

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOHAN LEANDRO TÉLLEZ GARZÓN

**METODOLOGIA DE SENSORIAMENTO E ACESSO
DINÂMICO AOS CANAIS EM REDES DE SENSORES SEM
FIO**

Porto Alegre

2017

JOHAN LEANDRO TÉLLEZ GARZÓN

**METODOLOGIA DE SENSORIAMENTO E ACESSO
DINÂMICO AOS CANAIS EM REDES DE SENSORES SEM
FIO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia da Computação
Linha de pesquisa: Redes e Telecomunicações

ORIENTADOR: Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de
Salles

Porto Alegre

2017

JOHAN LEANDRO TÉLLEZ GARZÓN

METODOLOGIA DE SENSORIAMENTO E ACESSO DINÂMICO AOS CANAIS EM REDES DE SENSORES SEM FIO

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles, UFRGS
PhD., Universidade de London – Londres, Inglaterra

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS
Doutor pela Universidade de Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Prof. Dr. Cristiano Bonato Both, UFCSPA
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva, UFRN
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Natal, Brasil

Prof. Dr. João César Netto, UFRGS
Doutor pela Universidade Católica de Lovaina – Lovaina, Bélgica

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Valner João Brusamarello

Porto Alegre, maio de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus avós, Dora e Pascual, seu amor, apoio e conselhos têm sido sementes de responsabilidade, honestidade e constância.

À minha esposa Yuli e meu filho Sebastian, mananciais de amor e alegria que incentivam meu caminhar.

À minha mãe Luz Edith, meus irmãos Daniela, Oscar e Zarith e também a toda minha família pelo carinho e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela fortaleza concedida e por levar-me pelo caminho certo. A minha família pelo apoio, carinho e conselhos na consecução dos meus objetivos.

A minha esposa pelo amor, compreensão e confiança. Ao meu amado filho que ilumina minha vida com felicidade e honra.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela acolhida acadêmica, é um orgulho fazer parte de tão respeitada alma mater.

Ao professor Álvaro Salles pela orientação e colaboração durante meus estudos e pesquisas. Aos colegas do laboratório LACOM pela ajuda, parceria e amizade.

Aos colegas do laboratório LASCAR pela amizade, confiança e apoio na implementação experimental do trabalho.

Aos colegas e ex-colegas do PPGEE pelo seu auxílio, parceria e amizade incondicional.

Ao pessoal da secretaria do PPGEE, por sua valiosa orientação nos assuntos relacionados aos procedimentos acadêmicos.

Só gratidão ao Brasil e os amigos aqui conhecidos sem dúvida são muitas as boas lembranças.

Ao Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação, PEG-PG, pela provisão da bolsa de doutorado.

RESUMO

A melhora na eficiência do uso do espectro de radiofrequência é fundamental para permitir um desempenho adequado dos diversos sistemas sem fio cuja complexidade e requerimentos aumentam a cada dia. O panorama atual de atribuição de canais é estático, tolerando assim, que o espectro de radiofrequência seja usado de forma desequilibrada, gerando com isso, problemas de coexistência em algumas faixas e subutilização de recursos em outras. Para contornar esse problema, tem sido proposta a ideia de introduzir algoritmos de cognição nos dispositivos sem fio, a fim de permitir um modelo de alocação dinâmico adicional. Neste, os usuários secundários equipados com rádios cognitivos podem utilizar de forma dinâmica os canais subutilizados de usuários primários. Um usuário primário tem prioridade de uso do canal como consequência da atribuição estática, porém, o uso do canal por um usuário secundário qualquer é oportunista e limitando ao tempo de inatividade do usuário primário em um determinado local. As redes de sensores sem fio trabalham em uma banda concorrida e são sistemas que podem melhorar seu desempenho utilizando um mecanismo de acesso dinâmico aos canais, possibilitando o aproveitamento dos períodos de inatividade de usuários primários ou aumentando sua capacidade de coexistência na banda de operação atual. Segundo a literatura pesquisada são vários os desafios existentes para conseguir um método distribuído de acesso dinâmico aos canais que considere as restrições de trocas de sinalizações, consumo de energia e complexidade dos dispositivos de uma rede de sensores sem fio. Neste contexto, propõe-se uma metodologia de sensoriamento e acesso dinâmico aos canais para uma rede de sensores sem fio considerando a simplicidade dos dispositivos. Como fatores de inovação, optou-se pela definição de uma política de sensoriamento por *clusters* que permite realizar uma aprendizagem cooperativa por reforço da situação dos canais de operação. Além disso, a definição de um mecanismo de acesso dinâmico aos canais fundamentado no padrão IEEE 802.15.4 permite comunicação e coordenação distribuída de forma assíncrona. O funcionamento da metodologia proposta é avaliado e comparado usando simulações e experimentos mediante um estudo de caso específico. As comparações são realizadas com métodos de seleção de canal: fixa, cega ou baseada em recompensas por acesso. Os resultados mostram a eficiência no acesso dinâmico aos canais com aumentos na taxa de entrega de mensagens e na capacidade de coexistir com as redes primárias.

Palavras-chave: Sistemas de comunicação sem fio. Redes de sensores sem fio. Radio cognitivo. Acesso dinâmico aos canais.

ABSTRACT

The efficiency improvement of the use of radiofrequency spectrum is fundamental to allow more complex and more optimal wireless systems. The current channel allocation is static. It tolerates unbalanced use of the radiofrequency spectrum generating coexistence problems in some bands and underutilization of resources in other bands. The introduction of cognitive algorithms into wireless devices has been proposed to overcome that problem, in order to allow an additional dynamic allocation model. In this, the secondary users equipped with cognitive radios will be able to use dynamically the underutilized channels of primary users. A primary user has channel usage priority related to the static allocation, on the other hand, the use of the channel by any secondary user is opportunistic and limited to the inactivity time of the primary user in a specific place. Wireless sensor networks work in a competitive band. These systems can improve their performance using a dynamic access to the channels and consequently to enable the utilization of inactivity periods of primary users or to increase the coexistence capability at their current operation band. According to the researched literature, several challenges exist to find a distributed method for dynamic access to the channels considering the restrictions on control signaling, energy consumption and computational complexity of wireless sensor network devices. In this context, a methodology of sensing and dynamic access to the channels in a wireless sensor network considering the restrictions of the devices is proposed. As innovation, we opted for the definition of a sensing policy by clusters that allows the cooperative reinforcement learning of the situation of channels. In addition, a mechanism for dynamic access to the channels based on the IEEE 802.15.4 standard is defined to allow asynchronous and distributed coordination. The behavior of the proposed methodology is evaluated and compared using simulations and experiments through a specific case study. The comparisons are performed with channel selection methods: fixed, blind and access based. The results show good efficiency in the dynamic allocation of the channels, increasing the message delivery rate and the coexistence capability.

Keywords: Wireless communications systems. Cognitive radio. Wireless sensor networks. Dynamic access to the channels.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	17
LISTA DE TABELAS.....	19
LISTA DE ABREVIATURAS	21
1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 HIPÓTESE.....	25
1.2 OBJETIVOS.....	25
1.3 CONTRIBUIÇÃO.....	26
1.4 ORGANIZAÇÃO.....	27
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO.....	28
2.1.1 Características.....	29
2.1.2 Iniciativas de Padronização	30
2.2 PADRÃO IEEE 802.15.4	32
2.2.1 Camada PHY.....	33
2.2.2 Camada MAC	34
2.3 RÁDIO COGNITIVO	36
2.3.1 Abordagens Principais	39
2.3.2 Funções Cognitivas	41
2.3.3 Sensoriamento e Detecção por Energia	43
2.4 RESUMO	46
3 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE	47
3.1 CRITÉRIOS DE ANÁLISE	47
3.2 ACESSO AOS CANAIS NAS RSSF ATUAIS.....	49
3.3 ACESSO DINÂMICO AOS CANAIS EM CR	49
3.3.1 Sinalização <i>out-of-band</i>	50
3.3.2 Sinalização <i>in-band</i>	52
3.4 ACESSO DINÂMICO AOS CANAIS EM RSSF	55
3.5 RESUMO	61
4 METODOLOGIA DE SENSORIAMENTO E ACESSO DINÂMICO AOS CANAIS EM RSSF	64
4.1 ELEMENTOS DA METODOLOGIA MSDAC	64
4.2 MODELO DE REDE E CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	66
4.3 SENSORIAMENTO E APRENDIZAGEM	67
4.3.1 Política grupal de sensoriamento.....	68
4.3.2 Modelo de aprendizagem no <i>cluster</i>	70
4.4 MECANISMO ASSÍNCRONO DE COORDENAÇÃO E ACESSO.....	72
4.4.1 Seleção dinâmica de canal.....	72
4.4.2 Troca de dados	75
4.4.3 Restrição temporal.....	77
4.4.4 Transferência assíncrona de canal	79

4.5	ALGORITMOS DOS DISPOSITIVOS	82
4.5.1	Líder	82
4.5.2	Sensor	83
4.6	RESUMO	85
5	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	86
5.1	PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO	86
5.1.1	Modelo de simulação	86
5.1.2	Subsistema de parâmetros	87
5.1.3	Redes primárias	90
5.1.4	Subsistema de troca de dados	91
5.1.5	Rede de sensores secundária	92
5.1.6	Pseudocódigo da simulação	96
5.1.7	Resultados da simulação	97
5.2	ESTUDO EXPERIMENTAL	107
5.2.1	Descrição da rede primária.....	108
5.2.2	Descrição da RSSF	110
5.2.3	Métodos programados nos dispositivos	112
5.2.4	Resultados experimentais.....	118
5.3	RESUMO	129
6	CONCLUSÃO	130
6.1	CONCLUSÕES	130
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	134
6.3	PRODUÇÃO CIENTIFICA	135
	REFERÊNCIAS	136

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Diagrama de um RSSF típica.	29
Figura 2.2: Topologias de rede em IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4 STD, 2003).	33
Figura 2.3: Banda de operação de IEEE 802.15.4 na banda 2.4GHz.....	34
Figura 2.4: Transferência de dados até o coordenador: a) com e b) sem <i>beacon</i>	35
Figura 2.5: Exemplo de atribuição de slots no modo TSCH de IEEE 802.15.4e.	36
Figura 2.6: Elementos envolvidos em CR.....	37
Figura 2.7: Medição de ocupação na banda de 512-608MHz (SSC, 2010).	38
Figura 2.8: Ciclo Cognitivo desde a visão de: a) Mitola e b) Haykin.....	39
Figura 2.9: Funções cognitivas (AKYILDIZ <i>et al.</i> , 2006).....	42
Figura 2.10: Tarefas típicas de um SU <i>single-radio</i> (GHASEMI; SOUSA, 2007).	43
Figura 2.11: Detector por energia (ATAPATTU; TELLAMBURA; JIANG, 2014).....	44
Figura 3.1: Principais critérios de análise dos métodos.	47
Figura 3.2: <i>Superframe</i> de CogMesh (CHEN, T. <i>et al.</i> , 2007).	50
Figura 3.3: <i>Superframe</i> C-MAC (CORDEIRO; CHALLAPALI, 2007).	53
Figura 3.4: DC-MAC: a) sequência de operações e b) modelo POMDP.....	53
Figura 4.1: Elementos da metodologia MSDAC.	65
Figura 4.2: Modelo da RSSF.....	66
Figura 4.3: Processo de sensoriamento da banda de trabalho no <i>cluster</i>	69
Figura 4.4: Processos no <i>cluster</i> de: a) seleção dinâmica e b) troca de dados.	72
Figura 4.5: Conexão entre grupos vizinhos.....	74
Figura 4.6: Fluxograma do algoritmo de acesso.	75
Figura 4.7: Detalhes dos tempos do sensor no caso experimental.	77
Figura 4.8: Tempos de <i>backoff</i> para quadro níveis de NB.	78
Figura 4.9: Coordenação para transferência dinâmica de canal.	79
Figura 4.10: Pseudocódigos de escolha de canal: a) líder e b) sensor.	80
Figura 4.11: Diagrama do algoritmo operacional do líder.	82
Figura 4.12: Fluxograma da metodologia proposta para os sensores.	83
Figura 5.1: Diagrama de classes do modelo de simulação.....	87
Figura 5.2: Localização dos nós em um ambiente de RF de dimensão X e Y.	89
Figura 5.3: Modelo de tráfego primário em um canal.....	90
Figura 5.4: Métodos da classe <i>claseSU</i>	93
Figura 5.5: Desempenho do esquema DSSS-OQPSK.	95
Figura 5.6: Pseudocódigo resumido das etapas da simulação.....	96
Figura 5.7: Localização dos dispositivos no cenário simulado com $N=12$	97
Figura 5.8: Ações dos dispositivos: a) acesso (troca de dados) e b) medições ED.....	98
Figura 5.9: $E_t(m)$ no <i>cluster</i> 1 em cada época de comunicação.	99
Figura 5.10: Métrica de convergência ao longo do tempo.	100
Figura 5.11: Taxa de entrega de mensagens da RSSF.	102
Figura 5.12: Convergência da rede em cada situação de δ_{Max}	104
Figura 5.13: Atividade dos dispositivos nos M canais com: a) $\delta_{Max}=9$ e b) $\delta_{Max}=3$	105
Figura 5.14: Cenário simulado para alteração de tráfego dos PUs.	106
Figura 5.15: Número de épocas que o líder opera em um canal do grupo $m \leq 3$ ou $m > 3$	107
Figura 5.16: Elementos da rede WLAN primária.	108

Figura 5.17: Padrão de tráfego do PU gerando com <i>SWcontrole</i>	110
Figura 5.18: Nó sensor Namimote: a) hardware e b) diagrama de blocos.	110
Figura 5.19: Potência TX do Namimote conforme a configuração.	111
Figura 5.20: Máquinas de estado MSDAC: a) líder e b) sensores.	113
Figura 5.21: Máquina de estado MRA do líder.....	114
Figura 5.22: Máquina de estado do sensor nas abordagens MRA, BCH e canal fixo.	115
Figura 5.23: Máquina de estados do líder nas abordagens BCH e canal fixo.....	116
Figura 5.24: Máquina de estados do líder na abordagem MSDAC junto RA.....	117
Figura 5.25: Distribuição espacial dos dispositivos e fotos do Cenário indoor.	119
Figura 5.26: Resultados dos experimentos em uma janela de 20 minutos.....	120
Figura 5.27: Evolução de: a) escolha de canal no MSDAC e b) função E_t e.....	123
Figura 5.28: Diagrama e fotos do Cenário confinado.	126
Figura 5.29: Taxa de entrega obtidas durante os experimentos no cenário confinado.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de IEEE 802.15.4 PHY	33
Tabela 2: Comparação das abordagens de acesso dinâmico aos canais.....	62
Tabela 3: Elementos do subsistema de parâmetros	88
Tabela 4: BER e DR da RSSF nas situações de N	103
Tabela 5: BER e DR da RSSF nas diversas situações de δ_{Max}	105
Tabela 6: Estatísticas dos usuários primários em cada simulação	106
Tabela 7: Banda primária	108
Tabela 8: Características técnicas dos roteadores	109
Tabela 9: Funções exemplo do API-SMAC.....	112
Tabela 10: Taxa de entrega obtida no cenário indoor com $N=4$	121
Tabela 11: Porcentagem de atividade dos sensores no cenário indoor com $N=4$	122
Tabela 12: Taxa de entrega obtida no cenário indoor com $N=5$	124
Tabela 13: Resultados de desempenho da rede primária no cenário indoor com $N=5$	124
Tabela 14: Porcentagem de atividade dos sensores no cenário indoor com $N=5$	125
Tabela 15: Resultados obtidos no cenário confinado para diversas taxas UDP primárias	127
Tabela 16: Porcentagem de atividade dos sensores no cenário confinado.....	128

LISTA DE ABREVIATURAS

ACK	<i>Acknowledgement frame</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AGWN	<i>Additive Gaussian White Noise</i>
AP	<i>Access Point</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
BCH	<i>Blind Channel Hopping</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BS	<i>Base Station</i>
CAS	<i>Channel Access Set</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CCC	<i>Common Control Channel</i>
CCK	<i>Complementary Code Keying</i>
CR	<i>Cognitive Radio</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSS	<i>Channel Sensing Set</i>
CWS	<i>Channel Work Set</i>
DATA	<i>Data Frame</i>
DR	<i>Delivery Ratio</i>
DSA	<i>Dynamic spectrum access</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ED	<i>Energy Detection</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFD	<i>Full-Function Device</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISA	<i>International Society of Automation</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>

LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MRA	<i>Method by Reward of Access</i>
MSDAC	<i>Method for Sensing and Dynamic Access to the Channels</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OQPSK	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying</i>
PA	<i>Power Amplifier</i>
PHY	<i>Physical layer</i>
PPGEE	<i>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica</i>
PU	<i>Primary User</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
REQ	<i>Requirement frame</i>
RF	<i>Radiofrequency</i>
RFD	<i>Reduced-Function Device</i>
RSSF	<i>Redes de Sensores sem Fio</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
RX	<i>Receptor</i>
SDR	<i>Software-defined Radio</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SMAC	<i>Simple Media Access Controller</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SU	<i>Secondary User</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TSCH	<i>Time Slotted Channel Hopping</i>
TVWS	<i>Television White Spaces</i>
TX	<i>Transmitter</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WRAN	<i>Wireless Regional Area Network</i>
WS	<i>White Spaces</i>

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação sem fio estão sendo implementados de forma exponencial e fornecem ampla variedade de serviços e novas aplicações. Isto é resultado de características como versatilidade, rápida implementação, alta escalabilidade e custos baixos, tanto de implementação quanto de manutenção (COUCH, 2014). A principal ferramenta dos sistemas sem fio são os canais do espectro de radiofrequência (RF – *Radiofrequency*).

Estes recursos são administrados por instituições tais como a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) no Brasil. O espectro de RF é dividido em canais que são utilizados por diversos tipos de sistemas sem fio mediante um modelo de alocação estática, isto é, um canal é destinado para uso exclusivo de uma entidade denominada usuário primário (PU – *Primary User*). Os PUs podem utilizar esporadicamente ou parcialmente os canais alocados em uma região específica (AKYILDIZ *et al.*, 2006). As lacunas ou períodos de silêncio do PU no canal são comumente denominados espaços brancos (WS – *white spaces*). Outras faixas de canais apresentam um panorama diferente, caracterizado por uma ampla utilização e competição pelos limitados recursos de RF, exemplificado pela faixa industrial, médica e científica (ISM – *Industrial Scientific and Medical*). Segundo a Comissão Federal de Comunicações (FCC) a utilização dos canais nos Estados Unidos encontra-se na faixa de 15% até 85% dependendo das variações temporais e geográficas (AKYILDIZ *et al.*, 2006). Medições de ocupação da faixa 30-3000 MHz realizadas em várias cidades dos Estados Unidos evidenciam uma quantidade considerável de recursos de RF desperdiçados (SSC, 2005, 2010), esta tendência é mundial e Brasil não é a exceção, por exemplo, o uso da televisão digital tem liberado vários recursos de RF. Neste contexto, o modelo de alocação estática admite que o espectro de RF seja usado de forma desequilibrada gerando problemas de coexistência em algumas faixas e subutilização de recursos em outras.

Adotar complementarmente um modelo dinâmico de alocação permitiria melhorar o desempenho dos sistemas sem fio e a eficiência na utilização do espectro de RF (HOSSAIN; NIYATO; KIM, 2015). Este conceito considera um uso mais flexível e compreensível do espectro disponível, permitindo que entidades não licenciadas, denominadas usuários secundários (SU – *Secondary User*) acessem aos canais de usuários primários sob certas restrições, que visam proteger as comunicações primárias. A tecnologia chave para conseguir este dinamismo no acesso ao espectro é conhecida como rádio cognitivo (CR – *Cognitive Radio*) e foi inicialmente proposta por (MITOLA; MAGUIRE, 1999). O CR deve fornecer um

mecanismo de acesso dinâmico ao espectro (DSA) que habilita aos SUs a utilizarem os WS presentes nos canais primários de forma oportunista e sem afetar o desempenho dos PUs.

Adicionalmente, as redes de sensores sem fio (RSSF) são uma tecnologia de monitoramento/atuação sobre variáveis físicas de um ambiente, com diversas aplicações e essenciais para muitas áreas (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). O desempenho de uma RSSF operando na banda ISM pode ser degradado por uma ampla variedade de dispositivos de diversas tecnologias que compartilham esta faixa (JOSHI; NAM; KIM, 2013). Evidências desta degradação entre tecnologias têm sido analisadas em estudos como (IEEE 802.15.2 STD, 2003; WINTER *et al.*, 2015; WUNSCH; JAKEL; JONDRAL, 2015).

Por estas razões, equipar os nós sensores com mecanismos de cognição que permitam um acesso dinâmico aos canais evitando interferência e aproveitando os espaços brancos em canais licenciados, passa a ser uma abordagem emergente nas RSSF. Segundo (AKAN; KARLI; ERGUL, 2009), esta integração pode melhorar o desempenho das RSSF em termos de taxa de entrega de mensagens (DR – *Delivery Ratio*), auto-organização (e.g., para seleção dinâmica de canais), consumo de energia e outras vantagens potenciais. Entretanto, a implementação de uma RSSF com acesso dinâmico aos canais é complexa porque devem ser considerados tanto os desafios implícitos no conceito CR quanto os desafios das redes de sensores, i.e., baixo *overhead*, mínimas colisões, detecção e aproveitamento dos espaços brancos, proteção do PU, qualidade de serviço, segurança, auto-organização, baixo consumo de energia e complexidade limitada dos dispositivos sensores (JOSHI; NAM; KIM, 2013). Também deve ser considerado se o padrão de RSSF é modificado ou permanece inalterado. Neste trabalho é proposta a adição de informação ao padrão como será descrito posteriormente.

