy Consumption for Real-Time IEEE 802.15.4/ZigBee Wireless Sensor

Networks. **Wireless Personal Communications**, 71, n. 4, p. 3157-3183, 2013/08/01 2013.

PAKSUNIEMI, M.; SORVOJA, H.; ALASAARELA, E.; MYLLYLA, R., 2005, **Wireless sensor and data transmission needs and technologies for patient monitoring in the operating room and intensive care unit**. 5182-5185.

PATEL, M.; WANG, J. Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies. **IEEE Wireless Communications**, 17, n. 1, p. 80-88, 2010.

PETROVA, M.; RIIHIJARVI, J.; MAHONEN, P.; LABELLA, S., 2006, **Performance study of IEEE 802.15.4 using measurements and simulations**. 487-492.

PIOGGIA, G.; TARTARISCO, G.; VALENZA, G.; RICCI, G. *et al.*, 2010, **A pervasive activity management and rehabilitation support system for the elderly**. 813-816.

POLEPALLI, B.; XIE, W.; THANGARAJA, D.; GOYAL, M. *et al.*, 2009, **Impact of IEEE 802.11n Operation on IEEE 802.15.4 Operation**. 328-333.

POLLIN, S.; TAN, I.; HODGE, B.; CHUN, C. *et al.*, 2008, **Harmful Coexistence Between 802.15.4 and 802.11: A Measurement-based Study**. 1-6.

POSTIGO-MALAGA, M.; SUPO-COLQUEHUANCA, E.; MATTA-HERNANDEZ, J.; PARI, L. *et al.*, 2016, **Vehicle location system and monitoring as a tool for citizen safety using wireless sensor network**. 1-4.

QIAN, D.; DARGIE, W., 2013, **Performance analysis of a handover mechanism for a mobile wireless sensor network**. 645-648.

RAEZ, M. B. I.; HUSSAIN, M. S.; MOHD-YASIN, F. Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications. **Biological procedures online**, 8, p. 11-35, 2006.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: Princípios e práticas** Tradução VIEIRA, D. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

RAŠKOVIĆ, D.; MILENKOVIĆ, A.; DE GROEN, P. C.; JOVANOVIĆ, E. 22 - From Telemedicine to Ubiquitous M-Health: The Evolution of E-Health Systems A2 - Feng, David Dagan. *In: Biomedical Information Technology*. Burlington: Academic Press, 2008. p. 479-496.

RASYID, M. U. H. A.; SAPUTRA, F. A.; ISMAR, M. R., 2015, **Performance of multi-hop networks using beacon and non-beacon scheduling in Wireless Sensor Network (WSN)**. 195-199.

SABLE, A. Comparative Study on IEEE Standard of WPAN 802.15.1/ 3/ 4. **International Journal for Research in Emerging Science and Technology (IJREST)**, 1, n. 1, p. 25-27, 2014.

SARRA, E.; MOUNGLA, H.; BENAYOUNE, S.; MEHAOUA, A., 2014, **Coexistence improvement of wearable body area network (WBAN) in medical environment.** 5694-5699.

**SBC.** Grandes Desafios da Pesquisa em Computação no Brasil 2006-2016, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/rebu/arquivos/SBC-Grandes.pdf>. Acesso em: 18 de Março de 2016.

SEMPREBOM, T.; MORAES, R.; MONTEZ, C.; PORTUGAL, P. *et al.*, 2014, **Quality of service provision assessment for DDBP approach in IEEE 802.15.4 networks.** 118-123.

SHAH, R. C.; NACHMAN, L.; WAN, C.-Y. On the performance of Bluetooth and IEEE 802.15.4 radios in a body area network. *In*: Proceedings of the ICST 3rd international conference on Body area networks, 2008, Tempe, Arizona. 1460291: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), p. 1-9.

SHUE, S.; CONRAD, J. M., 2013, **A survey of robotic applications in wireless sensor networks.** 1-5.

SILVA, R.; SILVA, J. S.; BOAVIDA, F., 2010, **A Proxy-Based Mobility Solution for Critical WSN Applications.** 1-5.

SILVA, R.; SILVA, J. S.; BOAVIDA, F. A proposal for proxy-based mobility in WSNs. **Computer Communications**, 35, n. 10, p. 1200-1216, 2012/06/01/ 2012.

SIYE, W.; YANJUN, Z.; ZHENYU, L.; WENBIAO, Z. *et al.*, 2012, **A brief study on low-rate wireless personal network.** 1360-1363.

SRINIVASAN, K.; LEVIS, P. **RSSI is under appreciated.** 2006.

STHAPIT, P.; CHOI, Y.-S.; KWON, G.-R.; PYUN, J.-Y. *et al.*, 2013, **Fast Association Scheme over IEEE 802 . 15 . 4 based Mobile Sensor Network.**

STHAPIT, P.; PYUN, J.-Y. Handover Strategies in Beacon-Enabled Mobile Sensor Network. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 10, n. 3, p. 186402, 2014/03/01 2014.

SUBBU, K. P.; SOMAN, S., 2014, **An interference mitigation scheme for IEEE 802.15.4 networks under IEEE 802.11b/g interference.** 1-6.

TORABI, N.; BHATE, S.; LEUNG, V. C. M., 2013, **Robust sensing strategy for dynamic spectrum access in the 2.4 GHz ISM band.** 2713-2717.

TUNG, H. C.; TSANG, K. F.; LAM, K. L.; TUNG, H. Y. *et al.* A Mobility Enabled Inpatient Monitoring System Using a ZigBee Medical Sensor Network. **Sensors (Basel, Switzerland)**, 14, n. 2, p. 2397-2416, 2014.

TYTGAT, L.; YARON, O.; POLLIN, S.; MOERMAN, I. *et al.* Analysis and Experimental Verification of Frequency-Based Interference Avoidance Mechanisms in IEEE 802.15.4. **Networking, IEEE/ACM Transactions on**, 23, n. 2, p. 369-382, 2015.

ULLAH, S.; MOHAISEN, M.; ALNUEM, M. A. A Review of IEEE 802.15.6 MAC, PHY, and Security Specifications. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 2013, p. 12, 2013.

VALLEJOS DE SCHATZ, C. H.; MEDEIROS, H. P.; SCHNEIDER, F. K.; ABATTI, P. J. Wireless Medical Sensor Networks: Design Requirements and Enabling Technologies. **Telemedicine and e-Health**, 18, n. 5, p. 394-399, 2012/06/01 2012.

VOLMER, A.; ORGLMEISTER, R., 2008, **Wireless Body Sensor Network for low-power motion-tolerant synchronized vital sign measurement**. 3422-3425.

WAGNER, M.; KUCH, B.; CABRERA, C.; ENOKSSON, P. *et al.*, 2012, **Android based Body Area Network for the evaluation of medical parameters**. 33-38.

WEISER, M. The computer for the 21st century. **SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.**, 3, n. 3, p. 3-11, 1999.

WOLLSCHLAEGER, M.; SAUTER, T.; JASPERNEITE, J. The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 11, n. 1, p. 17-27, 2017.

XIA, F. QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks. **Sensors**, 8, n. 2, p. 1099, 2008.

XIA, F.; LI, J.; HAO, R.; KONG, X. *et al.* Service Differentiated and Adaptive CSMA/CA over IEEE 802.15.4 for Cyber-Physical Systems. **The Scientific World Journal**, 2013, p. 12, 2013.

YAZDI, E. T.; MORAVEJOSHARIEH, A.; RAY, S. K., 2014, **Study of target tracking and handover in Mobile Wireless Sensor Network**. 120-125.

YETGIN, H.; CHEUNG, K. T. K.; EL-HAJJAR, M.; HANZO, L. H. A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 19, n. 2, p. 828-854, 2017.

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

YUN, J.; KHAN, M.; HAN, K. A Fast Handoff Scheme for Streaming Service in Wireless Sensor Networks. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 11, n. 3, p. 183802, 2015/03/01 2015.

ZINONOS, Z.; VASSILIOU, V., 2010, **Inter-mobility support in controlled 6LoWPAN networks**. 1718-1723.