Muitas das RSSF atuais utilizam esquemas centralizados com acesso por *slots* (CHEN, D.; NIXON; MOK, 2010; DE GUGLIELMO; ANASTASI; SEGHETTI, 2014; ZIGBEE, 2008). Estas abordagens são rígidas no acesso aos canais e têm requerimentos de sincronização estritos que limitam a capacidade de reagir a mudanças do ambiente de RF e a escalabilidade geográfica. Os métodos de cognição propostos para RSSF consideram que o acesso dinâmico aos canais é governado ao longo do tempo pelas recompensas resultantes das comunicações (CHEN, J. *et al.*, 2015; FAGANELLO *et al.*, 2013; LI, 2009; NAPARSTEK; COHEN, 2017; YAU; KOMISARCZUK; TEAL, 2009) e não exploram o sensoriamento espectral para esta tarefa. Além disso, algumas abordagens apresentam: alta complexidade (BYUN; BALASINGHAM; LIANG, 2008; FADEL *et al.*, 2017; STABELLINI; JAVED, 2010; ZHAO *et al.*, 2007); políticas de sensoriamento individual nos sensores (OTO; AKAN, 2012; SUN *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2011); complexas trocas de sinalização sincronizadas (AGARWAL

et al., 2012; ATAKAN; AKAN, 2007; STABELLINI; JAVED, 2010; ZHAO *et al.*, 2007); não abordam o acesso ao meio nem a coordenação entre transmissor e receptor, e.g., (FANTACCI; MARABISSI, 2016; ROMERO *et al.*, 2016) ou requerimento de canal comum de controle (BRIK *et al.*, 2005; CHEN, J. *et al.*, 2015; ZOU; CHIGAN, 2009) que dificultam sua implementação nos sensores.

Em resumo, conforme verificado na pesquisa bibliográfica é percebido que, referente às RSSF, o acesso dinâmico aos canais fundamentado em uma aprendizagem por reforço do sensoriamento multicanal que permitiria coordenar as comunicações e a transferência espectral de forma assíncrona na rede, sem precisar complexos esquemas de sinalização, não tem sido abordado de forma eficaz. Diante deste cenário, esta tese visa estabelecer uma abordagem ainda inexplorada cuja formulação é apresentada na sequência.

1.1 HIPÓTESE

Esta tese pesquisa qual deve ser a metodologia de acesso dinâmico aos canais em uma RSSF para evitar interferências, conservar a simplicidade dos dispositivos sensores e permitir escalabilidade. Para responder esta questão é definida a seguinte hipótese:

“Uma metodologia de acesso dinâmico aos canais em uma RSSF que evite interferências, conserve a simplicidade dos dispositivos e permita escalabilidade, deve ser fundamentada em uma aprendizagem distribuída realimentada por sensoriamento espectral cooperativo e assincronismo na comunicação e na coordenação dos sensores”.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese é desenvolver uma metodologia de acesso dinâmico aos canais em uma rede de sensores sem fio, utilizando um esquema distribuído de aprendizagem fundamentado nas informações de sensoriamento, permitindo cooperação e comunicação sem requerimentos estritos de sincronismo, e considerando a simplicidade dos dispositivos sensores. Para atingir este objetivo, definem-se os objetivos específicos como segue:

- a) Estudar os métodos de sensoriamento espectral;
- b) Identificar e analisar os principais métodos de acesso dinâmico ao espectro propostos no contexto de CR e das RSSF;

- c) Implementar um cenário simulado para analisar o funcionamento da metodologia proposta considerando as interações resultantes das comunicações sem fio entre redes primárias e secundárias;
- d) Definir uma política de sensoriamento grupal que permita a um subconjunto (*cluster*) de sensores de uma RSSF adquirir informações de sensoriamento dos canais de operação;
- e) Formular um método de aprendizagem fundamentado nas informações de sensoriamento para ponderar os canais mais adequados para operação;
- f) Definir um método de acesso dinâmico aos canais que permita acesso aleatório ao canal de operação e coordenação assíncrona para transferência espectral considerando a informação de sensoriamento aprendida no *cluster*;
- g) Implementar a metodologia proposta em dispositivos sensores reais e avaliar esta mediante um estudo de caso experimental que considere a banda ISM de 2,45 GHz como banda primária e nós sensores operando no padrão IEEE 802.15.4.

1.3 CONTRIBUIÇÃO

As contribuições principais deste estudo são: a formulação de uma metodologia assíncrona de acesso dinâmico aos canais para uma RSSF dividida em *clusters* fundamentada no sensoriamento cooperativo; a definição de uma política de sensoriamento da banda que permite a um grupo de sensores adquirir cooperativamente medições de energia da banda de operação sem comprometer os recursos individuais de cada nó sensor quanto a processamento e troca de dados, além disso, as ações de sensoriamento do grupo de sensores são coordenadas de forma simples, já que a seleção de canal de sensoriamento é realizada individualmente seguindo um padrão aleatório; a especificação de um modelo de aprendizagem por reforço grupal fundamentado nas informações de sensoriamento que permite identificar o estado de todos os canais de operação e que acontece paralelamente à troca de dados; a seleção adaptativa do canal de operação considerando os canais que oferecem a menor chance de interferência segundo o modelo de aprendizagem; a definição de um mecanismo de transferência assíncrona de canal que permite aos sensores seguir forma simples o líder à medida que o canal de operação muda dinamicamente; a definição de um modelo de simulação que habilita a interação entre redes primária e secundária ao longo do tempo e permite desenvolver a metodologia proposta, bem como a definição de uma métrica de convergência para avaliação; e a implementação de

um estudo de caso experimental que avalia e compara o desempenho da metodologia proposta. Um modelo de aprendizagem por reforço que junta sensoriamento grupal e as recompensas decorrentes das comunicações para acesso dinâmico aos canais é formulado, além disso, os dois modelos de aprendizagem propostos não necessitam fase de exploração de canais, o que evita a geração de possíveis interferências aos usuários primários e simplifica a escolha de canal dos dispositivos.

1.4 ORGANIZAÇÃO

No capítulo 1 é realizada uma introdução apresentando as motivações, o problema abordado, os objetivos da tese, as contribuições e a estrutura do trabalho escrito.

O capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica de temas relacionados com esta tese. Primeiro, uma descrição das RSSF é realizada para mostrar definições, características, aplicações e princípios abordagens deste tipo de redes. Também se estuda o padrão IEEE 802.15.4 que é utilizado no desenvolvimento do trabalho. Por último, assuntos fundamentais de CR são estudados.

O assunto abordado no capítulo 3 apresenta uma revisão do estado da arte. Neste capítulo são analisados os trabalhos relacionados com esta tese e são discutidas suas principais características usando vários critérios de comparação.

A metodologia de sensoriamento e acesso dinâmico aos canais (MSDAC) em RSSF desenvolvida é discutida no capítulo 4. Aspectos do algoritmo e da política de sensoriamento executada pelos dispositivos sensores são descritos. Além disso, a aprendizagem das informações de sensoriamento realizada nos *clusters* da RSSF é estabelecida utilizando um algoritmo por reforço. Outros assuntos detalhados neste capítulo são: o acesso ao meio mediante CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), a definição de subconjuntos de canais de acesso e de sensoriamento, e o mecanismo de transferência adaptativa de canal de forma assíncrona.

O capítulo 5 descreve o modelo de simulação desenvolvido para teste e verificação das funcionalidades da metodologia proposta. O estudo de caso experimental é definido e são apresentados os resultados de avaliação da metodologia desenvolvida.

Por fim, as conclusões associadas a esta tese e possíveis trabalhos futuros são explicitados no capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são descritos assuntos da fundamentação teórica utilizados nesta tese. No início, apresenta-se um resumo das RSSF, suas principais características, aplicações, e os desafios inerentes nestas tecnologias. Estuda-se o padrão IEEE 802.15.4 do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) que é usado no desenvolvimento deste trabalho. Na sequência, os assuntos relacionados ao rádio cognitivo são apresentados.

2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO

Os avanços tecnológicos em várias áreas como a eletrônica digital e a comunicação sem fio tem promovido o desenvolvimento de dispositivos sensores de baixo custo, baixo consumo de energia e tamanho reduzido (AKYILDIZ; VURAN, 2010). Estes podem realizar tarefas de sensoriamento, atuação, processamento de dados e comunicação que permitem cooperativamente a formação de RSSF para leitura e escrita de variáveis relacionadas a um ambiente específico (AKYILDIZ; VURAN, 2010). Em outras palavras, as RSSF são formadas por um amplo número de nós sensores que geram e transferem cooperativamente dados capturados de um fenômeno físico. Uma variedade de sensores mecânicos, térmicos, biológicos, químicos, ópticos ou magnéticos podem ser juntados aos nós sensores para permitir medir parâmetros do ambiente físico. A interação realizada pelas RSSF com variáveis do mundo físico é essencial para muitas disciplinas, por isso, suas aplicações são diversas como será descrito na seguinte seção. O projeto de uma RSSF está sujeito ao tipo de aplicação, o ambiente, os custos, o hardware e outras restrições (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Na Figura 2.1 (JOSHI; NAM; KIM, 2013) é apresentada uma RSSF típica. Um nó controlador é responsável por coletar dados dos sensores em comunicações de um ou múltiplos saltos. Diferentemente de outros sistemas sem fio cujo tráfego se relaciona de forma direta com a intenção dos usuários, as comunicações em uma RSSF podem ser dirigidas por eventos e os sensores enviam pacotes pequenos (e.g., 128 bytes) de informação com certa periodicidade. Este processo é conhecido como tráfego em rajada (*bursty traffic*) (AKAN; KARLI; ERGUL, 2009) e será utilizado nos testes experimentais e simulados que avaliam a MSDAC. A informação do fenômeno físico estimada em forma coletiva pelos sensores deve ser confiável e dependendo da aplicação, os retardos devem ser mínimos para conseguir realizar ações adequadas, e.g., controle de processos.

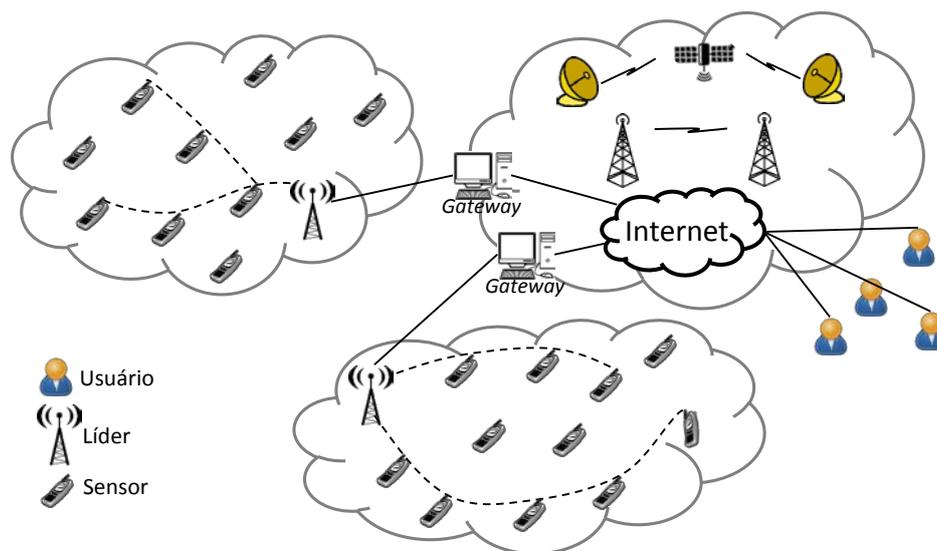


Figura 2.1: Diagrama de um RSSF típica.

2.1.1 Características

Na sequência são descritas características essenciais para o entendimento das RSSF e as possíveis aplicações mais relacionadas com a metodologia proposta. Os nós sensores geralmente são localizados em áreas de acesso limitado, onde sua manutenção se torna difícil, portanto, a auto-organização e o tempo de vida da RSSF são fatores importantes.

As RSSF devem apresentar eficiência energética e um consumo de energia baixo, sendo projetadas para funcionarem por longos períodos de tempo sem intervenção humana. A bateria é a fonte principal de um nó sensor, mas, outros tipos de fontes podem igualmente serem utilizados, por exemplo, um painel solar. A iniciativa EnOcean (ENOCEAN ALLIANCE, 2016) aborda uma proposta interessante que captura a energia do ambiente para alimentar o próprio sensor. Esta energia é obtida de: movimento, rotação, mudança térmica ou luz. Os sensores têm restrições de consumo de energia, por isso, nas RSSF o foco é a economia de energia, enquanto nos sistemas sem fio tradicionais, tenta-se melhorar outras características (por ex., a taxa de transmissão). Desta forma, conservar a simplicidade dos nós sensores e definir um tempo de baixo consumo de energia (*sleep*) são aspectos que devem ser considerados pela metodologia MSDAC.

Existem dois tipos de RSSF: estruturadas e não estruturadas. Na primeira, os sensores são implementados de forma planejada, resultando em manutenção e gerenciamento simples. Em uma RSSF não estruturada os sensores são implementados de forma aleatória e o seu desenvolvimento está associado com processos de comunicação auto organizáveis.

Um nó sensor geralmente é um dispositivo formado por: um módulo de sensores/atuação para medir variáveis ou mudar parâmetros, um módulo de comunicação para envio de dados (ex., comunicação sem fio) e um módulo de processamento que gerencia todas as funcionalidades. Restrições associadas aos nós sensores incluem: quantidade de energia limitada, comunicações de curto alcance, baixa largura de banda, processamento e armazenamento de dados limitados.

Segundo (AKYILDIZ; VURAN, 2010), as aplicações de uma RSSF podem ser classificadas em cinco grupos: militares, monitoramento do ambiente, saúde, residencial e industrial. Os nós sensores de uma RSSF podem monitorar uma grande quantidade de condições de um ambiente: temperatura, umidade, pressão, velocidade, direção, movimento, luz, nível de ruído, nível de estresse mecânico, etc. Isto possibilita uma ampla variedade de aplicações incluindo: automação industrial, monitoramento de pacientes, monitoramento residencial, monitoramento de bens, monitoramento de ambientes, previsão e análise do clima, monitoramento e vigilância no campo de batalha, monitoramento de aceleração sísmica, tensão, temperatura ou velocidade do vento.

O contexto da metodologia proposta são as aplicações de automação residencial (domótica), porém, o uso pode-se aplicar a outras áreas das RSSF realizando as considerações necessária enquanto à camada física dos nós sensores, por exemplo, monitoramento de ambientes. O enfoque das aplicações em automação residencial é melhorar a qualidade de vida das pessoas usando, por exemplo, o controle energético ou de iluminação, e aumentando o conforto e a segurança da residência. Em (TOSCHI; CAMPOS; CUGNASCA, 2017) é realizada uma revisão do estado atual da automação residencial detalhando conceitos, infraestruturas, padrões e desafios, além disso, definido o conceito de HAN (*Home Area Network*). Automação residencial pode ter recursos de processamento, atuação e monitoramento que geram enorme quantidades de dados permitindo novas abordagens de pesquisa como o Internet das Coisas.

2.1.2 Iniciativas de Padronização

Nesta seção são apresentados os principais esforços de padronização realizados por diversas associações para permitir interoperabilidade das plataformas e fabricantes de sensores a nível mundial. Um requerimento de design chave na maioria destes esforços é o baixo consumo de energia. O padrão IEEE 802.15.4 lançado em 2003 serve de base estrutural para

muitos outros esforços de padronização descritos na sequência. Algumas das alternativas de padronização são: LoRa, SigFox, ZigBee, WirelessHART, ISA100.11, WIA-PA, entre outros. Análise destes esforços de padronização é recomendada para entender o contexto das RSSF.

Em 2003, o IEEE 802.15.4 foi estabelecido como padrão para redes sem fio de área pessoal de baixa taxa de transmissão (LR-WPAN). Este padrão é uma especificação de transceptores sem fio de baixa taxa de dados com longo tempo de vida da bateria e com baixa complexidade. Nele são definidas as camadas PHY (*Physical layer*) e MAC (*Medium Access Control*) deste tipo de transceptores. A maioria das plataformas e padrões desenvolvidos para RSSF utilizam o padrão IEEE 802.15.4 como base. Este é de vital importância no desenvolvimento das RSSF e é utilizado na realização desta tese, por isso, será estudado mais detalhadamente na seção 2.2. Protocolos de comunicação de alto nível, por exemplo, ZigBee (ZIGBEE, 2008), são definidos para complementar o IEEE 802.15.4. Porém, o ZigBee define protocolos de comunicação de camadas superiores: rede e aplicação. Simplicidade, baixo custo e comunicações sem fio de baixa potência são algumas características relevantes do ZigBee que contempla três tipos de nós: coordenador, roteador e terminal. A formação de redes em malha é considerada mediante a conexão de centenas de sensores.

O primeiro padrão de comunicação sem fio especificamente projetado para aplicações de controle e medição de processos industriais é o WirelessHART (CHEN, D.; NIXON; MOK, 2010). As camadas definidas neste padrão são: física, enlace, rede, transporte e aplicação. Como camada física utiliza IEEE 802.15.4 PHY na banda de 2,4 GHz e como camada MAC o mecanismo *Time Division Multiple Access* (TDMA). Roteamento em malha, saltos “cegos” de canal, confiabilidade, segurança, eficiência energética e sincronização são características deste padrão. O WirelessHART é um esquema centralizado com um gerenciador de rede controlando os dispositivos de campo e definindo os acessos ao meio mediante *slots* sincronizados.

Concebido para processos de automação industrial, o ISA 100.11a (NIXON, 2012) da ISA (*International Society of Automation*) utiliza TDMA com *slots* de tempo variáveis e uma camada física fundamentada em IEEE 802.15.4 PHY. De forma similar a WirelessHART, usa *gateways*, um sistema de controle centralizado e dispositivos de campo que podem ser roteadores ou não de dados. As topologias consideradas são: estrela, árvore ou malha. As mensagens são enviadas em *slots* sincronizados e considera-se também vários mecanismos de salto cego de canal.

O WIA-PA é um padrão de RSSF para aplicações em automação industrial (IEC 62601 STD, 2011) que considera uma topologia de rede formada por dois níveis: estrela e malha. A primeira topologia conecta os sensores com um roteador central para formar um grupo. Já os

roteadores formam uma malha para roteamento de mensagens. Um gateway coleta as mensagens encaminhando-as até um gerenciador de rede central. A camada física e MAC se fundamentam no IEEE 802.15.4.

Outros esforços de padronização relacionados com RSSF são: o IEEE 802.15.3 (IEEE 802.15.3 STD, 2003), o IEEE 802.15.4g (KUOR-HSIN; MASON, 2012), o 6LoWPAN (MULLIGAN, 2007) e Wibree (HUNN; LANE, 2007).

2.2 PADRÃO IEEE 802.15.4

Nesta seção são apresentados diversos conceitos da camada PHY e MAC do padrão IEEE 802.15.4 que são usados tanto na definição quanto na verificação da metodologia MSDAC. Esta seção pode ser omitida caso o leitor esteja familiarizado com este padrão. O IEEE 802.15.4 define uma especificação de acesso ao meio e a camada física para redes LR-WPAN (IEEE 802.15.4 STD, 2003). O objetivo é definir um padrão para dispositivos de baixo consumo de energia, baixa taxa de transmissão, baixa complexidade e baixo custo. Esta tecnologia tem sido bem-sucedida na implementação de diversas aplicações relacionadas às RSSF. A taxa de transmissão é baixa (máxima é 250Kbps), mas pode ser suficiente para atingir os requerimentos de diversas aplicações de automação. Algumas características do padrão são: taxas de transmissão no ar de 250Kbps, 40Kbps e 20Kbps; detecção por energia (ED – *Energy Detection*) ou indicador de qualidade do enlace (LQI – *Link Quality Indicator*). Dois tipos de dispositivos podem constituir uma rede de sensores: *Full-Function Device* (FFD) e *Reduced-Function Device* (RFD). Um FFD opera em três modos: coordenador da LR-WPAN, roteador ou dispositivo sensor. Um RFD é um dispositivo com capacidades reduzidas que pode se associar com um determinado FFD. Um FFD tem todas as funcionalidades do protocolo e consequentemente é utilizado para se comunicar com outros FFDs. Topologias em estrela e *peer-to-peer* são possíveis (Figura 2.2), porém, uma rede LR-WPAN deve ter pelo menos um FFD trabalhando como controlador. A topologia em estrela é utilizada como mecanismo de comunicação dentro de um *cluster* da MSDAC. Nesta topologia, a comunicação acontece entre os diversos RFDs e um controlador central (coordenador da rede). O coordenador é alimentado principalmente por uma fonte, no entanto, os demais dispositivos da rede em estrela são alimentados em sua maioria com baterias. Aplicações mais comuns incluem: automação residencial, periféricos sem fio, brinquedos ou saúde pessoal.

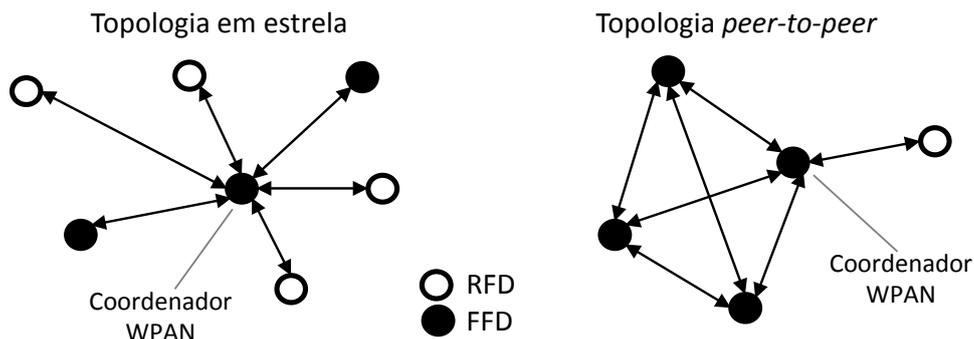


Figura 2.2: Topologias de rede em IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4 STD, 2003).