ZINONOS, Z.; VASSILIOU, V., 2014, **Handoff Algorithms for Industrial Mobile Wireless Sensor Networks**. 1-6.

## APÊNDICE A – Protocolo de busca sobre Reabilitação

### PROTOCOLO DE BUSCA E RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE O ESTADO DA ARTE DE TRABALHOS SOBRE REABILITAÇÃO

Este apêndice apresenta o protocolo de busca a ser utilizado para a revisão sistemática da literatura sobre reabilitação.

#### A.1. Plano de Extração

Neste estágio são definidos os itens e as regras utilizadas na extração de dados para facilitar a seleção das informações relevantes no contexto da pesquisa. Durante este estágio são extraídas as informações dos trabalhos selecionados baseadas nas questões apresentadas na subseção A.2. Em linhas gerais, de cada trabalho são observados os seguintes dados: Título, Fonte, Autor (es), Ano de Publicação, Resumo, Aplicação, Requisitos, Arquitetura, Tipos de Sensores, Resultados obtidos e questões de pesquisa em aberto. Um dos objetivos centrais desta revisão é investigar as principais aplicações de RSSFs para reabilitação de pacientes. Especificamente pretende-se a partir dos dados obtidos, extrair as seguintes informações: descrição da aplicação, requisitos de qualidade de serviço atendidos, *feedback*, tecnologias utilizadas nas camadas física, de acesso ao meio e de rede. Também serão tratadas características como mobilidade e interferência, caso tenham sido consideradas. Para tanto, serão incluídos nesta revisão os trabalhos referentes à reabilitação de pacientes utilizando RSSFs entre 2007 e 2019.

#### A.2. Seleção das Fontes

Como fontes primárias de pesquisa, foram selecionadas as seguintes bibliotecas digitais pela sua representatividade na área:

ACM Digital Library: <http://dl.acm.org/>

IEEE Xplore: <http://ieeexplore.ieee.org>

Springer Link: <http://link.springer.com>  
PubMed: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>  
Science Direct: <http://www.sciencedirect.com>

Foram utilizadas nos mecanismos de busca das fontes selecionadas, as seguintes expressões:

1. (WBAN OR WIRELESS BODY AREA NETWORK OR WBSN OR WIRELESS BODY SENSOR NETWORK)
2. (WBAN OR *WIRELESS BODY AREA NETWORK* OR WBSN OR *WIRELESS BODY SENSOR NETWORK*) AND *HEALTHCARE*
3. (WBAN OR *WIRELESS BODY AREA NETWORK* OR WBSN OR *WIRELESS BODY SENSOR NETWORK*) AND *REHABILITATION*

Critérios para inclusão das Fontes: Foram incluídos os trabalhos publicados em revistas e artigos qualificados que consideram aplicações de reabilitação de pacientes utilizando redes de sensores. Trabalhos abrangentes e relevantes de revisão (*survey*) mais recentes também foram relacionados como material de apoio. Adicionalmente foram selecionados os trabalhos que continham as principais aplicações, arquiteturas, requisitos e mecanismos de qualidade de serviço em redes de área corporal.

Critérios para exclusão das Fontes: Foram excluídos do estudo os trabalhos que não apresentaram aplicações, protocolos, métodos ou requisitos de redes que utilizam sensores para reabilitação de pacientes. Além disso, os trabalhos relacionados às questões de segurança, vídeo monitoramento e trabalhos que utilizam sensores implantados não foram considerados por estarem fora do escopo desta pesquisa.

### A.3. Estudo das Fontes Selecionadas

Os trabalhos obtidos pelo método de busca foram analisados seguindo um procedimento de seleção em três etapas. O objetivo destas etapas foi ter uma visão abrangente de trabalhos realizados no contexto das redes de área corporal WBAN

utilizadas para monitoramento e reabilitação de pacientes. A primeira etapa teve início em abril de 2016 e considerou a primeira expressão de busca para artigos e revistas que incluíam “*Wireless Body Area Network*” e suas variantes no título e/ou resumo, para se ter uma visão geral da produção científica nos últimos 10 anos nesta área. Em uma segunda etapa foi adicionado o filtro “*Healthcare*” com o intuito de relacionar os trabalhos cujo foco fosse o monitoramento ou supervisão de pacientes. Nesta etapa de qualificação do doutorado, foi adicionado o filtro “*Rehabilitation*” restringindo somente para trabalhos que abordassem as redes corporais para reabilitação de pacientes. Porém, em uma etapa posterior pretende-se retirar este último filtro para ampliar este estudo. Os resultados da busca nas fontes selecionadas são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultado do procedimento de seleção de fontes.

<b>Biblioteca Digital</b>	<b>ACM</b>	<b>IEEE</b>	<b>Springer</b>	<b>S. Direct</b>	<b>Pubmed</b>	<b>Total</b>
<b>WBAN, Wireless Body Area Network</b>	103	1142	408	88	158	<b>1899</b>
<b>+Healthcare</b>	17	192	31	32	47	<b>319</b>
<b>+Rehabilitation</b>	5	20	3	0	4	<b>32</b>

Fonte: do autor

## **APÊNDICE B – Protocolo de busca sobre *Handover***

### PROTOCOLO DE BUSCA E RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE O ESTADO DA ARTE DE TRABALHOS SOBRE HANDOVER

Esta seção apresenta o protocolo de busca a ser utilizado para a revisão sistemática da literatura sobre *handover*.

#### B.1. Formulação das Questões

O objetivo desta pesquisa é o levantamento do estado da arte no processo de associação de nodos em redes de sensores sem fio padrão IEEE 802.15.4.

#### B.2. Pergunta da Pesquisa

- Quais as soluções de melhorias no processo de associação em RSSF com dispositivos móveis?

Pretende-se evidenciar as propostas de contribuições e melhorias do mecanismo de associação e re-associação de nodos móveis no padrão IEEE 802.15.4.

#### B.3. Plano de Extração

Neste estágio são definidos os itens e as regras utilizadas na extração de dados para facilitar a seleção das informações relevantes no contexto da pesquisa. Durante este estágio são extraídas as informações dos trabalhos selecionados baseadas nas questões apresentadas. Em linhas gerais, de cada trabalho são observados os seguintes dados: Título, Fonte, Autor (es), Ano de Publicação, Resumo, Resultados obtidos e questões de pesquisa em aberto. Especificamente pretende-se a partir dos dados obtidos, extrair as seguintes informações: descrição

da melhoria do mecanismo de associação e métricas utilizadas. Também serão tratadas características como mobilidade do nodo, inicialização do processo de *handover* (se a partir do nodo móvel ou do ponto de acesso), tipo de *handover* (*hard*, *soft*), simulação ou teste de bancada, caso tenham sido considerados. Para tanto, serão incluídos nesta revisão os trabalhos referentes ao mecanismo de *handoff* /*handover* em RSSF de 2013 a 2018.

#### B.4. Seleção das Fontes

Como fontes primárias de pesquisa, foram selecionadas as seguintes bibliotecas digitais pela sua representatividade na área:

ACM Digital Library:	<a href="http://dl.acm.org/">http://dl.acm.org/</a>
Google Academic:	<a href="http://scholar.google.com">http://scholar.google.com</a>
IEEE Xplore:	<a href="http://ieeexplore.ieee.org">http://ieeexplore.ieee.org</a>
PubMed:	<a href="http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed">http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed</a>
Science Direct:	<a href="http://www.sciencedirect.com">http://www.sciencedirect.com</a>
Scopus:	<a href="http://scopus.com">http://scopus.com</a>
Springer Link:	<a href="http://link.springer.com">http://link.springer.com</a>
Web of Science:	<a href="http://webofknowledge.com">http://webofknowledge.com</a>

Foram utilizadas nos mecanismos de busca das fontes selecionadas, as seguintes palavras-chave: “802.15.4”, “*association*”, “*handoff*”, “*handover*” e “*re-association*”.

Critérios para inclusão das fontes: Foram incluídos os trabalhos publicados em revistas e artigos qualificados que consideram os problemas do mecanismo de associação das redes de sensores sem fio padrão IEEE 802.15.4. Trabalhos abrangentes e relevantes de revisão (*surveys*) também foram relacionados como material de apoio.