2.2.1 Camada PHY

Nós sensores usando a camada física do IEEE 802.15.4 são utilizados para avaliação da metodologia proposta. A principal função dela é garantir a transmissão e recepção de PPDU's (PHY Protocol Data Units). Outras funções relacionadas são: gerenciamento do transceptor RF, medição ED, cálculo de LQI, seleção de canal e *Clear Channel Assessment* (CCA).

Tabela 1: Parâmetros de IEEE 802.15.4 PHY

PHY (MHz)	Banda (MHz)	Parâmetros de espalhamento		Parâmetros dos dados		
		Taxa de chips (kchip/s)	Modulação	Taxa de bit (kb/s)	Taxa de símbolos (ksymbol/s)	Símbolos
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary ortogonal

A Tabela 1 apresenta a banda de operação de 2,4GHz com seus respectivos métodos de modulação e espalhamento espectral. A potência de transmissão utilizada deve estar em conformidade com a regulamentação local. No padrão é usado o *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) como técnica de espalhamento que permite alta tolerância ao ruído. Na banda 2,4GHz é usada uma técnica de modulação 16-ary quase ortogonal. Uma de 16 sequencias ortogonais de ruído pseudoaleatório (PN – *Pseudo-random Noise*) é selecionada para a transmissão de 4 bits de informação (um símbolo). Várias destas sequencias são concatenadas e servem para modular o sinal portador mediante *Offset Quadrature Phase-Shift Keying* (OQPSK). A banda de operação em 2,4GHz do protocolo IEEE 802.15.4 tem 16 canais numerados de 11 até 26 como apresentado na Figura 2.3. Cada canal tem uma largura de banda de 2MHz e entre cada frequência central há 5MHz de faixa. A sensibilidade do receptor definida é de ao menos -85dBm, porém, a potência máxima de entrada não deve exceder -20dBm (saturação).

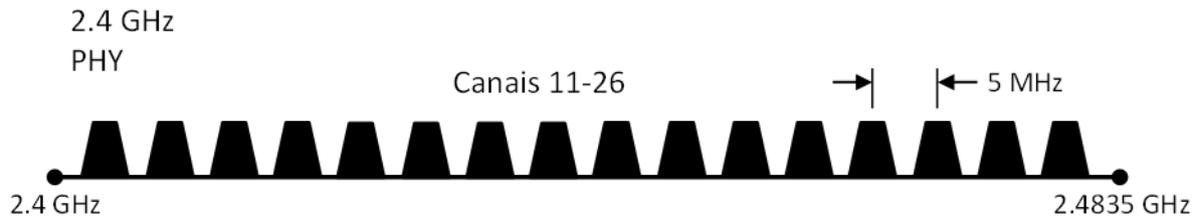


Figura 2.3: Banda de operação de IEEE 802.15.4 na banda 2.4GHz..

O padrão permite também a utilização de ED para medir a potência de sinal recebido em um canal específico. O tempo de medição deve ser de 8 símbolos. O resultado desta medição varia entre 0 e 255 (8 bits). O LQI é uma estimativa da qualidade do enlace devido ao pacote recebido. O resultado desta estimativa deve ser notificado à camada MAC e varia também entre 0 e 255. O CCA é um mecanismo utilizado pela camada MAC para acessar ao canal de operação. Este realiza uma medição ED que comparada com um limiar ED permite deliberar se o canal está livre ou ocupado.

2.2.2 Camada MAC

A camada MAC de IEEE 802.15.4 permite o acesso ao canal físico sendo responsável pelas seguintes funções: gerar *beacons* (balizas) no coordenador, sincronização mediante *beacons* detectados, suportar associação à rede, segurança, uso do mecanismo CSMA/CA para acesso ao canal e gerenciamento de *slot* de tempo garantido (GTS). A MAC proporciona dois serviços, o serviço de dados que permite transmitir ou receber MPDUs (*MAC Protocol Data Units*) através da camada PHY e o serviço de gerenciamento que permite invocar as funções da camada MAC organizadas na entidade MLME (*MAC sublayer management entity*). Para realizar a tentativa de comunicação de uma mensagem, um nó transmissor executa o método CSMA/CA (DE GUGLIELMO; ANASTASI; SEGHETTI, 2014). Este método consiste nos seguintes passos: a) espera temporal durante uma quantidade aleatória de unidades de *backoff* ($rand\{2^{BE}-1\}$); b) executa CCA para determinar se canal está livre ou ocupado; c) caso livre, transmite os dados, d) caso ocupado, o número de *backoff* (NB) é incrementado e retornando ao passo (a), antes verificando se foi atingido um NB máximo que finaliza a tentativa de transmissão. O NB, o expoente de *backoff* (BE) e seus valores são definidos no IEEE 802.15.4.

A troca de dados de um dispositivo até o coordenador pode ser realizada utilizando ou não *beacons*. O processo realizado com ajuda de *beacon* é apresentado na Figura 2.4a, onde visualiza-se o momento que ocorre a sincronização e logo o envio de dados mediante *slotted*

CSMA/CA. Na Figura 2.4b ilustra-se o envio de dados ao coordenador sem ajuda de *beacon*. O dispositivo simplesmente transmite seus dados ao coordenador usando *unslotted* CSMA/CA.

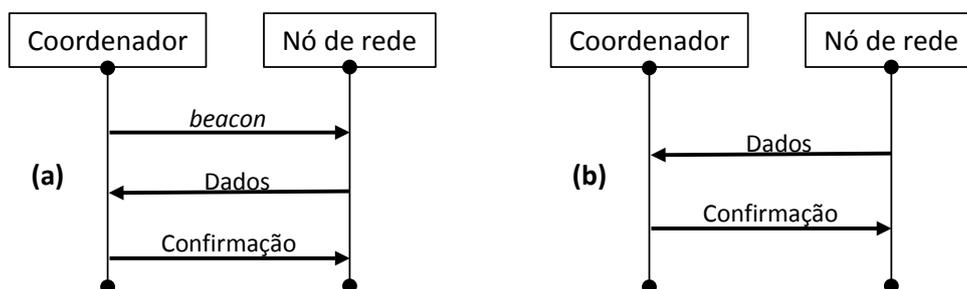


Figura 2.4: Transferência de dados até o coordenador: a) com e b) sem *beacon*.

O IEEE 802.15.4 tem apresentado várias atualizações desde 2003. Em 2006 é publicado o padrão (IEEE 802.15.4 STD, 2006) com algumas mudanças ou adições, por exemplo, o uso de mais canais e mais esquemas de modulação nas bandas de operação ou alterações nos parâmetros de contenção. A extensão do padrão denominada IEEE 802.15.4e é aprovada em 2012 para definir um método MAC de múltiplos saltos com capacidades de atingir as necessidades de aplicações industriais. Em (DE GUGLIELMO; ANASTASI; SEGHETTI, 2014) é apresentado um estudo que compara o padrão tradicional com o novo padrão. O IEEE 802.15.4e aproveita várias ideias dos modelos para aplicações industriais (WirelessHART) como: o acesso por *slots* (TDMA), *slots* dedicados ou compartilhados, a comunicação multicanal e o salto em canal (*channel hopping*). Assim, o padrão IEEE 802.15.4e define vários modos MAC para diversas aplicações. Um modo MAC mais importante é o *Time Slotted Channel Hopping* (TSCH) que permite aplicações como automação e controle de processos.

No TSCH, os dispositivos em uma rede *peer-to-peer* se sincronizam em um *superframe* periódico formado por vários *slots* de tempo. Os *superframes* se repetem ao longo do tempo, e cada *slot* de tempo é atribuído a um par de dispositivos (transmissor e receptor) para enviar DATA e ACK respectivamente. Caso seja necessária uma retransmissão, o transmissor adia esta para o próximo *slot* definido especificamente para o par de dispositivos. Os *slots* podem existir em diversos canais caracterizando a ideia de *channel hopping*. Um valor inteiro entre 0 e 15, chamado *ChannelOffset* define um dos 16 canais disponíveis. Um enlace entre um par de dispositivos em comunicação é definido como um *slot* de tempo sobre um determinado *offset* de canal (DE GUGLIELMO; ANASTASI; SEGHETTI, 2014). A frequência f usada por um par de dispositivos em um *slot* de tempo é calculada como:

$$f = F\{(ASN + ChannelOffset)\%N_{channels}\} \quad (2.1)$$

O parâmetro $N_{channels}$ é o número total de canais disponíveis para comunicação e o número de *slot* absoluto (ASN) é definido como o número de *slots* transcorridos desde o início da operação da rede. O ASN é incrementado globalmente na rede e é usado pelos nós como contador de *slots* de tempo (definindo assim, qual *slot* específico será escolhido e a frequência que será utilizada para transmitir e receber dados). A função $F\{\cdot\}$ pode ser implementada como uma simples tabela. A equação (2.1) implementa o mecanismo de *channel hopping* gerando diferentes frequências para o mesmo enlace em *slots* de tempo diferentes. A Figura 2.5 apresenta a atribuição dos diversos *slots* em uma rede simples com formato de árvore.

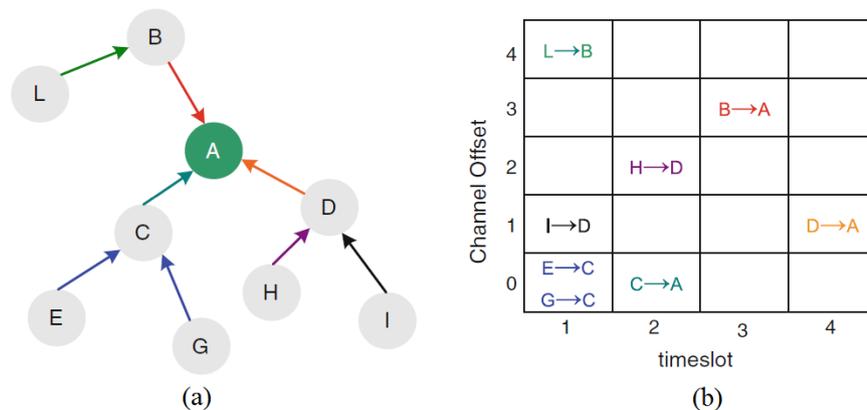


Figura 2.5: Exemplo de atribuição de slots no modo TSCH de IEEE 802.15.4e.

O *superframe* é formado por 4 *slots* e por 5 níveis de canal (*channel offset*). Um total de 8 comunicações são acomodadas, sendo todas de enlaces dedicados com exceção do *slot* definido por $ASM=1$ e $ChannelOffset=0$, onde enlaces compartilhados são permitidos. Nos enlaces compartilhados podem acontecer colisões, por isso, o padrão define um esquema de contenção para adiar a retransmissão com um algoritmo de *backoff*. No TSCH, a atribuição de *slots* acontece em múltiplos canais e complementa a funcionalidade definida parcialmente no padrão IEEE 802.15.4 para a topologia *peer-to-peer*. Entretanto, encontrar uma atribuição ótima de enlaces não é uma tarefa fácil, em especial, em redes com alta densidade de dispositivos ou em redes dinâmicas cuja topologia muda ao longo do tempo.

2.3 RÁDIO COGNITIVO

Em seções anteriores são discutidas características das RSSF e do padrão IEEE 802.15.4, porém, introduzir cognição nos dispositivos sensores pode melhorar o desempenho e uso eficiente dos canais RF. Portanto, nesta seção é apresentada uma descrição dos conceitos e

abordagens relacionados com CR. As tecnologias sem fio em todas suas perspectivas, tornam-se cada vez mais eficientes, e seus dispositivos passam a ser mais econômicos, procurando sempre diversos graus de cognição que permitam menor consumo de energia, maior taxa de transmissão de dados, maiores índices de qualidade de serviço (QoS), maior coexistência e uso ótimo do espectro de RF.

Segundo a FCC, CR é um sistema de comunicação sem fio que “sente” seu ambiente RF operacional e pode dinamicamente e automaticamente ajustar seus parâmetros para mudar a sua operação, maximizando a eficiência, mitigando a interferência, facilitando a interoperabilidade e abrindo a possibilidade de sistemas secundários (YUCEK; ARSLAN, 2009). Segundo (HOSSAIN; NIYATO; KIM, 2015), o CR é definido como um sistema “inteligente” de comunicação sem fio que é consciente de seu ambiente. Nele um transmissor CR aprende a partir de seu ambiente e adapta os seus estados internos às variações de RF ajustando seus parâmetros de transmissão em tempo real. Os rádios cognitivos fazem uso dos conceitos de cognição dos sistemas artificiais para otimizar a utilização do espectro de RF e organizar serviços e aplicações sem fio crescentes de forma flexível.

Formalmente, o CR é definido como uma interface de rádio que pode mudar seus parâmetros de comunicação (potência, frequência, esquema de modulação, etc.) para se adaptar às variações do usuário ou do ambiente de RF ao seu redor. Deste modo, podem ser identificadas duas capacidades básicas de um sistema CR: cognição e reconfiguração (AKYILDIZ *et al.*, 2008). A Figura 2.6 apresenta os componentes essenciais de CR e exemplifica os estímulos relacionados.

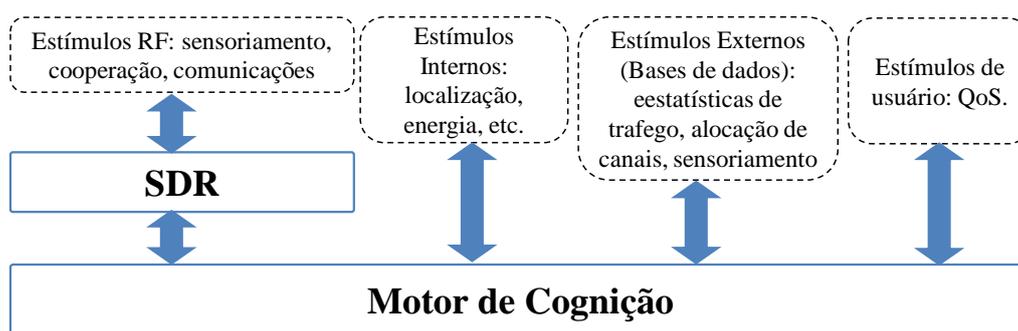


Figura 2.6: Elementos envolvidos em CR.

O motor de cognição identifica oportunidades de comunicação em canais subutilizados, fornece mecanismos adequados de aproveitamento destas faixas pelos SUs e impede a interferência com as comunicações dos PUs. A cognição permite que os SUs sejam conscientes da forma de transmitir, do protocolo de comunicação, da informação geográfica, dos recursos

disponíveis e dos requerimentos de usuário. A cognição está associada com a disciplina de aprendizagem de máquina, já que os rádios utilizam um ou vários estímulos (Figura 2.6) para aprender e tomar decisões que conduzam a melhorar o desempenho. No capítulo 3 são descritos alguns dos principais métodos usados pelas RSSF como mecanismos de aprendizagem, além disso, no capítulo 4 é definida a aprendizagem usada pela metodologia proposta.

Entretanto, a reconfiguração serve para transmitir/receber em uma ampla variedade de frequências, potências e técnicas de acesso. O elemento de reconfiguração é fundamental para executar cognição nos rádios e é comumente denominado rádio definido por software (SDR – *Software-defined Radio*). Segundo a FCC, o SDR é um transceptor de RF no qual os parâmetros de comunicação podem ser alterados via software sem precisar mudanças no hardware. Em (REED, 2002) são abordados detalhadamente os conceitos de SDR. Alguns exemplos de plataformas SDR desenvolvidas para pesquisa são: o projeto CORTEKS da universidade de Virginia, HackRF One, KUAR da universidade do Kansas (MINDEN *et al.*, 2007) e *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) da ETTUS.

O rádio cognitivo é importante no modelo de alocação dinâmica porque habilita usuários secundários a compartilharem o espectro de RF com PUs de forma oportunista e sem afetar o desempenho das comunicações destes últimos. O PU é um usuário que tem direito prioritário de empregar um canal específico em uma determinada região.

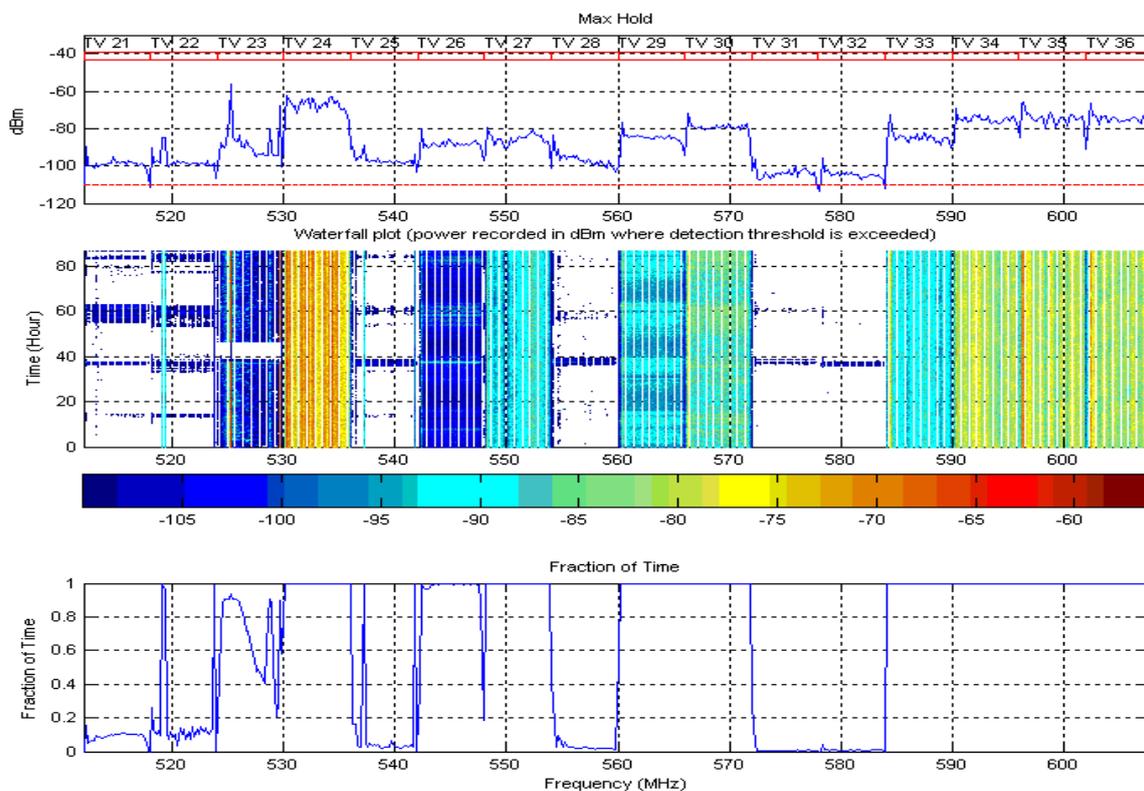


Figura 2.7: Medição de ocupação na banda de 512-608MHz (SSC, 2010).

O SU é um par transmissor e receptor que não tem direito prioritário de uso do canal, mas quando inexistem as comunicações primárias, pode de forma oportunista usufruir do canal, sem afetar o PU. Uma oportunidade espectral ou espaço branco é um espaço em frequência, local e tempo, no qual o PU não transmite informação, liberando o canal temporariamente. Os espaços brancos dependem do PU possuidor do canal, assim, estes aparecem com certa aleatoriedade e apresentam longitudes temporais diversas relacionadas à natureza do tráfego do PU e aos fatores de propagação de ondas (por ex., sombreamento). A Figura 2.7 apresenta um exemplo de diversos espaços brancos detectados durante a medição da banda de TV em uma cidade dos Estados Unidos. Observa-se que em algumas faixas os espaços brancos abrangem várias horas, porém, em outras bandas primárias as durações dos espaços brancos são muito menores, da ordem de minutos. Em ambos casos, uma RSSF pode de forma oportunista aproveitar esses espaços brancos adaptando sua operação às mudanças da banda de 512-608MHz como será analisado posteriormente neste trabalho.

2.3.1 Abordagens Principais

A seguir são detalhas as abordagens mais relevantes de rádio cognitivo propostas por pesquisadores e instituições para solucionar o uso ineficiente do espectro de RF. A ideia de CR foi inicialmente proposta em 1999 por Joseph Mitola, onde é descrito como a abordagem CR poderia vir a aumentar a flexibilidade dos serviços sem fio através de uma nova linguagem para representação do conhecimento de rádio (MITOLA; MAGUIRE, 1999).

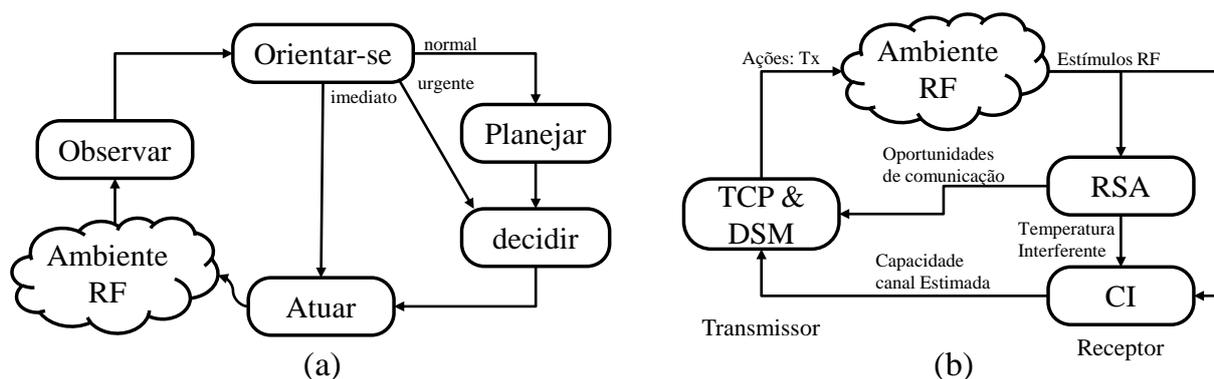


Figura 2.8: Ciclo Cognitivo desde a visão de: a) Mitola e b) Haykin.