Critérios para exclusão das fontes: Foram excluídos do estudo os trabalhos que não apresentam contribuições ou melhorias no processo de associação e/ou re-associação no padrão IEEE 802.15.4 no período selecionado.

### B.5. Estudo das fontes selecionadas

Os trabalhos obtidos pelo método de busca foram analisados seguindo um procedimento de seleção em etapas. O objetivo foi ter uma visão abrangente de trabalhos realizados no contexto das redes de sensores sem fio voltados a melhoria do mecanismo de associação. Esta etapa teve início em abril de 2018 e considerou a primeira expressão de busca para artigos e revistas que incluíam “802.15.4” e “*handover*” ou “*handoff*” no título e/ou resumo, para se ter uma visão geral da produção científica nos últimos anos nesta área. Em uma segunda busca foi adicionado o filtro “*association*” ou “*re-association*” com o intuito de relacionar os trabalhos cujo foco fosse melhorias no processo de associação. Os resultados da busca nas fontes selecionadas são apresentados na Tabela 15:

Tabela 15 – Resultado da Busca nas Fontes.

<b>Biblioteca Digital</b>	<b>Busca</b>	<b>Duplicados</b>	<b>Rejeitados</b>	<b>Aceitos</b>
<b>ACM</b>	22	0	22	0
<b>Google Academic</b>	41	13	18	10
<b>IEEE Xplore</b>	121	18	90	13
<b>Science Direct</b>	59	2	57	0
<b>Scopus</b>	104	16	85	3
<b>Springer</b>	87	2	85	0
<b>Web of Science</b>	44	9	23	12
<b>Total</b>	<b>478</b>	<b>60</b>	<b>380</b>	<b>38</b>

Fonte: do autor

## APÊNDICE C – Protótipo de Eletromiógrafo sem fio

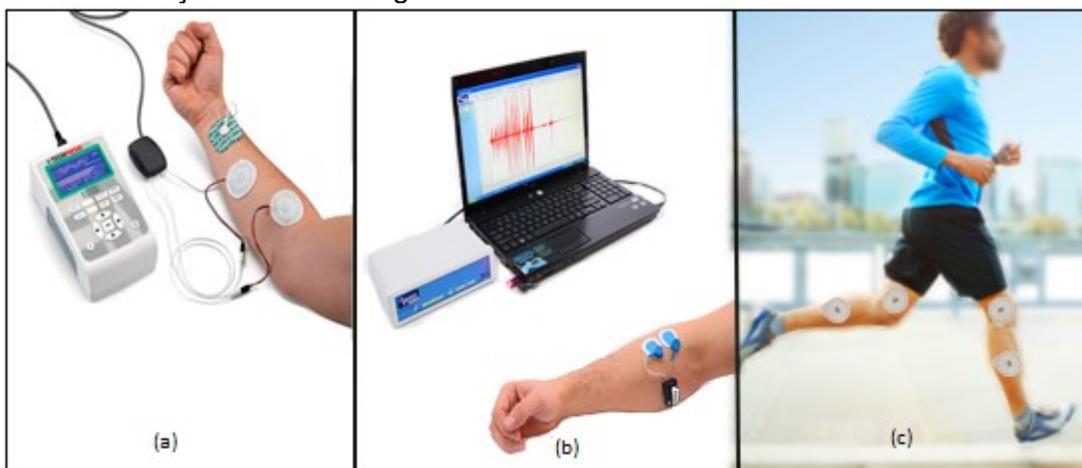
Este apêndice apresenta o contexto da aplicação de monitoramento de sinais de eletromiografia, o protótipo de eletromiógrafo sem fio desenvolvido para os testes, a aplicação de tratamento e visualização dos sinais de EMG, bem como a validação do protótipo com testes experimentais.