A característica principal deste estudo é o ciclo de computação cognitiva (Figura 2.8a) que define os procedimentos a serem realizados por um software de controle de rádio: observar o ambiente de RF, reorientar-se pelo estabelecimento de prioridades (normal, urgente ou

imediate), criar planos de operação, decidir ou alocar recursos e executar ações. O conhecimento aprendido de observar, planejar e decidir serve para atuar de forma mais eficiente em futuras comunicações.

Segundo (HAYKIN, 2005) as tarefas fundamentais de CR (Figura 2.8b) são: *radio scenario analysis* (RSA); *channel identification* (CI) e *dynamic spectrum management* (DSM) e controle da potência de transmissão. A RSA abrange a estimação da temperatura da interferência do ambiente de RF, a detecção de espaços brancos e a modelagem preditiva do ambiente. O CI é importante para melhorar a utilização do espectro de RF e detecção do sinal portador de informação no usuário receptor. Já o DSM e o controle da potência de transmissão servem para que o SU transmissor decida e atue em resposta aos estímulos de RF coletados pelo SU receptor (oportunidades de comunicação, estatísticas de ruído e tráfego). Evidentemente, deve existir um canal de realimentação para que transmissor (TX) e receptor (RX) trabalhem coerentemente. As contribuições são de fato complementares, Mitola atém-se ao software computacional de CR enquanto Haykin aborda assuntos de processamento de sinais e teoria de comunicações.

Vários padrões têm sido desenvolvidos para a definição e implementação do conceito CR, porém, no capítulo próximo são abordados trabalhos relacionados voltados ao DSA. Na continuação são citados alguns dos mais importantes.

A abordagem (XG, 2005) da DARPA é uma arquitetura que propõe um sistema de rádio de próxima geração (XG – *neXt Generation*) com um método de acesso ao meio (X-MAC) que aproveita os espaços brancos existentes no espectro de RF. No XG é proposto um modelo orientado a objetos de um sistema de rádio que abrange: o rádio, o software dele e as interações com o ambiente. O objetivo desta representação é explicar o hardware e as primitivas de um *host* de rádio que habilitam o uso oportunista do espectro.

O padrão 802.22 (IEEE 802.22 STD, 2011) especifica as camadas PHY e MAC para uma rede sem fio cognitiva de área regional (*cognitive WRAN*) que utiliza políticas e procedimentos para operar nos espaços brancos da banda de televisão (TVWS – *TV White Spaces*). Em (CORDEIRO *et al.*, 2005) é realizado um resumo das principais características do padrão. O objetivo do padrão é fornecer acesso banda larga em áreas rurais e remotas. Os canais usados operam na faixa 54-862MHz. A norma determina uma topologia ponto-multiponto composta de uma estação base (BS – *Base Station*) que gerencia uma célula formada de múltiplos equipamentos de cliente. A BS controla o acesso ao meio da sua célula transmitindo na direção dos clientes. Na WRAN cognitiva é seguido um estrito esquema mestre/escravo, onde a BS fornece a permissão para transmitir e controlar todos os parâmetros do cliente.

O protocolo 802.11af (IEEE 802.11AF STD, 2013) permite que uma rede sem fio de área local (WLAN – *Wireless Local Area Network*) possa operar os TVWS. Com esta tecnologia é possível atingir distâncias maiores em comparação com os sistemas WLAN anteriores que operam na banda ISM. Isto porque as frequências abaixo de 1GHz apresentam uma perda por percurso menor e são menos prejudicadas por obstruções de objetos (FLORES *et al.*, 2013). O 802.11af aplica conceitos de CR para utilizar porções não utilizadas nos canais de TV e realizar medições a fim de limitar a interferência gerada aos PUs. Em (FLORES *et al.*, 2013) é apresentado o padrão, a arquitetura de rede envolvida, a camada física e outros aspectos do padrão. Outra iniciativa de padronização é o 1900.1 (IEEE 1900.1 STD, 2008) um padrão que fornece definições e explicações dos conceitos nas áreas de gerenciamento do espectro, CR, rádio adaptativo, SDR e tecnologias relacionadas.

Por último, o CR pode suportar uma ampla variedade de aplicações emergentes. Em (WANG; GHOSH; CHALLAPALI, 2011) é realizado um estudo de aplicações potenciais que podem se beneficiar dos conceitos CR identificando quatro áreas: redes *smart grid*, redes de segurança pública, redes celulares e RSSF.

2.3.2 Funções Cognitivas

Segundo (AKYILDIZ *et al.*, 2006), quatro funções fundamentais no rádio cognitivo permitem que SUs de uma rede sem fio cognitiva possam cooperar, coexistir com redes primárias (evitando interferências), se conscientizar dos requerimentos de QoS, conhecer o ambiente de RF e se comunicar de forma contínua. Estas funcionalidades são: sensoriamento, compartilhamento, decisão e mobilidade. Porém, só as duas primeiras são explicadas na sequência pela sua relação direta com a metodologia proposta nesta tese. Juntas formam o gerenciamento dinâmico do espectro e sua relação com as camadas do modelo de referência OSI (*Open System Interconnection*) é mostrada na Figura 2.9. No sensoriamento espectral os SUs devem monitorar o espectro de RF para obter a informação do uso das diversas faixas e detectar espaços brancos potenciais para a comunicação. Existem múltiplos usuários cognitivos tentando acessar os canais, portanto, em uma rede cognitiva o compartilhamento deve permitir um acesso coordenado para prevenir que vários usuários se sobreponham em porções do espectro. Na rede CR os SUs devem compartilhar as oportunidades de comunicação, assim, a coordenação deve evitar colisões entre os SUs. O compartilhamento é abordado na camada de enlace MAC e depende fortemente das informações fornecidas pela função de sensoriamento.

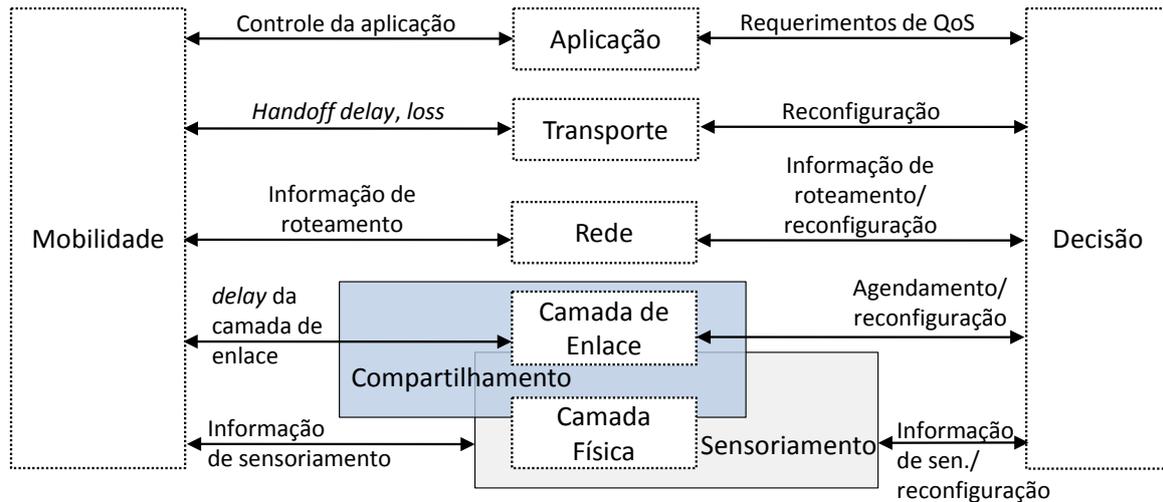


Figura 2.9: Funções cognitivas (AKYILDIZ *et al.*, 2006).

A função de decisão é um conjunto de ações que permitem a troca de dados entre um TX e RX para alocação de canais. Neste processo, informações como o espectro disponível e os requerimentos de usuário são considerados.

O protocolo MAC é essencial em CR porque deve responder: quando e como analisar o espectro de RF (sensoriamento), quando e como usar o espectro de RF disponível (acesso) e como coexistir com outros usuários cognitivos (compartilhamento). Alguns assuntos em CR que devem ser abordados pelo método MAC cognitivo são: troca de dados de controle (sinalização), políticas de sensoriamento, alocação do espectro, acesso e compartilhamento dos canais, mitigação da interferência, problema do usuário oculto multicanal, difusão de informação, economia de energia e controle de potência.

Em (CORMIO; CHOWDHURY, 2009; DOMENICO; STRINATI; BENEDETTO, 2012; HOSSAIN; NIYATO; KIM, 2015; VAMSI KRISHNA; DAS, 2009) são revisados os conceitos dos métodos MAC cognitivos mais importantes. A complexidade do método de acesso cognitivo ao meio depende dos seguintes fatores: o comportamento da rede primária, a topologia/tamanho da rede secundária, o tamanho do espectro de RF (canais primários) em análise, a complexidade do aparelho cognitivo (*N-radio*), as políticas de sensoriamento espectral, requerimentos de usuário, requerimentos de consumo de energia e tipo de sinalização na rede secundária. Também o grau de cooperação por parte da rede primária pode ajudar na simplificação do método MAC (*spectrum pooling*). Outro aspecto a considerar no método MAC cognitivo é o tipo de acesso ao meio (por ex., CSMA).

2.3.3 Sensoriamento e Detecção por Energia

Sensoriamento espectral é uma das funcionalidades mais importantes em um CR, porque permite obter consciência da ocupação dos canais e da existência de usuários primários em um determinado ambiente. Sensoriamento é monitorar o espectro de RF, capturar a informação do uso dos diversos canais de interesse e detectar espaços brancos para se comunicar. Tradicionalmente, sensoriamento é medir a energia RF nos canais de operação. No entanto, quando refere-se ao conceito CR, o sensoriamento vai mais além, implicando em medir as características de uso do espectro de RF em várias dimensões: frequência, tempo, espaço, código ou ângulo. Os principais métodos de sensoriamento do espectro, o sensoriamento cooperativo e algumas outras questões importantes da funcionalidade de sensoriamento são apresentados em (YUCEK; ARSLAN, 2009).

Deve-se ter uma coerente configuração dos parâmetros duração e frequência do sensoriamento nos sistemas *single-radio* para conseguir detectar o PU. A Figura 2.10 apresenta como o tempo é dividido entre as tarefas de sensoriamento (*monitoring*), transmissão e busca que um dispositivo cognitivo típico realiza. A escolha do tempo de sensoriamento e do tempo de transmissão são dois parâmetros definidos pela camada MAC. Altos tempos de monitoramento ($T_{monitor}$) asseguram maior precisão na detecção do PU, mas, isto implica um tempo curto de transmissão de informação (T_{data}).

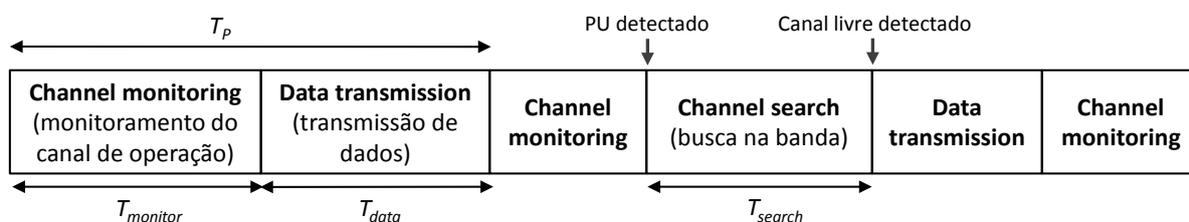


Figura 2.10: Tarefas típicas de um SU *single-radio* (GHASEMI; SOUSA, 2007).

Outro aspecto importante de sensoriamento é a cooperação dos SUs, assunto abordado pela metodologia proposta, que surge como uma forma de solucionar a incerteza no sensoriamento devido a ruídos, desvanecimento ou sombreamento. Esta fornece um ganho de diversidade no sensoriamento que aumenta a informação útil levando a que os SUs tomem decisões mais acertadas. A cooperação dos SUs aumenta a probabilidade de detectar o PU e diminui a probabilidade de falso alarme. A cooperação implica que os SUs troquem informação de sensoriamento entre eles e utilizem uma técnica de fusão de dados para decidir se o canal está livre ou ocupado. Mediante sensoriamento cooperativo, o desempenho da detecção do PU

é aumentado, mas, um aumento na troca de informação de sinalização na rede cognitiva é experimentado.

O algoritmo de sensoriamento espectral utilizado pelos dispositivos definidos na MSDAC é o método ED (GANESAN; YE LI, 2005; PEH; LIANG, 2007). A detecção por energia é o método mais utilizado para monitoramento dos canais. As justificativas do uso são: o ED é um algoritmo simples, genérico, não necessita informação a priori do sinal primário e está disponível em uma ampla variedade de dispositivos. Entretanto, a principal desvantagem é seu vínculo direto com a relação sinal-ruído (SNR), já que baixo desempenho na detecção é obtido quando a SNR é baixa. No problema de detecção por energia, deseja-se analisar um sinal de entrada no receptor que tem uma determinada taxa de amostragem e está associado com um canal de operação (frequência e largura de banda). Quando um PU se encontra em transmissão, o sinal recebido pelo usuário secundário tem a forma definida na equação (2.2).

$$y(t) = w(t) + h_0s(t) \quad (2.2)$$

A função $w(t)$ representa ruído branco gaussiano (AGWN – *Additive Gaussian White Noise*). A função $s(t)$ é o sinal transmitido pelo PU e o parâmetro h_0 é o ganho do canal (i.e., as perdas por propagação). Por outro lado, o sinal recebido pelo SU é só ruído em ausência de sinal do PU, como é definido na equação (2.3).

$$y(t) = w(t) \quad (2.3)$$

Deste modo, segundo o estado do canal primário (livre ou ocupado), o sinal recebido pelo SU pode ser modelado como uma hipótese binária (2.4). Onde, H_0 é a hipótese de canal livre e H_1 é a hipótese que o canal esteja ocupado.

$$y(t) = \begin{cases} w(t), & H_0 \\ w(t) + h_0s(t), & H_1 \end{cases} \quad (2.4)$$

Segundo (ATAPATTU; TELLAMBURA; JIANG, 2014), o método ED mede a energia associada com o sinal recebido durante um tempo e largura de banda específicos. Esta medida é então comparada com um limiar apropriado para decidir a presença ou ausência do sinal primário. A Figura 2.11 apresenta uma implementação convencional do ED.



Figura 2.11: Detector por energia (ATAPATTU; TELLAMBURA; JIANG, 2014).

Um detector ED é formado por: um filtro passa banda para limitar o ruído e interferências de canais adjacentes, um conversor ADC para converter o sinal analógico em um sinal discreto com certa taxa de amostragem, e um bloco de função quadrática e outro de somatória. A saída final é chamada estatística de teste ou métrica de decisão (M_{ED}). A métrica de decisão do método ED é determinada usando equação (2.5).

$$M_{ED} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y(n)|^2 \quad (2.5)$$

O parâmetro N denota o número total de amostras relacionadas com o conversor ADC e sua frequência de amostragem f_s . A decisão final a respeito da ocupação do canal pode ser obtida comparando a métrica com um limiar fixo (λ_{ED}). Caso $M_{ED} > \lambda_{ED}$, então, o usuário primário está em estado de transmissão (canal ocupado), porém, o usuário primário está inativo (canal livre) no caso que $M_{ED} \leq \lambda_{ED}$.

O desempenho do ED pode ser avaliado considerando a probabilidade de detecção (P_D) e a probabilidade de falso alarme (P_F). P_D definida na equação (2.6) é a probabilidade de detectar o sinal primário corretamente. P_F é a probabilidade de decidir que o canal está ocupado quando na realidade está livre (2.7). Adicionalmente, a probabilidade de não detecção (P_M) pode-se definir a partir de P_D como $P_M = 1 - P_D$.

$$P_D = Pr\{M_{ED} > \lambda_{ED} | H_1\} \quad (2.6)$$

$$P_F = Pr\{M_{ED} > \lambda_{ED} | H_0\} \quad (2.7)$$

A estreita relação de λ_{ED} com as probabilidades de falso alarme e de detecção torna fundamental a escolha de um limiar λ_{ED} adequado. Especificamente, um limiar muito baixo do nível do ruído pode causar um aumento significativo de falsos alarmes. Isto tem impacto direto no desempenho do SU pois, valores altos de P_F indicam uma exploração pobre dos espaços brancos e valores baixos significam alta exploração dos espaços brancos. Entretanto, um limiar bem acima do nível do ruído pode ocasionar baixa detecção de sinais primários, deste modo, aumentado o risco de interferir o PU. Alta P_D assegura que o PU seja detectado com maior confiabilidade e assim sua comunicação é respeitada. Em suma, o limiar de ED se relaciona com o nível do ruído e sua escolha é importante para permitir encontrar um equilíbrio (*tradeoff*) entre P_D e P_F , procurando alta P_D e baixa P_F . Este assunto tem sido estudado em trabalhos como (GHASEMI; SOUSA, 2007).

2.4 RESUMO

Este capítulo apresentou assuntos fundamentais que são utilizados em capítulos posteriores. Primeiramente, são analisados os conceitos e os tipos de RSSF mais amplamente utilizadas. São discutidas as aplicações RSSF relacionadas ao trabalho. Além disso, assuntos do padrão IEEE 802.15.4 são considerados no desenvolvimento da metodologia MSDAC, por isso, um estudo geral das camadas PHY e MAC deste padrão é realizado. Em seguida, dotar os sensores com mecanismos de cognição é uma abordagem emergente, portanto, as características de cognição dos rádios são discutidas. Ênfase nas funções de sensoriamento e compartilhamento associadas à metodologia proposta é realizado. Finalmente, o algoritmo ED que permite a cada nó sensor no contexto MSDAC realizar sensoriamento espectral é analisado.

3 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE

Esta tese aborda uma metodologia de acesso dinâmico e sensoriamento de canais em RSSF distribuídas. Os trabalhos relacionados com este assunto são apresentados neste capítulo. Primeiro, são definidos alguns critérios usados para análise da bibliografia pesquisada. Um estudo dos esquemas de acesso utilizados nas RSSF atuais é realizado. Em seguida, uma recopilação de métodos de acesso dinâmico aos canais no contexto geral de CR é apresentada. Na sequência, os métodos de acesso dinâmico aos canais propostos para RSSF são discutidos. Finalmente, os métodos são comparados e seus desafios discutidos.

3.1 CRITÉRIOS DE ANÁLISE

Nesta seção são descritos os principais critérios utilizados para analisar as abordagens encontradas na literatura (Figura 3.1). Estes se relacionam com a subcamada MAC, alguns deles determinam o comportamento da rede cognitiva (cooperativo ou competitivo) e outros têm implicações diretas na implementação nas RSSF.

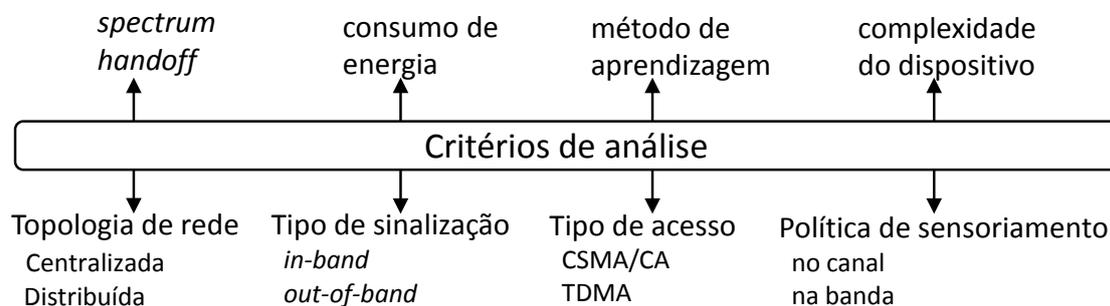


Figura 3.1: Principais critérios de análise dos métodos.

A *topologia de rede*, define a forma como os nós da rede decidem as ações a serem realizadas para se comunicar e se coordenar. A topologia das redes RSSF cognitivas podem ser classificadas como centralizada ou distribuída (AHMAD et al., 2015). No esquema centralizado o compartilhamento espectral depende estritamente de um dispositivo central que identifica e aloca organizadamente os recursos de RF. Na topologia distribuída, os acessos podem depender da troca de informações entre grupos de nós ou das decisões individuais, tornando o compartilhamento cooperativo (e.g., redes em *clusters*) ou competitivo, respectivamente. O conceito de topologia neste trabalho se refere à forma como os nós da rede se coordenam para utilizar os recursos de RF e não à disposição física deles.

O tipo de sinalização, define a forma como as mensagens de sinalização são trocadas pelos nós para coordenação da rede sem fio. Os dois tipos de sinalização são definidos como *in-band* e *out-of-band* (DOMENICO; STRINATI; BENEDETTO, 2012). No primeiro, as mensagens de controle são trocadas dentro dos mesmos canais de transmissão de dados. Na sinalização *out-of-band* é utilizado um canal comum de controle (CCC – *Common Control Channel*) para troca de informações de controle, que pode ser de natureza licenciada ou ISM.

O tipo de acesso, define o procedimento de acesso a um canal específico para trocar dados em um entorno de múltiplos dispositivos. O acesso pode ser de vários tipos: aleatório (CSMA/CA), *slots* de tempo (TDMA), por divisão frequência (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*) ou híbrido.

A política de sensoriamento, define como e quando um nó com cognição deve realizar sensoriamento espectral. O tipo de algoritmo de sensoriamento usado (e.g., ED) é só uma parte da política de sensoriamento. A política de sensoriamento também se relaciona com a topologia de rede. i.e., os dispositivos podem realizar um sensoriamento de forma individual ou de forma cooperativa. O sensoriamento pode ter duas finalidades. A primeira é o monitoramento no canal de operação que detecta se existe uma comunicação no canal para evitar interferir com outros dispositivos (e.g., CCA). A segunda é o sensoriamento da banda que permite detectar o estado de múltiplos canais e seu objetivo é a busca de um novo canal de operação.

O método de aprendizagem, define o processo usado para criar conhecimento a partir de certas experiências, e.g., taxa de bits errados (BER), DR ou LQI. O conhecimento acumulado é utilizado para tomar decisões que conduzam a melhorar o desempenho dos nós. Também está relacionado com a topologia porque pode ser de tipo individual ou coletivo.

A transferência de canal, ou *spectrum handoff*, define os processos que devem realizar TX e RX para trocar o canal de operação (KUMAR; PRAKASH; TRIPATHI, 2016). Uma troca de sinalização na rede permite coordenar os dispositivos envolvidos neste processo. Com isso é possível trocar dinamicamente o canal de operação (salto de canal).

A política de consumo de energia, são procedimentos realizados pelos dispositivos da rede individualmente ou coletivamente para reduzir o consumo de energia, i.e., ativação do modo de baixo consumo de energia ou dispositivos realizando uma tarefa conjunta visando um menor consumo de energia (por ex., roteamento de mensagens).

A complexidade do dispositivo, define os recursos de hardware e software disponíveis em um dispositivo que permitem realizar várias tarefas: transmissão ou recepção dos sinais sem fio em uma ampla variedade de canais; utilização de diversas técnicas de modulação e espalhamento; processamento de dados; N-rádio; entre outras funções.

3.2 ACESSO AOS CANAIS NAS RSSF ATUAIS

Nesta seção é apresentado um panorama geral de como as RSSF atuais funcionam considerando os critérios de análise mencionados anteriormente. As diversas abordagens de RSSF se fundamentam no IEEE 802.15.4. Contudo, duas categorias de RSSF podem ser identificadas considerando o tipo de especificação MAC que utilizam acesso aleatório (CSMA/CA) e acesso por *slots* (TSCH). A primeira é fundamentada no padrão IEEE 802.15.4, por exemplo, (ZIGBEE, 2008). Estas abordagens se caracterizam por ter um acesso aleatório ao canal utilizando o esquema CSMA/CA do IEEE 802.15.4. As políticas de sensoriamento espectral são limitadas sendo sua única finalidade, a seleção de um canal fixo de operação durante a inicialização da rede. Não são realizados saltos de canal nem são considerados aspectos do dinamismo dos recursos de RF. O esquema CCA permite monitorar o canal de operação para detectar dispositivos em estado TX, e isso implica uma contenção na transmissão que visa evitar interferir com outros dispositivos em comunicação. Este mecanismo pode ser usado para proteger as comunicações de PUs em um possível cenário DSA.

O acesso por *time slots* é a segunda categoria que as RSSF utilizam. Neste caso, os nós sensores acessam de forma sincronizada aos canais. A rede é centralizada e os recursos de RF são atribuídos a todos os dispositivos pelo coordenador durante a inicialização da rede. Um recurso de RF é definido como um canal e período de tempo específicos para se comunicar. Os dispositivos experimentam *channel hopping* e o *handoff* depende da equação (2.1), porém, não existe um método de adaptação às mudanças do ambiente de RF, por isso, os saltos de canal são ditos “cegos”. As principais tecnologias que usam este modelo são: WirelessHART, ISA 100.11a e IEEE 802.15.4e. Características comuns dos métodos de acesso das RSSF são: esquema *in-band* para comandos de controle e metodologias para reduzir o consumo e a complexidade dos nós sensores. Também, utilizam rígidos esquemas centralizados com um dispositivo central denominado controlador que gerencia a maioria das atividades na rede. O acesso dinâmico aos canais para evitar interferências não é contemplado.

3.3 ACESSO DINÂMICO AOS CANAIS EM CR

Nesta seção são apresentados métodos de acesso dinâmico aos canais propostos no contexto do CR. Enfoque em certas características é realizado visando aplicabilidade em RSSF. Esta seção é dividida em esquemas de sinalização *in-band* e *out-of-band*.

3.3.1 Sinalização *out-of-band*

Esquemas centralizados de acesso dinâmico aos canais têm sido propostos ao longo do tempo. Um dispositivo central é responsável por ter informações atualizadas dos espaços brancos e por controlar os acessos dos SUs, mediante a utilização de um CCC que permite trocar mensagens de controle para coordenar os dispositivos da rede. O DSAP (BRIK *et al.*, 2005) é um esquema centralizado de alocação do espectro na banda não licenciada (ISM). O servidor DSAP (elemento central) armazena informações periodicamente dos clientes e suas condições de canal em um mapa de canais. Assim, o servidor determina uma política ótima de alocação para atribuir os canais, controlar o desempenho e comutar dinamicamente o canal para evitar possíveis interferências. O método divide os canais entre clientes, entretanto, não específica como as informações de sensoriamento são adquiridas pelos clientes. O cliente precisa de um rádio adicional para comunicação exclusiva com o servidor (2-rádio) e aspectos de consumo de energia não são abordados. Outra abordagem que usa esquema centralizado com CCC é DIMSUMnet (BUDDHIKOT *et al.*, 2005).

Na sequência do texto são apresentados enfoques que abordam uma topologia distribuída que utiliza um CCC para trocas de mensagens de controle e coordenação entre dispositivos. O CogMesh (CHEN, T. *et al.*, 2007) é uma rede CR dividida em *clusters* que apresenta um acesso ao espectro controlado por um líder (*head*) de *cluster* usando um CCC mestre. Considerado híbrido, CogMesh usa *time slots* para a transmissão de dados e acesso aleatório para as mensagens de controle. O *superframe* (Figura 3.2) divide o tempo em: *beacon* para sincronização e controle; *slots* de difusão na vizinhança (NBP) para trocar informações entre dispositivos (identidade e lista de canais); período de transmissão de dados usando TDMA em múltiplos canais; período de silêncio (QP) para sensoriamento espectral; e um período de acesso aleatório (RAP) para troca de mensagens de controle dentro e fora do *cluster*. Além de não abordar assuntos de consumo de energia, uma alta dependência de sincronismo e do canal mestre são algumas desvantagens de CogMesh.

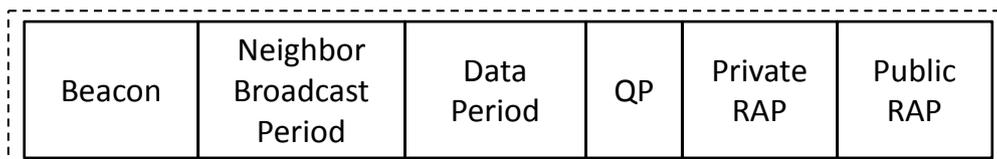


Figura 3.2: Superframe de CogMesh (CHEN, T. *et al.*, 2007).

O sistema KNOWS (YUAN *et al.*, 2007) habilita dispositivos para se auto-organizar sem precisar de um controle central visando maximizar a utilização do espectro. Usa-se um

algoritmo colaborativo de sensoriamento para detectar os PUs em faixas de TV. Os espaços brancos detectados pelos SUs são usados para trocas de dados e as mensagens de controle trafegam sobre um CCC na faixa ISM. Um rádio é usado exclusivamente para manter a sinalização (2-rádio) e utiliza CSMA/CA para acessar ao meio.

Em (JIA; ZHANG; SHEN, 2008) é proposto o HC-MAC, um método de acesso que considera as restrições hardware como critério de parada do sensoriamento. Um simples rádio e um CCC para trocar mensagens de controle e sensoriamento são utilizados. A modulação mediante multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM) é usada. Duas restrições nos dispositivos são consideradas: o SU só pode realizar sensoriamento em uma pequena faixa (restrição por sensoriamento) e o SU só pode transmitir com uma máxima quantidade de subportadoras OFDM (restrição por transmissão). As três fases do protocolo HC-MAC são: contenção, sensoriamento e transmissão. Na contenção os SUs tentam adquirir o direito para transmitir (disputam). No sensoriamento, um SU (TX-RX) ganhador escuta os canais com certa política de sensoriamento e decide o número de canais necessários para transmitir, enquanto, os demais SUs da rede esperam um tempo aleatório para tentar adquirir de novo os canais. Na transmissão, o TX ajusta seus parâmetros para acessar aos canais simultaneamente usando OFDM. O HC-MAC usa uma política de sensoriamento para reduzir a quantidade de canais a monitorar. Isto é benéfico em termos de consumo de energia, mas, os recursos de RF restantes não são aproveitados por outros SUs. A fase de contenção e a tecnologia OFDM podem ser adequadas em certas aplicações, entretanto, estas não são adequadas para implementação nos sensores por sua complexidade e consumo de energia.

O DSA-Driven MAC (ZOU; CHIGAN, 2009) é uma metodologia de acesso dinâmico dirigida por MAC que utiliza um protocolo híbrido, onde as transmissões de dados são feitas em *slots* de tempo predeterminados e a sinalizações são aleatórias sobre um CCC. A rede é dividida em *clusters* gerenciados por um nó central (*head*). O acesso dinâmico no *cluster* depende de um modelo repetido de jogos com N jogadores cooperando. O cabeçalho virtual (VH) é um *token* único que pertence ao nó *head* e leva informação atualizada da lista de jogadores. Este é propagado entre os jogadores para indicar o início e o fim de uma rodada de jogo de duração T . As rodadas são executadas indefinidamente, e o objetivo do jogo é encontrar uma solução de otimização global, em particular, cada jogador i (SU) continuamente atualiza sua estratégia (S_i) para tentar maximizar sua função de utilidade (U_i) até que o jogo converge ao equilíbrio de Nash (estado onde a mudança de qualquer S_i não gera ganhos significativos nos jogadores). A função de utilidade é atualizada considerando as bonificações resultantes de uma determinada estratégia (recompensas por acesso). No processo anterior, colisões podem acontecer. Um

mecanismo de negociação usando CCC permite aos dispositivos utilizar os recursos de RF. Para isto os dispositivos colocam sua intenção de comunicação e sua informação de sensoriamento no *token* resposta para o nó VH. Outro *token* denominado NG é usado pelo *head* para atribuir os recursos de RF a um dispositivo transmissor. Um mecanismo com “tons de ocupados” que visa evitar colisões entre *clusters* vizinhos é definido, i.e., um dispositivo em estado de recepção envia regularmente um tom para indicar a outros *clusters* que o canal está ocupado. Por outro lado, as políticas de sensoriamento não são detalhadas e não há um sensoriamento antes da transmissão implicando interferência aos PUs. O DSA-Driven MAC é altamente dependente da sinalização e não economiza energia, fatores que podem ser desfavoráveis na hora de implementação em dispositivos de uma RSSF.

Outras abordagens que usam um esquema distribuído junto com sinalização dependente de CCC são: DOSS (MA; HAN; SHEN, 2005) um esquema acesso dinâmico ao espectro complexo que precisa de três rádios (dados, controle e tons de ocupado) e OS-MAC que permite acessos aleatórios sobre janelas de tempo sincronizadas utilizando um nó *head* para controlar os SUs do *cluster* e para cooperar com nós *heads* de *clusters* vizinhos (HAMDAOUI; SHIN, 2008). Finalmente é importante mencionar o conceito de *spectrum pooling* (SP) proposto em (WEISS; JONDRAL, 2004). Nele uma rede primária permite coordenadamente que uma rede secundária aproveite seus canais. Neste caso a rede secundária utiliza o canal CCC próprio da rede primária para acessar dinamicamente aos canais (PAWELCZAK *et al.*, 2005).

3.3.2 Sinalização *in-band*

Na sequência são analisadas abordagens distribuídas que utilizam sinalização *in-band*, i.e., as mensagens de controle trafegam nos mesmos canais de dados. Estas mensagens pulam através dos canais primários sem precisar de um CCC exclusivo.

O C-MAC (CORDEIRO; CHALLAPALI, 2007) é um método distribuído que utiliza o conceito de canal de encontro (RC) para coordenar o acesso dinâmico aos canais primários. A disposição dos *superframes* em três canais é apresentada na Figura 3.3. Os *superframes* estão defasados para permitir pular entre canais de forma fácil e aproveitar os WS de vários canais. Esta defasagem é sincronizada com referência ao canal RC. O acesso em cada canal é realizado mediante *time slots*. O canal RC deve ser visitado regularmente pelos dispositivos para sincronização. Um *superframe* é composto de um período de *beacon* (BP) usado pelos SU para

reservar o espectro e um período de transferência de dados (DTP) para troca de informação, além disso, na metade do DTP é usado um período de silêncio (QP) para sensoriamento do PU.

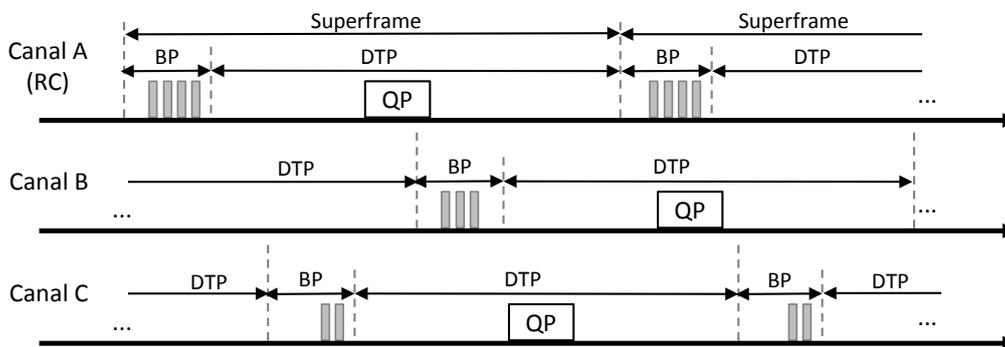


Figura 3.3: *Superframe C-MAC* (CORDEIRO; CHALLAPALI, 2007).

Para reservar um *slot* no DTP, um SU deve ligar um *beacon* no BP como é mostrado na Figura 3.3. Os dois *beacons* iniciais são reservados para ingresso de nós à rede e um bit particular nos *beacons* serve para identificar o canal RC. O alto sincronismo e dependência de *beacons* são características desfavoráveis de C-MAC. Além de não abordar o consumo de energia, a necessidade de detectar vários *beacons* durante BP para coordenação dos acessos pode implicar consumo importante em um possível cenário de RSSF.

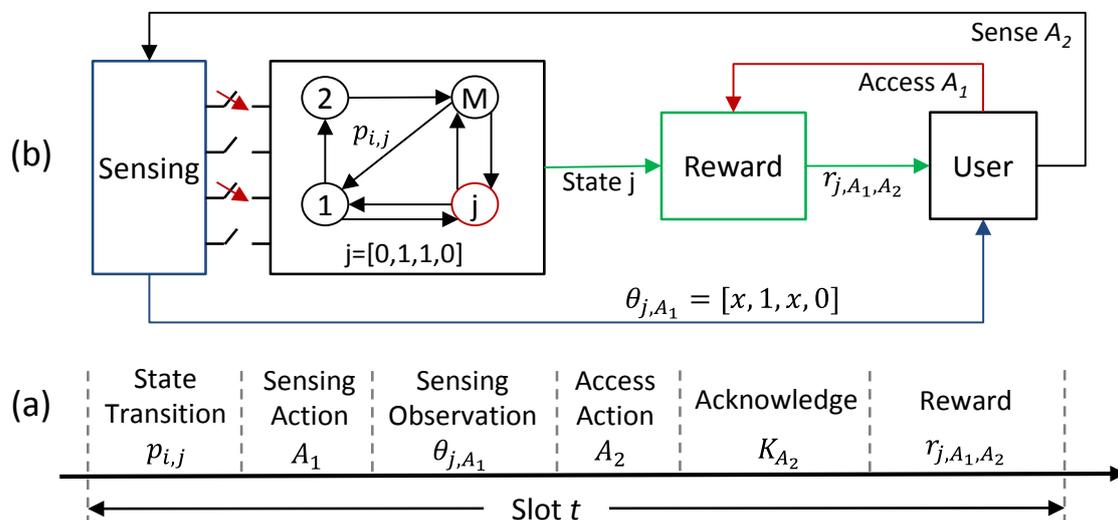


Figura 3.4: DC-MAC: a) sequência de operações e b) modelo POMDP.

O modelo DC-MAC (ZHAO *et al.*, 2007) define um modelo de acesso ao espectro fundamentado em um processo de decisão de Markov parcialmente observável (POMDP). O tempo é dividido em *slots*. O processo realizado por um SU para acessar aos *slots* é mostrado na Figura 3.4 (ZHAO *et al.*, 2007). Primeiro se escolhe um conjunto de canais para sensoriamento (A_1) a partir de um estado j , obtendo uma observação parcial dos canais (θ_{j,A_1}). Na sequência,

o TX utiliza um subconjunto de canais para acesso (A_2) e o RX envia a respectiva confirmação (ACK). Das ações realizadas são obtidas recompensas (*reward*) que no DC-MAC são interpretadas como a quantidade de bits transmitidos resultantes das ações realizadas. As probabilidades de transição entre os estados são assumidas conhecidas (p_{ij}) e a quantidade de estados de Markov é $M = 2^N$, sendo N o número total de canais. O objetivo deste esquema é escolher ações (A_1 e A_2) que maximizem as recompensas ao longo dos *time slots*. O DC-MAC consegue um acesso dinâmico sem a necessidade de observar todos os canais. No entanto, apresenta complexidade exponencial relacionada ao número de canais (testes com $N = 3$) e necessidade de conhecimento a priori dos PUs. Fatores estes que dificultam seu uso nas RSSF.

BIOSS (ATAKAN; AKAN, 2007) é um esquema inspirado em uma colônia de formigas que permite um compartilhamento distribuído dos canais entre SUs sem nenhuma coordenação. Uma probabilidade de seleção de canal (T_j) é calculada conforme (3.1).

$$T_j = \frac{P_j}{P_j + \alpha p_j + \beta L_j} \quad (3.1)$$

Nesta equação, P_j é a potência permissível no canal j , p_j é a potência de TX requerida, L_j é o fator de aprendizagem e $\{\alpha, \beta\}$ são pesos constantes. As ações realizadas em cada rádio cognitivo i são:

- a) sensoriamento espectral para determinar canais disponíveis (livres de PUs);
- b) estimar P_j para todos os canais disponíveis;
- c) inicializar L_j para todo j usando os coeficientes de aprendizado ($\xi_0 = \xi_1 = 10$);
- d) calcular a probabilidade de seleção de canal usando (3.1);
- e) selecionar o canal j que maximiza T para transmitir, o canal j é aprendido ($L_j = L_j - \xi_0$) no caso que o requerimento de QoS seja atingido, ou, caso contrário j é esquecido ($L_j = L_j + \xi_1$);
- f) caso PU transmita, o $P_j = 0$ e o $L_j = 10$ são inicializados para aquele canal j .

Este processo é repetido implicando uma atualização constante da probabilidade de seleção de canal sob qualquer mudança no ambiente de RF. Nesta abordagem o acesso e o *spectrum handoff* não são definidos detalhadamente. Entretanto, o número de colisões entre SUs é alto porque é permitido transmitir abaixo de um limiar de potência e o consumo de energia não é abordado.

DSAT (AGARWAL *et al.*, 2012) define uma metodologia de alocação dinâmica de *time slots* em um canal primário. O *superframe* é dividido em três fases, todas elas com *slots* sincronizados: período de silêncio (QP) utilizado para sensoriamento espectral; sequência de

transmissão de pacotes de controle (CPTS) usada por todos os SUs para transmitir mensagens de coordenação ou permitir o ingresso de novos SU; e por fim, a sequência de transmissão de pacotes de dados (DPTS) usada pelos SUs favorecidos para transmissão de dados. Na CPTS, um SU deve escutar as informações de coordenação dos outros SUs, e com base nelas executar um algoritmo PSA (*packet scheduling algorithm*). Este algoritmo gera a DPTS que define uma sequência ordenada de *slots* para cada par TX-RX (SU). Um SU pode mudar para um outro canal primário livre (identificado em QP), onde deve tentar transmitir uma petição de ingresso durante a fase CPTS ou caso contrário, deve estabelecer um novo *superframe*. Em DSAT, o consumo de energia é considerado de forma parcial, isto é, os dispositivos em modo *sleep* desativam a transmissão, ao mesmo tempo que devem continuar escutando mensagens de controle no canal. As principais desvantagens de DSAT são: altos requerimentos de sincronismo e sinalização. Além disso, não é abordada a perda de mensagens de controle (por somreamento ou desvanecimento) que podem levar a cálculos de PSA diferentes nos dispositivos afetando a robustez da rede.

Outras abordagens que utilizam um esquema de acesso dinâmico distribuído e sinalização *in-band* são: SRAC (MA; SHEN; RYU, 2007) e SYN-MAC (KONDAREDDY; AGRAWAL, 2008).

3.4 ACESSO DINÂMICO AOS CANAIS EM RSSF

Nesta seção são apresentados os métodos de acesso dinâmico propostos no contexto das RSSF. A maioria das abordagens pesquisadas consideram a rede sendo distribuída e formada por um conjunto de *clusters*, são poucas as exceções que usam um enfoque centralizado. Em (AHMAD *et al.*, 2015) é realizado um tutorial das RSSF cognitivas apresentando conceitos, desafios e características relevantes.

Um esquema centralizado de alocação de espectro para uma RSSF é proposto em (BYUN; BALASINGHAM; LIANG, 2008). Um coordenador de rede atribui os recursos de RF considerando a prioridade dos sensores da forma mais justa possível. Este procedimento igualmente tenta maximizar o uso dos recursos de RF disponíveis. O acesso dinâmico utiliza um esquema FDMA com *slots* para dividir os canais entre os sensores. O sensoriamento espectral é realizado pelo coordenador da rede. Em cada época (conjunto de *slots*), o coordenador identifica os recursos de RF disponíveis e recebe as requisições dos sensores. A partir destas informações o coordenador executa um algoritmo de otimização matemática para

atribuir os recursos de forma justa, considerando a prioridade dos sensores, maximizando a utilização do espectro e diminuindo a quantidade de *handoffs*. As desvantagens desta abordagem são: o sincronismo que deve ser mantido entre os dispositivos e a complexidade do algoritmo de atribuição dos recursos no coordenador, a qual é proporcional ao número de sensores e ao número de canais.