### C.1. Eletromiografia

Eletromiografia é um método de registro dos potenciais elétricos gerados nas fibras musculares durante sua contração e relaxamento (RAEZ; HUSSAIN; MOHD-YASIN, 2006). Segundo RAŠKOVIĆ; MILENKOVIĆ; DE GROEN e JOVANOVIĆ (2008), dentre os principais sinais fisiológicos, os que requerem maior taxa de amostragem são: eletromiografia (EMG), eletroencefalograma (EEG) e eletrocardiograma (ECG). Os componentes mais altos de frequência de um sinal de EMG giram em torno de 400-500 Hz, sendo que alguns sensores comerciais desenvolvidos para WBAN especificam uma frequência em torno de 2-500Hz. Segundo o teorema de Nyquist, a amostragem deve ser no mínimo o dobro da maior frequência, portanto uma amostragem de 1 KHz seria suficiente para um sinal de EMG ser reconstruído (LARIVIÈRE; DELISLE; PLAMONDON, 2005).

Portanto, devido às altas taxas, esses equipamentos são normalmente construídos para se comunicar através de cabos. Mesmo os que utilizam tecnologia sem fio estão limitados a uma curta distância, pois a comunicação está restrita a um único salto. Diante deste cenário, faz-se necessário avaliar se as tecnologias e padrões atualmente disponíveis suportam estas taxas de amostragem quando múltiplos saltos são utilizados. A Figura 35 apresenta a evolução no uso das tecnologias para um exame de eletromiografia.

Figura 35 – Evolução da eletromiografia.



Fonte: Internet.

Na Figura 35 inicialmente é apresentado um sistema de eletromiografia tradicional cabeado (a), seguido do uso de dispositivos sensores sem fio limitados ao alcance do ponto de acesso (b), e por último, uma RSSF que permite, além do conforto do paciente, o seu deslocamento por uma área de cobertura (c).

Para possibilitar uma avaliação mais próxima de um cenário real de monitoramento de sinais fisiológicos, foi implementado um protótipo de eletromiógrafo sem fio, bem como uma aplicação para visualização dos sinais em tempo real, que são descritos no Apêndice C.

## C.2. Protótipo do eletromiógrafo sem fio

A construção do protótipo do eletromiógrafo sem fio foi dividida em duas etapas distintas: construção do nodo móvel vestível para a aquisição e transmissão dos sinais de EMG e implementação da aplicação para recepção e tratamento dos dados. O nodo móvel é composto por um Arduino, um dispositivo XBee, e uma bateria de duas células de 7,4 V. Para obtenção dos sinais de eletromiografia foi utilizada uma placa de aquisição de sinal de EMG presente na plataforma e-Health V2.0 da

Libelium<sup>12</sup>, compatível com Arduino. Para a recepção e tratamento dos sinais de eletromiografia foi desenvolvida uma aplicação em linguagem C# no Microsoft Visual Studio. A Figura 36 apresenta o protótipo do EMG sem fio.

Figura 36 – Protótipo do EMG sem fio.



Fonte: do autor.

As funções do nodo móvel são, essencialmente, a leitura dos sinais de EMG e a avaliação de força de sinal (RSSI) dos pacotes recebidos para decisão de *handover*. A cada segundo, o nodo móvel recebe um pacote do coordenador e verifica o RSSI do pacote. Se a média dos três últimos pacotes for menor que o limiar de -87 dBm (SRINIVASAN; LEVIS, 2006), o nodo se desconecta e imediatamente tenta se conectar ao nodo que oferecer melhor sinal, reduzindo assim o tempo que o nodo fica desconectado. Devido às restrições de *hardware* impostas pelos dispositivos, como funcionalidade complementar, um módulo com cartão micro SD foi adicionado, para gravar temporariamente os dados a serem enviados, reduzindo a possibilidade de perdas durante a transição entre roteadores. Com a inclusão do módulo, quando o nodo estiver desassociado, o mesmo armazena as medições do sinal de EMG no cartão micro SD, e ao se reassociar, a transmissão recomeça a partir dos dados armazenados.