Em (QI; SHIMAMOTO, 2012) é abordado o conceito de *spectrum pooling*. Neste caso uma rede de sensores se comunica de forma oportunista utilizando *time slots* livres oriundos das comunicações de uma rede celular (rede primária). Os sensores têm como objetivo o monitoramento de variáveis físicas na área de cobertura da célula. O esquema é centralizado porque usa a BS como o coordenador da RSSF. Os sensores utilizam o CCC da rede celular para identificar *time slots* livres nos canais. Desta forma comunicam suas informações. Este esquema é simples e não precisa realizar tarefas de sensoriamento, entretanto, é necessária uma memória adicional para armazenar dados nos sensores e não é abordado o consumo de energia.

Em (FAGANELLO *et al.*, 2013) é proposto um método de acesso dinâmico aos canais que se fundamenta no algoritmo de aprendizado por reforço (*Q-learning*). Este algoritmo é atualizado por épocas ao longo do tempo. Para atualizar a aprendizagem em cada época (3.2) é utilizada uma recompensa de acesso (r_t) que simplesmente é a taxa DR. As ações (a_t) são interpretadas como a seleção de um canal em um determinado tempo e o parâmetro α é o fator de aprendizagem. O algoritmo proposto é denominado *Q-Noise* e considera a relação sinal-interferência-ruído (SINR) como um parâmetro adicional de realimentação (S_W). O canal é selecionado aleatoriamente a partir de um certo limiar ε , i.e., acima de ε , a seleção é realizada considerando as informações de *Q-Noise* (melhores canais para comunicação) ou abaixo do limiar, a seleção do canal é aleatória para permitir exploração de outros canais. O método proposto é focado na aprendizagem por reforço e não aborda assuntos MAC nem políticas de sensoriamento. Além disso, assuntos como: o consumo de energia e o método para obter as informações SINR que realimentam *Q-Noise* não são especificados.

$$Q_{t+1}(a_t) = (1 - \alpha)Q_t(a_t) + \alpha r_t(a_t) + (S_W \eta) \quad (3.2)$$

Em (YAU; KOMISARCZUK; TEAL, 2009) é proposto um algoritmo para seleção dinâmica de canal em uma RSSF. Este se fundamenta na aprendizagem por reforço e utiliza duas recompensas como realimentação relacionadas ao sucesso ou não da comunicação da mensagem, i.e., recompensa positiva se o ACK for detectado ou negativa caso a detecção não ocorrer. Nesta abordagem não são detalhados: o tipo de acesso, a transferência de canal, nem o sensoriamento. Também, o algoritmo *Q-learning* é usado em (LI, 2009) para seleção dinâmica

de canal. Neste caso os dispositivos competem para se comunicarem com um ponto de acesso e as recompensas usadas no *Q-learning* são resultado do acesso aos canais. Não são abordados temas como: sensoriamento ou consumo de energia. Além disso, não é detalhada a coordenação entre o ponto de acesso e o nó cognitivo para operar em um determinado canal (*spectrum handoff*). As vantagens da aprendizagem por reforço são sua simplicidade e o treinamento *on-line*. Estas características podem ser benéficas na implementação nos sensores, dispositivos com limitações de consumo e computação.

Em (SILVA; MACEDO; LEONI, 2016) é proposto um método de seleção de canal baseado em aprendizagem de máquina. Um módulo de predição baseado em regressão é o elemento chave utilizado pelo *cluster* para determinar: o canal com melhor enlace e a quantidade de tentativas de transmissão N que serão realizadas (janela de predição). As informações de entrada do módulo de predição são: número de tentativas de transmissão; razões de falha da tentativa (rádio ocupado, canal ocupado ou ACK não recebido); e o LQI das mensagens recebidas. O módulo de predição é treinado *off-line* com dados adquiridos durante 4 horas de operação de uma RSSF (10 sensores) em três situações de interferência em um cenário RF específico. Na implementação, o resultado do treinamento é usado pelo nó *head* para selecionar o canal de operação e o tamanho da janela de predição. Isto é realizado iterativamente conforme a experiência adquirida ao longo de todos os canais de operação, i.e., mensagens de teste (*probe*) são trocados nos canais de operação. Não é definido o tipo de acesso ao meio nem a transferência de canal. O consumo de energia é afetado pela utilização de mensagens de teste com periodicidade pequena para conseguir usar o módulo de predição treinado *off-line* em cada iteração. Além disso, a ferramenta deve ser treinada para cada novo ambiente de operação, ou seja, se novas fontes de interferência aparecerem, um novo treinamento deve ser realizado (SILVA; MACEDO; LEONI, 2016).

Um esquema para aproveitar os espaços brancos em um canal primário é definido em (STABELLINI, 2010). A distribuição dos períodos livres no canal é obtida mediante sensoriamento espectral entre dois sensores em comunicação. Esta informação é utilizada para seleção do tamanho de pacote (22-128 bytes) que consegue fazer uso dos espaços brancos e minimiza o consumo de energia. O método avaliado de forma simulada utiliza como base o modelo MAC de IEEE 802.15.4. O desempenho no consumo de energia é avaliado considerando o tempo de *backoff* e o tamanho da mensagem. A principal desvantagem deste esquema é que opera em um canal fixo sem considerar um acesso dinâmico aos canais.

Em (STABELLINI; JAVED, 2010) é definido um método de acesso dinâmico aos canais que permitem comunicação entre dois sensores mediante *time slots*. Nesta abordagem os

dispositivos “acordam” de forma sincronizada no *slot*, o nó RX realiza sensoriamento nos canais de operação e seleciona um canal de operação. O nó TX não sabe qual foi o canal selecionado pelo RX e acaba realizando um processo de redescoberta de vizinho. Quando o canal do receptor é encontrado, o TX envia um RTS (*requests-to-send*) e o RX responde com CTS (*clear-to-send*). Dados são trocados e a comunicação é finalizada com um ACK, então, os nós entram em modo *sleep* (esperando até a próxima fase de comunicação). Ainda, realizar sensoriamento em vários canais podem afetar o consumo do sensor, por isso, três políticas de sensoriamento são definidas: a) monitorar todos, b) monitorar aleatoriamente/selecionar e c) monitorar em ordem/selecionar. As desvantagens principais são: a inexistência de uma sequência de salto adaptativa, a falta de sinalização para coordenar o *spectrum handoff* e a necessidade de redescoberta de vizinho podem implicar um consumo maior de energia que piora se o número de canais aumenta.

Em (ZHANG *et al.*, 2011) um esquema distribuído ciente do espectro (DSAC) é proposto para uma RSSF cognitiva. Nesta abordagem o objetivo é dividir de forma otimizada a rede em *clusters* para minimizar a potência de transmissão e considerar o estado do ambiente de RF. Isto é conseguido mediante um algoritmo distribuído em três fases que se repetem ao longo do tempo: a) sensoriamento, onde cada sensor identifica os canais livres; b) coordenação *intra-cluster*, onde os sensores trocam *beacons* nos canais detectados para formar e manter um *cluster* (declarando um sensor como *head*); c) coordenação *inter-cluster*, onde os dispositivos *head* trocam *beacons* para fundir dois *clusters*. As desvantagens de DSAC são: o tempo de *sleep* não é considerado nem o acesso ao canal; não é definida a coordenação entre TX-RX; e há uma alta troca de informação de coordenação na formação dinâmica dos *clusters* (*overhead*). Além disso, o sensoriamento na banda é individual, o que acaba acarretando um consumo de energia adicional não discutido relacionado ao número de canais primários.

Em (OTO; AKAN, 2012) é estudado qual deve ser o tamanho das mensagens de uma RSSF cognitiva que é energeticamente eficiente. Os resultados mostram que o tamanho ótimo da mensagem depende da quantidade de sensores transmissores e das estatísticas de ocupação dos PUs. O acesso dinâmico ao espectro é definido de forma distribuída usando *time slots*. No começo de cada *slot*, um nó sensor realiza sensoriamento espectral para identificar os canais livres e selecionar um deles de forma aleatória tomando como prioridade o último canal utilizado para comunicação. Finalmente o nó realiza a transmissão da mensagem para posteriormente entrar em modo *sleep*. Este processo é continuado ao longo dos *slots*. O método não define o mecanismo de sincronismo entre sensores nem como é realizado o *spectrum*

handoff. Outra desvantagem está relacionada com que as tarefas de sensoriamento espectral podem ser desafiantes para um nó sensor, em especial, quando o número de canais é grande.

Em (CHEN, J. *et al.*, 2015), a atribuição dinâmica de canal em uma RSSF é modelada como um jogo repetido que estabelece um algoritmo RMCA (*Regret Matching based Channel Assignment*) para cada jogador (sensor). Com a utilização do RMCA, o sensor RX seleciona o canal futuro de forma individual, tentando assim, maximizar a quantidade de mensagens recebidas e diminuir o retardo. As recompensas do algoritmo são resultantes do acesso: relação de recepções validas e retardo médio das mensagens. A abordagem é distribuída porque cada dispositivo RX seleciona o canal sem incorrer em troca de sinalização para coordenar atribuições de canais. O acesso ao canal utilizado é CSMA/CA. No algoritmo RMCA o tempo é dividido em infinitas épocas. Durante uma época k , um receptor recebe múltiplas mensagens e vai atualizando os contadores de mensagens válidas, inválidas e de retardo. No final da época, os contadores e as informações das épocas anteriores contidas em uma função de arrependimento (*regret*) são usadas para calcular uma probabilidade de seleção de canal (P^{k+1}). Esta é usada para selecionar um novo canal em uma época futura. Finalmente, o nó sensor difunde o novo canal de operação usando um canal CCC de coordenação na RSSF. Isto implica que deve existir um certo sincronismo para coordenar o *spectrum handoff* com os nós transmissores. O RMCA é interpretado como um método de coexistência nos canais não licenciados, i.e., não são abordados os fatores de aproveitamento de canais primários nem as políticas de sensoriamento espectral, além disso, os diversos cálculos realizados pelo nó receptor para encontrar P^{k+1} podem gerar importantes custos computacionais.

Em (SUN *et al.*, 2016) é proposto um algoritmo de compartilhamento espectral baseado na teoria dos jogos para aplicar o DSA em uma RSSF. Neste jogo, a rede primária controla e define os preços dos WS. Os sensores de roteamento (ex. líder) podem comprar os WS para serem utilizados nas comunicações com os nós sensores conectados. Os nós tentam maximizar sua utilidade em termos de taxa de dados (recompensas por acesso) e ganhos são decorrentes do comércio de espectro RF. Esta abordagem procura encontrar um equilíbrio entre as redes (primária e RSSF) mudando dinamicamente as estratégias de compra e venda dos WS, bem como a carga de tráfego dos PU. A BS primária fixa o preço inicial e na medida que um líder precise mais recursos RF, este preço é aumentado. Uma conexão direta (cabo) entre o coordenador da RSSF e a BS primária serve para coordenar as compras e vendas. O líder realiza sensoriamento para detectar canais disponíveis, mas não existe cooperação, o que demanda alto processamento. Infortunadamente, há uma alta dependência do coordenador porque os líderes devem comprar WS se comunicando com o coordenador tornando o esquema centralizado.

Em (FANTACCI; MARABISSI, 2016) é realizada uma proposta teórica que visa a integração entre CR e as comunicações M2M (*Machine-to-Machine*) para atender às necessidades de comunicação de uma cidade inteligente. Esta integração pode aumentar a qualidade de vida das pessoas melhorando a capacidade das cidades de economizar energia, reduzir as emissões contaminantes e aumentar a segurança. Nesta abordagem é definida uma visão teoria que considera a comunicação de dispositivos heterogêneos para formar uma rede que abrange toda a cidade e considera o sensoriamento e acesso aos canais, contudo, não define assuntos técnicos específicos dos dispositivos que habilitariam a comunicação M2M.

Em (ROMERO *et al.*, 2016) é definida uma abordagem energeticamente eficiente para comunicações M2M em uma RSSF cognitiva. Esta abordagem é baseada em um jogo não cooperativo que se fundamenta na seleção dinâmica de canal para reduzir a perda de mensagens que por sua vez economiza energia nos sensores. As ações de cada nó sensor são selecionar um novo canal de operação ou permanecer no canal atual. Os nós compartilham informação de sensoriamento (cooperam), porém, as ações de seleção de canal são realizadas individualmente por cada sensor. As recompensas de um sensor são os gastos de energia experimentados ao longo do tempo na realização de uma ação. O objetivo é que a estratégia de ações seja aquela que minimize o consumo de energia. Esta abordagem considera as limitações computacional e energética dos sensores, porém, não define o *spectrum handoff* ou o MAC. Não aproveita as informações de acesso nem de sensoriamento na aprendizagem da estratégia. A avaliação da abordagem é realizada usando simulações computacionais considerando uma RSSF trabalhando como rede secundária (IEEE 802.15.4) e uma rede primária WLAN.

Um mecanismo DSA fundamentado em aprendizagem por reforço profundo é proposto em (NAPARSTEK; COHEN, 2017). Este usa método de acesso aleatório e o tempo é dividido em *slots*. A largura de banda disponível é dividida em K canais ortogonais (OFDM). Um SU seleciona um canal e transmite uma mensagem com certa probabilidade de tentativa recebendo uma confirmação (ACK). O objetivo do mecanismo é encontrar uma estratégia multiusuário que maximize a recompensa (ACK recebidos) de rede em forma distribuída e sem troca de mensagens entre usuários. Algumas desvantagens são: não explora o sensoriamento e o consumo de energia não é considerado. Necessidade de treinamento *off-line* por um dispositivo central para calcular pesos do mecanismo de aprendizagem que pode ser realizado periodicamente quando ocorra uma mudança drástica na situação do ambiente (ex., semanalmente).

Em (FADEL *et al.*, 2017) é definido um algoritmo cooperativo de atribuição de canal para uma RSSF em aplicações *smart grid*. Este mecanismo aborda assuntos de roteamento e

formação dos *clusters* da RSSF de forma bioinspirada. O DSA ajuda na diminuição da perda de mensagens e conserva o LQI entre os nós sensores. Usa um mecanismo de sensoriamento (ED) cooperativo nos sensores. Define coordenadores de rede para controlar a alocação de canais (centralizado). Os coordenadores periodicamente se comunicam para atualizar informação do espectro. CSMA é usado como método de acesso ao canal. Adicionalmente, um líder de *cluster* troca dados com seus sensores associados. Após do sensoriamento, um sensor com interesse em se comunicar negocia com o líder a alocação do canal. A comunicação acontece e uma experiência da qualidade do enlace é aprendida. O algoritmo de alocação tem como objetivo maximizar a qualidade do enlace ao longo do tempo. Não fica claro como é o processo de negociação entre sensor e líder e como acontece o *spectrum handoff*, adicionalmente não é especificada a troca de mensagens de sensoriamento. Os nós sensores devem realizar processamentos complexos.

3.5 RESUMO

Na Tabela 2 são comparados os métodos pesquisados considerando os critérios de análise. Desta comparação identificam-se os principais desafios na busca de uma metodologia eficiente de acesso dinâmico aos canais em uma RSSF distribuída.

As RSSF tradicionais são dependentes de sincronismo, usam esquemas centralizados e realizam uma seleção de canal fixa (e.g., ZigBee) ou cega (e.g., WirelesHART). Isto cria uma certa “rigidez”, não contemplando esquemas de acesso dinâmico aos canais que podem melhorar o desempenho e aumentar a capacidade de coexistência. Além disso, não consideram novas oportunidades de comunicação em canais licenciados.

Com relação aos métodos de uso oportunista de canais primários, algumas abordagens, e.g., (BRIK *et al.*, 2005; CHEN, J. *et al.*, 2015; CHEN, T. *et al.*, 2007; ZOU; CHIGAN, 2009), utilizam um CCC para coordenar a rede, no entanto, para os sensores secundários com prioridade de acesso reduzida é difícil encontrar um canal dedicado no espectro licenciado para esta tarefa. Além disso, a complexidade do dispositivo é alta e o consumo de energia não é abordado. Entretanto, outros trabalhos, e.g., (AGARWAL *et al.*, 2012; ATAKAN; AKAN, 2007; ZHAO *et al.*, 2007), utilizam um esquema de sinalização *in-band* dispensando o uso de um CCC. Estes sofrem com esquemas de sinalização complexos que precisam um alto sincronismo, implicando em custos não toleráveis em RSSF em termos de consumo de energia, troca de mensagens de controle e processamento computacional dos sensores.

Tabela 2: Comparação das abordagens de acesso dinâmico aos canais

Abordagens	Top. Rede	Tipo Sin.	Tipo Acesso	Política Sen.		Método Apren.	Atribuição dos canais	Cons. Energia	Compl. Rádio ¹
				Mon ²	Bus ³				
RSSF baseadas no IEEE 802.15.4 MAC	Dis.	<i>In-band</i>	Aleatório	✓			Fixa	✓	✓
RSSF baseadas no IEEE 802.15.4e MAC	Cen.	<i>In-band</i>	<i>Time slots</i>	✓			Cega	✓	✓
(BRIK <i>et al.</i> , 2005)	Cen.	CCC	Freq.		✓		Dinâmica		
(CHEN, T. <i>et al.</i> , 2007)	Dis.	CCC	Híbrido		✓		Dinâmica		
(YUAN <i>et al.</i> , 2007)	Dis.	CCC	Aleatório		✓		Dinâmica		
(JIA; ZHANG; SHEN, 2008)	Dis.	CCC	Aleatório	✓	✓		Dinâmica		
(ZOU; CHIGAN, 2009)	Dis.	CCC	Híbrido			✓	Dinâmica		
(CORDEIRO; CHALLAPALI, 2007)	Dis.	<i>In-band</i>	<i>Time slots</i>	✓			Dinâmica		
(ZHAO <i>et al.</i> , 2007)	Dis.	<i>In-band</i>	<i>Time slots</i>	✓	✓	✓	Dinâmica		
(ATAKAN; AKAN, 2007)	Dis.				✓	✓	Dinâmica		
(BYUN; BALASINGHAM; LIANG, 2008)	Cen.	<i>In-band</i>	<i>Time slots</i>		✓		Dinâmica	✓	
(QI; SHIMAMOTO, 2012)	Cen.	CCC	<i>Time slots</i>				Dinâmica		
(AGARWAL <i>et al.</i> , 2012)	Dis.	<i>In-band</i>	<i>Time slots</i>		✓		Dinâmica		
(LI, 2009)	Dis.		Aleatório			✓	Dinâmica		
(FAGANELLO <i>et al.</i> , 2013)	Dis.					✓	Dinâmica	✓	
(YAU; KOMISARCZUK; TEAL, 2009)	Dis.					✓	Dinâmica	✓	
(SILVA; MACEDO; LEONI, 2016)	Dis.					✓	Dinâmica	✓	✓
(STABELLINI, 2010)	Dis.	<i>In-band</i>	Aleatório	✓		✓	Fixa	✓	✓
(STABELLINI; JAVED, 2010)	Dis.	<i>In-band</i>	<i>Time slots</i>		✓		Dinâmica	✓	✓
(ZHANG <i>et al.</i> , 2011)	Dis.			✓	✓		Dinâmica	✓	✓
(OTO; AKAN, 2012)	Dis.		<i>Time slots</i>		✓		Dinâmica	✓	✓
(CHEN, J. <i>et al.</i> , 2015)	Dis.	CCC	Aleatório			✓	Dinâmica	✓	
(SUN <i>et al.</i> , 2016)	Cen.				✓	✓	Dinâmica	✓	
(FANTACCI; MARABISSI, 2016)	Dis.				✓		Dinâmica		
(ROMERO <i>et al.</i> , 2016)	Dis.		Aleatório		✓	✓	Dinâmica	✓	✓
(NAPARSTEK; COHEN, 2017)	Dis.		Aleatório			✓	Dinâmica		
(FADEL <i>et al.</i> , 2017)	Cen.		Aleatório		✓	✓	Dinâmica	✓	
MSDAC	Dis.	<i>In-band</i>	Aleatório	✓	✓	✓	Dinâmica	✓	✓

A maioria de trabalhos de acesso dinâmico aos canais nas RSSF, e.g., (CHEN, J. *et al.*, 2015; FAGANELLO *et al.*, 2013; LI, 2009; NAPARSTEK; COHEN, 2017; YAU; KOMISARCZUK; TEAL, 2009), utilizam como realimentação as recompensas resultantes das

¹ Complexidade do rádio: maior (requerimentos de hardware ou software) ou menor '✓' (nós mais simples)

² Monitoramento de um canal cuja finalidade é determinar se o canal está livre ou ocupado.

³ Busca é o sensoriamento em múltiplos canais cujo objetivo é aprender o estado do espectro.

comunicações, sem utilizar dados de sensoriamento como parâmetro para seleção dinâmica de canal. As informações de sensoriamento são cruciais, porque permitem proteger as comunicações primárias e aprender através das mudanças do ambiente de RF. Alguns trabalhos (OTO; AKAN, 2012; SUN *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2011) que utilizam o sensoriamento para seleção dinâmica de canal abordam um enfoque individual, i.e., cada dispositivo deve monitorar todos os canais e não existe cooperação no sensoriamento. Esta tarefa pode implicar processamento adicional, em sensores limitados na variável consumo e no próprio hardware. Assuntos da camada MAC e do *spectrum handoff* não são abordados nos trabalhos de acesso dinâmico aos canais em RSSF, e.g., (FANTACCI; MARABISSI, 2016; ROMERO *et al.*, 2016). Os poucos trabalhos que estudam tais assuntos, apresentam alta complexidade no *handoff* (STABELLINI; JAVED, 2010), algoritmos complexos para seleção de canal (BYUN; BALASINGHAM; LIANG, 2008; FADEL *et al.*, 2017) ou requerimentos estritos de sincronismo (CHEN, J. *et al.*, 2015; OTO; AKAN, 2012; STABELLINI; JAVED, 2010). Outras abordagens precisam de treinamentos *off-line* (SILVA; MACEDO; LEONI, 2016).

A introdução de cognição nas redes de sensores distribuídas é desafiante como indica a revisão da literatura. Existem inúmeros aspectos que ainda podem ser abordados em pesquisas futuras, correlacionando o acesso dinâmico aos canais de forma distribuída, as políticas cooperativas de sensoriamento espectral da rede e a coordenação assíncrona dos sensores. Portanto, o capítulo 4 apresenta uma metodologia nova de sensoriamento e acesso dinâmico aos canais proposta no contexto de RSSF assíncronas e distribuídas.

4 METODOLOGIA DE SENSORIAMENTO E ACESSO DINÂMICO AOS CANAIS EM RSSF

Neste capítulo é apresentada uma nova metodologia para realizar sensoriamento espectral e acesso dinâmico aos canais em uma RSSF dividida em *clusters* com processos de coordenação e comunicação assíncronos. O capítulo inicia apresentando os principais elementos da metodologia proposta. Apresenta-se também o modelo de RSSF com enfoque em *clusters*, algumas características funcionais e considerações iniciais. Em seguida, a política de sensoriamento e o modelo de aprendizagem são descritos. Logo após, o método de acesso ao meio, a seleção dinâmica de canal e a coordenação assíncrona para transferência de canal são definidos. Finalmente, apresentam-se os algoritmos funcionais dos dispositivos e um resumo da metodologia desenvolvida.

4.1 ELEMENTOS DA METODOLOGIA MSDAC

O foco da metodologia proposta é a coordenação entre os sensores e os líderes de *cluster* para manter operativos os enlaces de dados enquanto são trocados os canais (ex., primários) de forma assíncrona e adaptativa. A metodologia de sensoriamento e acesso dinâmico aos canais é um mecanismo utilizado pelos membros do *cluster* para:

- a) definir a política de sensoriamento;
- b) definir procedimentos de economia de energia;
- c) trocar mensagens de dados;
- d) aprender o estado do espectro de RF usando informações resultantes do sensoriamento dos canais;
- e) coordenar os membros do *cluster* para a seleção adaptativa do canal de operação.

Uma característica importante dos assuntos anteriores é o assincronismo, onde não são necessários complexos esquemas de sincronização nem necessidade de *beacons* para coordenar os acessos e o *spectrum handoff*. Na metodologia proposta, as informações adicionais de sinalização são mínimas. Estas não precisam um canal dedicado (CCC) nem complexos esquemas de sinalização e são acomodadas facilmente nas mensagens (quadro MAC), tornando a metodologia proposta de fácil implementação nas RSSF.

A Figura 4.1 apresenta os principais elementos que formam parte da metodologia de sensoriamento e acesso distribuído aos canais desenvolvida.

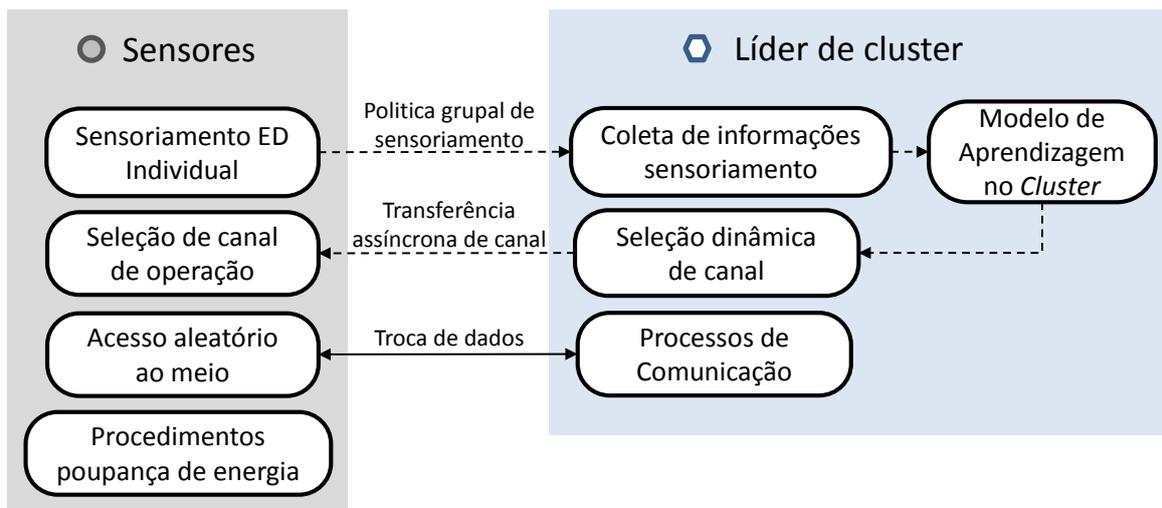


Figura 4.1: Elementos da metodologia MSDAC.

Os assuntos inéditos da metodologia proposta são essencialmente a forma como a aprendizagem é realimentada pelas informações de sensoriamento junto com a seleção adaptativa dos canais e o mecanismo de coordenação assíncrono que habilita a transferência de canal. Os elementos representam diversos processos realizados dentro do *cluster* pelo líder ou pelos sensores cujas finalidades são aprender o ambiente de RF e selecionar os canais com menor interferência para se comunicar ao longo do tempo. Estas funcionalidades estão relacionadas com a camada MAC dos dispositivos. As principais tarefas realizadas pelos sensores (esquerda da Figura 4.1) são: a) seleção aleatória de um canal para realizar sensoriamento mediante ED; b) seleção do canal de operação considerando as informações do quadro de confirmação com o objetivo de manter o enlace com o líder; c) acessos periódicos ao canal para transmissão de dados; d) ativação do modo *sleep* para baixo consumo de energia; e) procura do canal de operação adequado caso seja perdido o enlace com o líder após um determinado tempo (múltiplas tentativas sem confirmação).

Em contraste, as tarefas implícitas no líder (direita da Figura 4.1) são: a) executar um algoritmo de aprendizagem por reforço alimentado pelas informações de sensoriamento recebidas dos sensores; b) selecionar de forma adaptativa os canais de acesso com base na aprendizagem; c) receber dados provenientes dos sensores, gerando uma resposta de confirmação contendo o grupo de canais de acesso e o contador de permanência no canal (δ). Este último serve para que os dispositivos de forma aproximada saibam o tempo restante que devem ficar no canal de operação antes de sintonizar um outro canal (a sintonização nos diversos dispositivos do *cluster* acontece de forma assíncrona).

4.2 MODELO DE REDE E CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesta seção é definido o modelo da RSSF e suas principais características. A rede é formada por vários agrupamentos de sensores denominadas *clusters* (Figura 4.2).

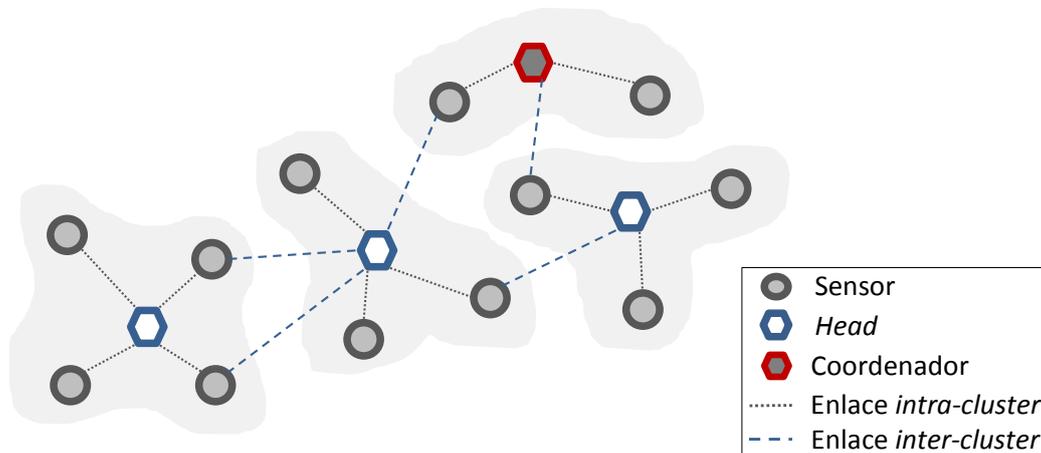


Figura 4.2: Modelo da RSSF.

Um *cluster* ou grupo é constituído de vários sensores e um líder (*head*). O líder controla os recursos do *cluster*. Nesta abordagem as decisões de acesso aos canais realizadas pelos dispositivos não dependem do coordenador como acontece tradicionalmente nos esquemas centralizados, e.g., (DE GUGLIELMO; ANASTASI; SEGHETTI, 2014; QI; SHIMAMOTO, 2012), pelo contrário, o acesso dinâmico aos canais é governado pelas ações que acontecem em cada *cluster*. Este modelo de rede tem sido usado em vários trabalhos, e.g., (SILVA; MACEDO; LEONI, 2016; ZHANG *et al.*, 2011) porque permite um acesso dinâmico aos canais de forma distribuída que usa informações locais, assim, o processo para coordenar os sensores da RSSF precisa menos mensagens de controle que a abordagem distribuída ou não são necessários esquemas centralizados que estão limitados pelo número de saltos (e.g., esquemas com *beacon*).

Os processos de comunicação acontecem majoritariamente dentro do *cluster*, com o líder atuando como coletor de dados provenientes dos sensores. Para esta finalidade os sensores do grupo utilizam um enlace *intra-cluster* como mostrado na Figura 4.2. Embora os procedimentos de roteamento de mensagens não sejam considerados neste trabalho, a comunicação entre *clusters* vizinhos é contemplada utilizando enlaces *inter-cluster*. Neles um sensor pode ter um enlace adicional com um líder de um *cluster* vizinho para troca de dados. A rede proposta é distribuída considerando que os processos realizados pelos sensores em sua maioria têm início e fim no próprio *cluster*, assim, o maior fluxo de comunicação acontece dentro do *cluster* e só algumas comunicações são propagadas entre *clusters*.

Este modelo habilita aplicações com processos distribuídos para automação residencial ou doméstica (STOJKOSKA; AVRAMOVA; CHATZIMISIOS, 2014). Assim, um apartamento ou unidade habitacional pode ser representado por um *cluster*. Neste caso, os nós sensores são espalhados dentro da unidade habitacional (HAN) para realizar medições da temperatura ambiente e posteriormente comunicar o resultado ao nó líder. O líder do *cluster* utiliza estas informações medidas para realizar um processo de controle sobre o sistema de climatização que pode estar associado diretamente a ele ou por meio de um nó sensor. Neste caso existe pouca interação entre *clusters* e os processos são resolvidos de forma local.

A inicialização e formação de uma RSSF dividida em *clusters* tem sido analisada tradicionalmente, e.g., (SINGHAL; BARJATIYA; RAMAMURTHY, 2011), porém, este assunto não é o foco deste trabalho. Então, assume-se a existência de uma RSSF já estabelecida que está dividida em subgrupos de dispositivos como apresentado na Figura 4.2. Na verificação e teste da metodologia proposta, a rede é configurada em forma manual mediante a definição do endereço e do papel de cada dispositivo conforme sua localização. Assim, os líderes de *cluster* recebem um endereço específico de identificação e cada nó sensor é configurado com um endereço fixo com associação ao endereço do líder correspondente ao seu *cluster*.

A camada física dos dispositivos sensores é fundamentada no IEEE 802.15.4 PHY (seção 2.2.1). Os testes simulados e experimentais consideram a faixa ISM de 2.4GHz como banda de operação, mas a MSDAC poderia também considerar outras faixas adicionais pertencentes a PUs, por exemplo, *very high frequency* (VHF) ou *ultra high frequency* (UHF). Estas faixas adicionais de operação permitiriam explorar os espaços brancos deixados por usuários primários de diversas tecnologias (por ex., TVWS). Os componentes hardware e software dos dispositivos sensores devem suportar estas novas possíveis faixas de operação que dependem de futuras regulamentações das instituições de padronização e das agências nacionais de controle (e.g., ANATEL). A potência é assumida como um valor fixo que fornece um nível adequado de LQI nas comunicações dos nós sensores. Esquemas de modulação, espalhamento, níveis de sensibilidade e saturação são considerados do padrão (IEEE 802.15.4 STD, 2003).

4.3 SENSORIAMENTO E APRENDIZAGEM

Nesta seção é definida a forma como são adquiridas as informações de sensoriamento e como estas são usadas para alimentar um modelo de aprendizagem que permite obter um mapa adaptativo da energia interferente presente nos canais.

4.3.1 Política grupal de sensoriamento

Uma parte essencial da metodologia proposta é a forma como os dispositivos da RSSF realizam sensoriamento espectral. O sensoriamento espectral é executado de duas maneiras: monitoramento do canal de operação e sensoriamento da banda (ex., primária). Ambos utilizam o método de ED definido na seção 2.3.3, entretanto, também pode ser usado um método de ED melhorado proposto em (GARZON, J. L. T. *et al.*, 2016), que apesar de implicar um custo computacional maior, pode gerar um melhor desempenho na detecção.

No monitoramento do canal de operação, o nó sensor realiza uma medição da energia presente no canal atual de operação para determinar se o canal está livre ou ocupado. Esta medição antecede qualquer tentativa de comunicação como será explicado em seções posteriores. A maioria dos dispositivos sensores atuais possuem esta funcionalidade, a qual é conhecida como CCA no IEEE 802.15.4. O modo CCA básico reporta a energia detectada em um canal específico em uma faixa de saída entre 0 (pouca energia) e 255 (nível alto de energia). Com o zero e o 255 relacionados à sensibilidade (e.g., -85dBm) e saturação do hardware receptor (e.g., -20dBm). O tempo de detecção do CCA abrange 8 símbolos da PHY de IEEE 802.15.4. O método CCA pode ser estendido para trabalhar em outras faixas para detectar se o PU está ou não ativo em um determinado canal e, deste modo, o CCA além de ser mecanismo de coexistência torna-se também uma forma de proteção do PU.

O sensoriamento da banda proposto permite adquirir de forma cooperativa (grupal) medições ED dos diversos canais primários. Estas medições são conseguidas pelos membros do *cluster* e permitem alimentar um algoritmo de aprendizagem no líder. O objetivo deste processo é obter informações atualizadas dos diversos canais sem precisar controlar de forma estrita as decisões de sensoriamento dos sensores do *cluster*. Assim, na MSDAC, os sensores realizam sensoriamento com certa independência dos demais seguindo um padrão de escolha de canal aleatório e considerando uma informação de controle chave enviada pelo líder. Esta informação de controle carrega um conjunto de canais de acesso (CAS – *Channel Access Set*) que define o canal atual e futuro de operação caso dois sejam os elementos deste conjunto ($M_{CAS} = 2$). Todos os dispositivos da rede têm conhecimento a priori do conjunto de canais de trabalho (CWS – *Channel Work Set*). Os canais CWS podem pertencer à faixa primária ou secundária. A partir de CAS e CWS, os sensores que desejam realizar sensoriamento podem derivar um conjunto de canais de sensoriamento (CSS – *Channel Sensing Set*) e selecionar um canal aleatoriamente para realizar sensoriamento espectral. Os conjuntos de canais são únicos para cada *cluster* e os canais de acesso e sensoriamento nunca têm elementos em comum (4.1),

assim, o número total de canais de trabalho é $M = M_{CAS} + M_{CSS}$ (4.2) com M_{CSS} representando o número de elementos do conjunto CSS.

$$CAS \cap CSS = \emptyset \quad (4.1)$$

$$CWS = CAS \cup CSS \quad (4.2)$$

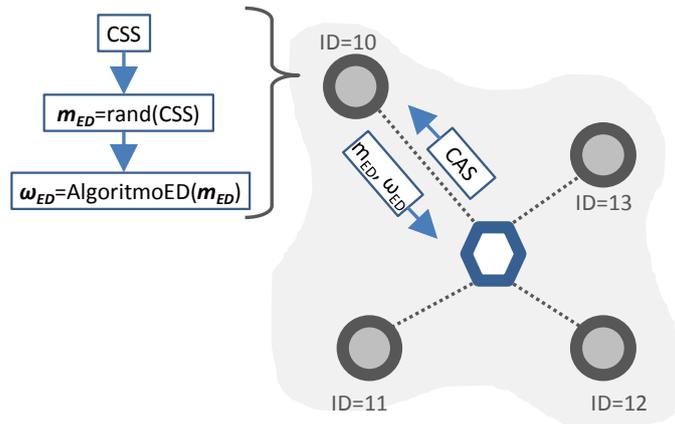


Figura 4.3: Processo de sensoriamento da banda de trabalho no *cluster*.

Na Figura 4.3 é apresentado um exemplo do processo realizado dentro do *cluster* para aquisição de informações de sensoriamento na banda de trabalho. Este processo é realizado indefinidamente e permite ao líder receber múltiplas medições ED dos canais escolhidos de forma aleatória pelos sensores. Para receber uma medição o seguinte processo é realizado:

- O líder de *cluster* envia o conjunto CAS;
- Caso o CAS recebido seja diferente do CAS na memória do nó sensor (ex., ID=10 da Figura 4.3), CSS é recalculado usando o CAS recebido e o CWS armazenado como se mostra na equação (4.3);

$$CSS = CWS - CAS = \{m / m \in CWS \ \& \ m \notin CAS\} \quad (4.3)$$

- Um canal m_{ED} é selecionado aleatoriamente pelo sensor de CSS;
- O sensor sintoniza o canal m_{ED} e executa um algoritmo ED;
- Finalmente, o sensor envia o canal m_{ED} e a medição ω_{ED} obtida ao líder de *cluster*.

O processo anterior pode acontecer inúmeras vezes, obtendo medições ED de toda a banda CWS, já que, o líder troca os canais de acesso de tempos em tempos e os sensores realizam a escolha de canal m_{ED} . Esta seleção de canal considera uma variável aleatória X_{ED} com distribuição uniforme sobre o conjunto CSS (4.4), isto é, todos os canais CSS tem a mesma probabilidade de ser selecionados.

$$X_{ED} \sim f_{SCSS}(m_{ED}) = \begin{cases} 1/M_{CSS}, & 0 < m_{ED} \leq M_{CSS} \\ 0, & m_{ED} > M_{CSS} \end{cases} \quad (4.4)$$

Os dispositivos sensores que seguem o padrão IEEE 802.15.4 vêm equipados com um algoritmo ED que permite gerar um valor entre 0 e 255 que indica o nível RF medido em um determinado canal. Na MSDAC, as informações trocadas entre líder e sensor são colocadas nos quadros de dados e de confirmação como será explicado posteriormente. O valor da medição ED é representado com 8 bits e os canais podem também serem representados usando este mesmo tamanho, conseguindo representar até 255 canais primários. Conseqüentemente, o tamanho do CAS é de 2 bytes enquanto que a informação enviada pelo sensor é de 2 bytes (um byte para o ω_{ED} e outro para o m_{ED}).

4.3.2 Modelo de aprendizagem no *cluster*

O modelo de aprendizagem, localizado no líder de *cluster*, tem como objetivo juntar as medições ED enviadas pelos sensores para fornecer uma estimativa histórica e adaptativa da energia presente na banda de trabalho (CWS). Este modelo não requer cálculos computacionais complexos nem requerimentos estritos de memória, tornando-se adequado para implementação nas RSSF, onde há restrições em processamento, memória e consumo.

O modelo de aprendizagem usado é derivado do aprendizado por reforço (KAELBLING; LITTMAN; MOORE, 1996) e permite aprender a partir da interação com o ambiente de RF. Duas ações são estipuladas: ações de sensoriamento (m_{ED}) e ação de seleção de um canal de acesso para um tempo futuro (m_f). Relações de causa e efeito resultantes das ações podem ser inferidas. As informações de sensoriamento são as recompensas ou sinais de reforço que permitem formalizar o aprendizado. Em geral, um agente (líder) recebe uma sequência de reforços após selecionar uma ação m_f . A finalidade deste modelo é aprender o nível de energia ED medido pelos sensores ao longo da faixa CWS, assim, é obtida uma medida da interferência em todos os canais permitindo realizar ações de seleção de canal mais acertadas para evitar interferências. A equação (4.5) é o modelo de aprendizagem proposto.

$$E_{t+1}(m_{ED}) = \alpha E_t(m_{ED}) + (1 - \alpha)\omega_{ED} \quad (4.5)$$

Onde E_t representa o retorno de aprendizado que permite estimar a energia interferente presente em cada canal m . O parâmetro α é um fator de aprendizagem que permite quantificar o peso das novas informações, isto é, valores próximos a zero fornecem maior preferência às recompensas e valores perto de um são interpretados como uma preferência da E_t histórica.

O modelo de aprendizagem pode ser interpretado como um esquema de fusão de dados de sensoriamento. Nele a fusão de decisões é suave (*soft decision fusion*) porque os nós sensores medem o espectro de RF e o resultado é enviado ao líder que realiza a fusão de dados e gera uma decisão final do uso dos canais CWS.

Uma diferença importante do método proposto com os métodos de aprendizagem do estado do ambiente RF no contexto do acesso dinâmico das RSSF é que as recompensas (reforços) não são decorrentes do acesso (e.g., BER ou DR) como acontece em (ABOLARINWA *et al.*, 2015; CHEN, J. *et al.*, 2015; FAGANELLO *et al.*, 2013; NAPARSTEK; COHEN, 2017; YAU; KOMISARCZUK; TEAL, 2009) e sim do sensoriamento, como é definido na equação (4.5), com ω_{ED} representando uma medição ED obtida no tempo t proveniente de algum dos membros do *cluster*. Esta característica permite solucionar um dilema presente no enfoque tradicional de aprendizagem por reforço que deve considerar um balanço entre exploração de novos canais e aproveitamento dos canais conhecidos, ou seja, as recompensas obtidas estão sempre associadas a um canal m sem saber o que acontece nos outros canais. No modelo de aprendizagem proposto, durante a execução de uma ação m_f , podem ser obtidas recompensas dos outros canais dispensando o uso de uma fase adicional de exploração de novos canais. Por outro lado, a detecção do estado de RF a partir do modelo de aprendizagem pode mostrar erros associados ao desempenho do algoritmo de detecção por energia que tem sido estudado amplamente e apresenta curva de desempenho relacionando a probabilidade de detecção do PU com a probabilidade de falso alarme. Esta curva está sujeita ao limiar de detecção do algoritmo ED e ao nível SNR (YUCEK; ARSLAN, 2009).