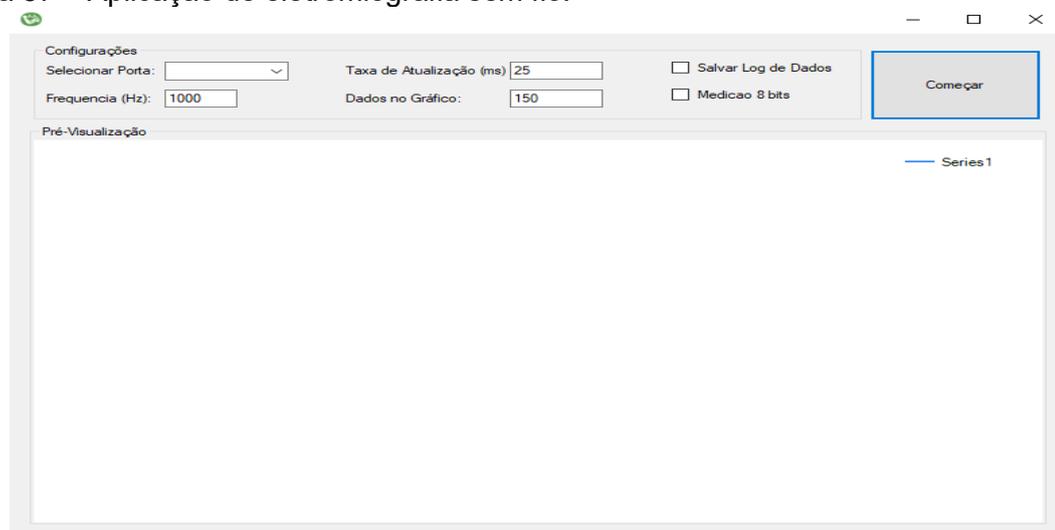
A segunda etapa foi o desenvolvimento de uma aplicação para executar no coordenador e receber os dados provenientes do nodo móvel. A aplicação permite, além de enviar mensagens de atualização de RSSI, a visualização das medições do

---

<sup>12</sup> <https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/ehealth-biometric-sensor-platform-arduino-raspberry-pi-medical>

EMG e gravação dos dados no computador conectado ao nodo coordenador. A Figura 37 apresenta a tela principal da aplicação desenvolvida.

Figura 37 – Aplicação de eletromiografia sem fio.



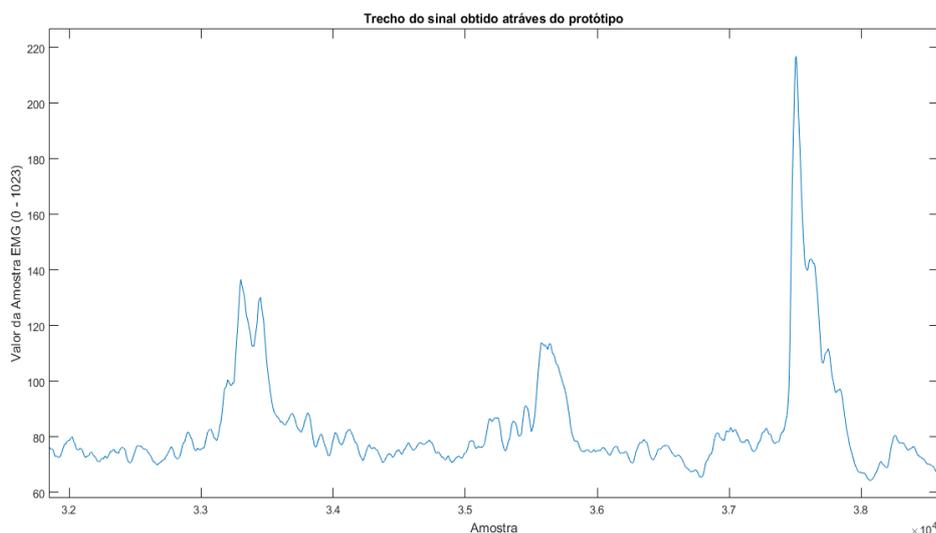
Fonte: do autor.

A aplicação para visualização dos sinais de EMG permite algumas configurações, tais como: escolher a porta em que o nodo coordenador está conectado e funções de pré-visualização, como quantidade de amostras e tempo de atualização dos dados. Outra opção disponível é a desativação da gravação dos dados, caso o objetivo seja apenas a pré-visualização dos sinais. O programa é baseado em *threads*, que executam concorrentemente, existindo uma para leitura dos dados da porta serial, outra para gravação dos dados, outra para criar a pré-visualização, e, por fim, outra responsável por enviar um pacote a cada um segundo para o nodo móvel atualizar o valor de RSSI.

Com o intuito de melhorar a eficiência na troca de mensagens, entre o nodo móvel e o roteador foram realizados diversos experimentos e alterações na implementação, aperfeiçoando os algoritmos utilizados no nodo coordenador e nodo móvel para tomada de decisão de re-associação. Inicialmente, o nodo coordenador enviava mensagens de desassociação e requisições periódicas de RSSI ao nodo móvel. Com as modificações propostas, o nodo coordenador envia apenas uma mensagem sem dados para atualizar o valor de RSSI no nodo móvel, uma vez que

este só atualiza quando recebe algum pacote. Foram realizados extensivos testes na infraestrutura de comunicação onde foi possível obter, no coordenador, os dados referentes aos sinais de eletromiografia, como pode ser observado na Figura 38.

Figura 38 – Monitoramento de EMG sem fio.



Fonte: do autor.

Este sinal apresenta as contrações do músculo de um bíceps utilizando apenas um filtro de média móvel, visto que a placa de aquisição implementa filtros analógicos próprios para EMG.

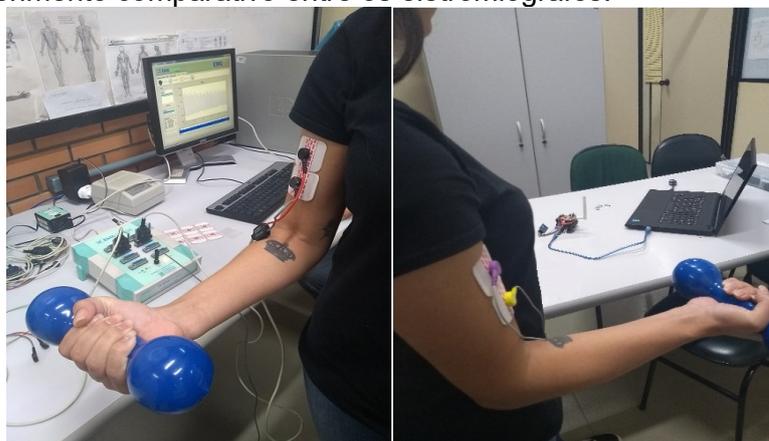
### C.3. Validação do Eletromiógrafo sem fio

Para validar o protótipo construído, foram realizados experimentos com o EMG sem fio com aquisição de sinais reais, para verificar o comportamento do protótipo em comparação com um EMG comercial tradicional com fios.

A metodologia utilizada foi obter sinais a partir de um equipamento de eletromiografia tradicional com fios e os resultados obtidos foram comparados aos do protótipo do EMG sem fio. Em um ambiente controlado, acadêmicos voluntários do curso de fisioterapia se submeteram ao exame de eletromiografia com os dois equipamentos. Esses testes foram supervisionados por um professor do Curso de Fisioterapia da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) em Criciúma/SC.

A Figura 39 ilustra os exames realizados com os dois eletromiógrafos, sendo do lado esquerdo um eletromiógrafo tradicional e à direita o protótipo do eletromiógrafo sem fio desenvolvido.

Figura 39 – Experimento comparativo entre os eletromiógrafos.



Fonte: do autor.

Os testes foram iniciados com a flexão do bíceps utilizando um peso de 4 kg durante 20 segundos. Estes testes foram repetidos 10 vezes para cada equipamento com três acadêmicos voluntários. Os resultados comparativos de aquisição de sinal foram verificados através de avaliações sistemáticas pelo profissional de fisioterapia, concluindo que, tanto as funcionalidades quanto os resultados do equipamento comercial e do protótipo desenvolvido são equivalentes para uma avaliação de eletromiografia, validando sua utilização nos testes da infraestrutura de comunicação proposta.