O modelo de aprendizagem afeta só as ações de seleção de canal e não influencia o sensoriamento nos canais CSS, o que resulta adequado para identificar o estado dos diversos canais CWS. A política de seleção é a forma como uma nova ação m_f é escolhida. Já que não é necessária uma fase de exploração, a política de seleção de canal utilizada é gulosa (a mais simples da aprendizagem por reforço), beneficiando com sua simplicidade a implementação nos limitados dispositivos sensores. A seleção gulosa é mostrada na equação (4.6).

$$m_f = \underset{m \in CSS}{\operatorname{argmin}} E_t(m) \quad (4.6)$$

A função E_t pode ser interpretada como a energia RF ao longo da banda de trabalho. Valores elevados desta função indicam uma possibilidade elevada de interferência devido a uma alta atividade primária e valores pequenos significam que o recurso é adequado para uso pela pouca atividade primária detectada. Consequentemente, o novo canal de transmissão que

formará parte do conjunto CAS é aquele que tem menor nível de energia no modelo de aprendizagem. Esta seleção de canal acontece em intervalos de tempo periódicos (épocas) que serão definidos na próxima seção.

4.4 MECANISMO ASSÍNCRONO DE COORDENAÇÃO E ACESSO

Nesta seção são estudados os procedimentos da metodologia proposta que visam a comunicação e coordenação dos dispositivos do *cluster* de forma assíncrona e usando as informações de sensoriamento e aprendizagem descritas anteriormente. Também são definidos os diversos contadores e intervalos de tempo que habilitam o funcionamento do método.

4.4.1 Seleção dinâmica de canal

Os membros de um determinado *cluster* mudam dinamicamente o canal de operação de modo a utilizar mais frequentemente aqueles canais que fornecem menor E_t . Além disso, os canais utilizados são liberados temporalmente para realizar tarefas de sensoriamento. A Figura 4.4a apresenta um exemplo da seleção dinâmica dos canais de operação ao longo do tempo.

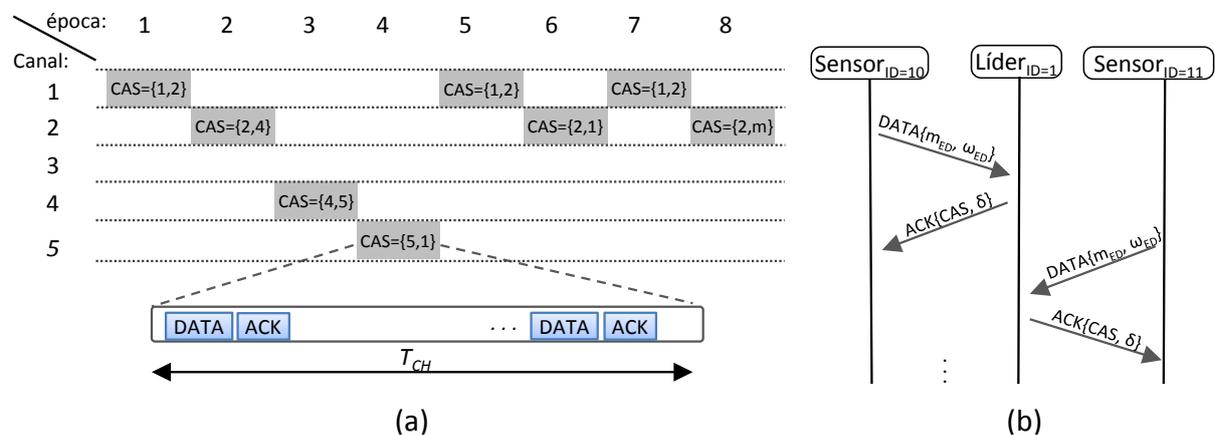


Figura 4.4: Processos no *cluster* de: a) seleção dinâmica e b) troca de dados.

O líder de *cluster* seleciona e permanece em um canal durante uma época de comunicação definida pelo intervalo de tempo de duração T_{CH} (tempo no canal). Este tempo deve ser suficiente para permitir várias comunicações com os nós sensores que enviam dados em rajada com certa periodicidade definida pelas suas tarefas: dormir, acordar, processar e comunicar, cujos tempos estão relacionados ao tipo de aplicação da RSSF. O conjunto de canais de acesso é formado por dois elementos: o atual e futuro como definido em (4.7). Sendo que o

primeiro elemento (m_o) é sempre o canal sintonizado para operação e o segundo fica reservado para utilização na próxima época.

$$CAS = \{m_o; m_f\} \quad (4.7)$$

Na Figura 4.4b é observado um exemplo dos processos de comunicação que acontecem em uma época. Os nós sensores são habilitados para enviarem dados ao líder no canal m_o que em resposta envia um ACK de confirmação. Um sensor pode realizar várias tentativas de comunicação e no caso de não receber ACK após um número máximo de tentativas (por ex., 3 tentativas), o sensor entra no modo de baixo consumo. O líder é receptor de informação enquanto os nós sensores transmitem dados. Note-se que não há necessidade de utilizar *beacons* para sincronização. O método de acesso ao meio será estudado na próxima seção. No exemplo da Figura 4.4a, o líder inicia com valores: $CAS = \{1; 2\}$ e $CSS = \{3; 4; 5\}$. Na transição entre épocas, o líder redefine o conjunto CAS, assim, o canal futuro passa à primeira posição, tornando-se o canal de operação e um novo canal é atribuído à segunda posição de CAS, tornando-se o canal futuro. O novo canal futuro é calculado considerando o nível de energia interferente presente em todos os canais do conjunto CSS. As equações (4.8)-(4.9) definem o procedimento realizado para recalculer CAS ao final de uma época.

$$CAS(1) = CAS(2) \quad (4.8)$$

$$CAS(2) = m_f = \underset{m \in CSS}{\operatorname{argmin}} E_t(m) \quad (4.9)$$

Este processo é executado pelo líder regularmente (a cada época de comunicação) estabelecendo um mecanismo dinâmico de salto em canal, onde os canais mais adequados em termos de baixa interferência são mais frequentemente utilizados ao longo das épocas. Em contraste, o canal de acesso descartado em uma época passa a formar parte do conjunto de canais de sensoriamento. Isto permite executar medições neste canal sem necessidade de utilizar mecanismos de exploração no modelo de aprendizagem. Outro mecanismo de seleção do canal de operação pode ser utilizado (e.g., *softmax*), mas, com um custo computacional adicional.

Retomando o exemplo da Figura 4.4a, na segunda época, o CAS fica com $\{2; 4\}$ e o canal 1 é “descartado” do conjunto de acesso e adicionado ao conjunto $CSS = \{3; 5; 1\}$. Este processo continua indefinidamente ao longo das épocas permitindo que o líder de *cluster* acesse aos canais de forma dinâmica em decorrência da aprendizagem obtida mediante observações diversas em cada época. Entretanto, o líder envia o conjunto CAS em todos os quadros de confirmação, permitindo que os sensores atualizem seus próprios conjuntos CAS e CSS. Em

uma seção subsequente é detalhado o processo de como é realizada a coordenação para transferência de canal entre o líder e sensores utilizando CAS e δ .

Ainda que a comunicação entre *clusters* e o roteamento das mensagens não sejam o foco deste trabalho, o processo de seleção dinâmica de canal dentro do *cluster* descrito anteriormente pode ser estendido ao contexto da comunicação entre *clusters*. Isto pode ser feito mediante um enlace *inter-cluster* que permite trocar informações entre grupos vizinhos. Nele, um nó sensor pode ter uma conexão adicional a um *cluster* vizinho como mostrado na Figura 4.5. Como não existe um método de sincronismo entre dispositivos, o nó sensor deve se comunicar de forma continua com o líder vizinho como se fosse parte daquele *cluster* de modo a manter ativo o enlace *inter-cluster*. Conseqüentemente, o nó sensor deve manter uma estrutura adicional para armazenar o conjunto de canais de acesso ($CAS^{ID_{vizinho}}$) e contador de permanência no canal ($\delta^{ID_{vizinho}}$) do *cluster* vizinho. Embora o nó sensor com conexão vizinha seja tratado pelo líder do *cluster* vizinho como parte do grupo, as medições realizadas por aquele sensor só são consideradas no seu *cluster* sem afetar o modelo de aprendizagem vizinho.

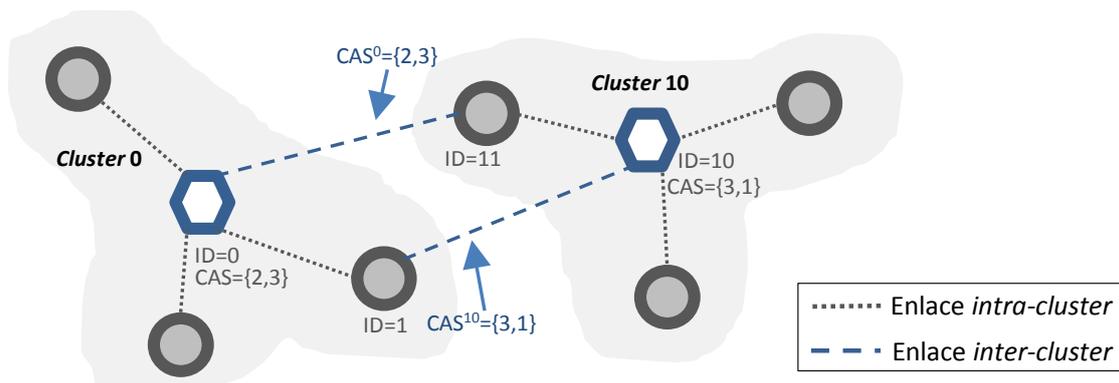


Figura 4.5: Conexão entre grupos vizinhos.

Considere o exemplo da Figura 4.5. Neste caso, o sensor ID=1 do *cluster 0* tem um enlace de conexão adicional com o *cluster 10*, e para suportar essa comunicação, possui um conjunto de canais de acesso adicionais relacionados ao *cluster 10*, isto é, $CAS^{10} = \{3; 1\}$.

Similarmente, o nó sensor ID=11 está conectado ao *cluster 0* usando o conjunto $CAS^0 = \{2; 3\}$, que permite enviar dados entre grupos em qualquer direção. O procedimento realizado pelo sensor com enlace vizinho é o mesmo que foi descrito nesta seção para comunicação *intra-cluster*. Um nó sensor com dois enlaces (dentro e fora do grupo) segue um processo similar ao caso *intra-cluster*, adicionando só um processo de comunicação para manter o enlace vizinho. Assim, o processo realizado pelo nó sensor (ex., ID=1 da Figura 4.5) é: acordar, comunicar no *cluster*, comunicar no *cluster* vizinho e dormir. Note-se que um sensor sem conexão vizinha

realiza o mesmo processo, com a diferença que não executa a comunicação com *cluster* vizinho. Sensores com conexão vizinha podem estar ativos por mais tempo, implicando em um maior consumo de energia e, portanto, deve-se ter a menor quantidade de ligações possíveis. Além disso, o número de ligações entre *clusters* está relacionado à quantidade de membros em cada grupo e é recomendado que os sensores escolhidos para conexão vizinha sejam aqueles que apresentam, por ex., o maior nível de LQI ou a menor distancia com o líder vizinho. O processo de comunicação entre *clusters* poderá ser estudado mais detalhadamente em trabalhos futuros.

4.4.2 Troca de dados

Quando o líder e os sensores membros do *cluster* se encontram em um mesmo canal durante uma época específica, realizam trocas de dados da forma mostrada na Figura 4.4b. O líder de *cluster* fica esperando informações dos diversos sensores e envia uma mensagem de confirmação (ACK) se previamente é recebida uma mensagem de dados (DATA). Alternativamente, no caso em que o líder tenha uma mensagem de dados em espera para um sensor específico, esta mensagem poderá ser enviada ao sensor de forma oportunista uma vez que o sensor tenha se comunicado com o líder, i.e., o líder envia a mensagem em espera logo após o envio da mensagem de dados pelo sensor. Assim, o líder pode enviar novas configurações ao sensor ou uma mensagem a um sensor com conexão com um *cluster* vizinho.

O líder de *cluster* não precisa executar algoritmos de acesso ao canal uma vez que sua participação na comunicação é passiva, encontrando-se em modo de recepção à espera de possíveis mensagens dos diversos sensores. Em outras palavras, o sensor é responsável por desencadear o processo de comunicação. Os sensores competem pelo acesso ao canal utilizando *unslotted* CSMA/CA do IEEE 802.15.4 (Figura 4.6).

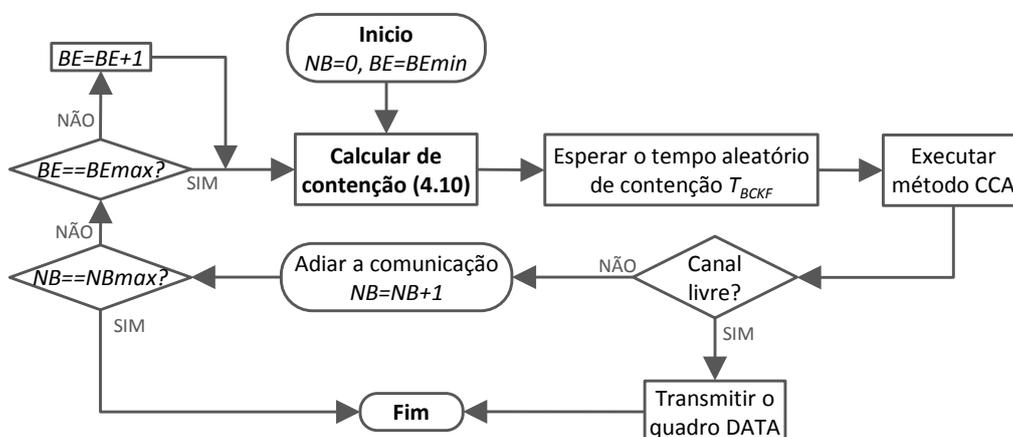


Figura 4.6: Fluxograma do algoritmo de acesso.

Este mecanismo é utilizado porque não é necessária sincronização entre transmissor e receptor. No *unslotted* CSMA/CA, uma sequência de contenções aleatórias junto com medições CCA no canal de operação permitem diminuir consideravelmente o conflito entre sensores. Os principais parâmetros utilizados para este processo são: número de *backoff* (NB), expoente de *backoff* (BE), máximo NB (NB_{max}), mínimo BE (BE_{min}) e máximo BE (BE_{max}). O número de *backoff* é um contador que representa a quantidade de vezes que será repetido o processo de contenção (espera aleatória) caso o canal esteja ocupado. Um ponto desfavorável do *unslotted* CSMA/CA é que o problema do terminal oculto pode acontecer com maior probabilidade, caso o número de sensores e a frequência das comunicações sejam altas.

O cálculo do tempo aleatório de contenção é realizado mediante a equação (4.10), onde a unidade de *backoff* é uma constante assumida como $U_{BCKF} = 20$ (IEEE 802.15.4). U_{BCKF} é um tempo base que representa uma determinada quantidade de símbolos, por ex., $U_{BCKF} = 320\mu s$ para 20 símbolos da faixa 2,4 GHz com modulação segundo a Tabela 1.

$$T_{BCKF} = U_{BCKF}(\text{rand}\{2^{BE} - 1\}) \quad (4.10)$$

O algoritmo anterior habilita as comunicações da rede de sensores no canal de operação definido na seção 4.4.1. O mecanismo CCA tem a finalidade de identificar se o canal está sendo utilizado por outro nó sensor ou usuário primário. Assim, o CCA e as contenções da transmissão são um mecanismo que diminui a possibilidade de interferir com os PUs.

Por outro lado, as mensagens de dados e confirmação se fundamentam na formatação definida no protocolo IEEE 802.15.4 para as camadas física e subcamada MAC. Porém, o quadro de dados proposto na subcamada MAC é formado pelos seguintes cabeçalhos: *frame control* de 2 bytes, *sequence number* de 1 byte, campos de endereçamento de 4 até 20 bytes, medição ω_{ED} de 1 byte, canal m_{ED} de 1 byte, carga útil de n bytes e *Frame Check Sequence* (FCS) de 2 bytes. É importante ressaltar que os campos de medição ED e canal de medição são adicionados pela MSDAC. Entretanto, o quadro de confirmação proposto na MAC é formado por: *frame control*, *sequence number*, campos de endereçamento, conjunto de canais de acesso de 2 bytes, contador de permanência no canal de 1 byte e FCS de 2 bytes. Note-se que a metodologia proposta de sensoriamento e acesso dinâmico aos canais desenvolvida adiciona poucas informações às mensagens. Só dois bytes são adicionados ao quadro de dados para permitir que o nó sensor envie o canal de sensoriamento escolhido aleatoriamente (m_{ED}) e a medição por ED realizada (ω_{ED}). Similarmente, três bytes são necessários no quadro de confirmação para o correto funcionamento da metodologia proposta: m_o , m_f e δ .

4.4.3 Restrição temporal

Nesta seção são definidas as diversas variáveis de tempo da metodologia desenvolvida junto com suas relações. Considere primeiro a periodicidade com a qual as informações são enviadas desde o sensor até o líder. Este período de tempo é chamado tempo de sensor (T_S). O T_S depende da aplicação, por exemplo, nós sensores que publicam uma medição de temperatura a cada 2 segundos. O T_S abrange os diversos processos que realiza um nó sensor (4.11), i.e., comunicação (T_{com}), processamento (T_{pro}), detecção por energia (T_{ED}) e modo baixo consumo (T_{sleep}). O tempo de atividade é a soma dos tempos de comunicação, ED e processamento ($T_A = T_{pro} + T_{ED} + T_{com}$).

$$T_S = T_{pro} + T_{ED} + T_{com} + T_{sleep} \quad (4.11)$$

Na avaliação experimental da metodologia descritos no capítulo 5 é usado um $T_S = 500\text{ms}$. Na Figura 4.7 são mostrados os tempos envolvidos em cada atividade do sensor nos testes experimentais. O $T_{com-opt}$ representa o tempo ótimo utilizado em realizar uma comunicação bem sucedida (sem retransmissões), este envolve a transmissão de um quadro de dados de 82 símbolos (41 bytes), um tempo de *turnaround* de 12 símbolos (MC1322X, 2012) e a recepção do quadro de confirmação de 20 símbolos (10 bytes). A relação entre os diversos tempos associados ao sensor pode ser observada na Figura 4.7. Nota-se que os tempos de CCA e *backoff* não são utilizados, porém, eles devem ser considerados nas simulações.

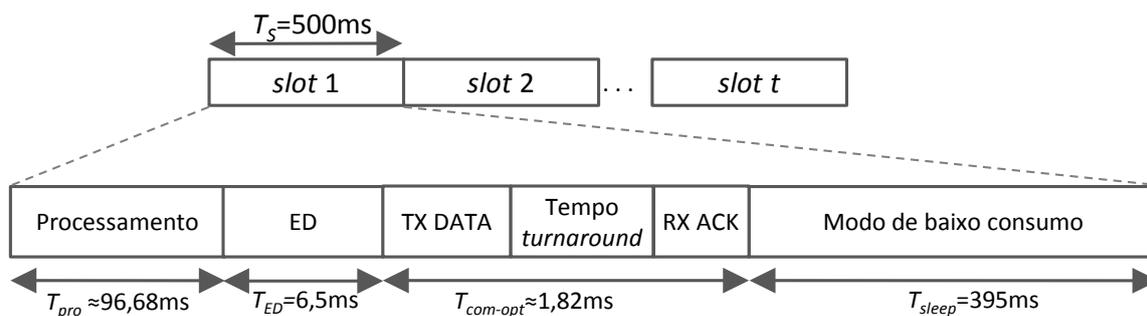


Figura 4.7: Detalhes dos tempos do sensor no caso experimental.

Na metodologia proposta é considerado que o sensor realiza primeiro a aquisição e processamento de dados, em seguida realiza a tentativa de comunicação e finalmente entra em modo de baixo consumo de energia. T_{pro} é o tempo que demora em adquirir e processar uma determinada informação, por exemplo, leitura de uma porta associada a um sensor de pressão. Em condição normal, T_{pro} é um tempo relativamente estável. Por outro lado, o T_{com} é um tempo variável relacionado com quatro fatores: a modulação e espalhamento usados, o tamanho das

mensagens, o método de acesso utilizado e a quantidade de retransmissões possíveis. Por exemplo, com base no padrão IEEE 802.15.4 (2,4GHz), o tempo de comunicação entre um TX e um RX (comunicação direta) pode assumir valores entre 2,2ms e 28,68ms. Estes tempos são obtidos somando: o quadro de dados de 64 bytes (1,024ms), o quadro de confirmação de 14 bytes (0,224ms), dois CCA de 20 símbolos cada (0,64ms) e um T_{BCKF} que pode assumir valores entre 0,32ms ($NB = 1$ e $rand\{2^{BE} - 1\} = 1$) e 26,8ms ($NB = 4$ e $rand\{2^{BE} - 1\} = 31$) como mostrado na Figura 4.8. Os tempos T_{BCKF} são obtidos usando o algoritmo CSMA/CA da Figura 4.6 e parâmetros $NBmax = 4$, $NBmin = 0$, $BE_{max} = 5$ e $NBmin = 4$. Retardos associados à propagação são desconsiderados (e.g., *time over air*). Além disso, caso sejam necessárias retransmissões, o T_{com} pode aumentar ainda mais.

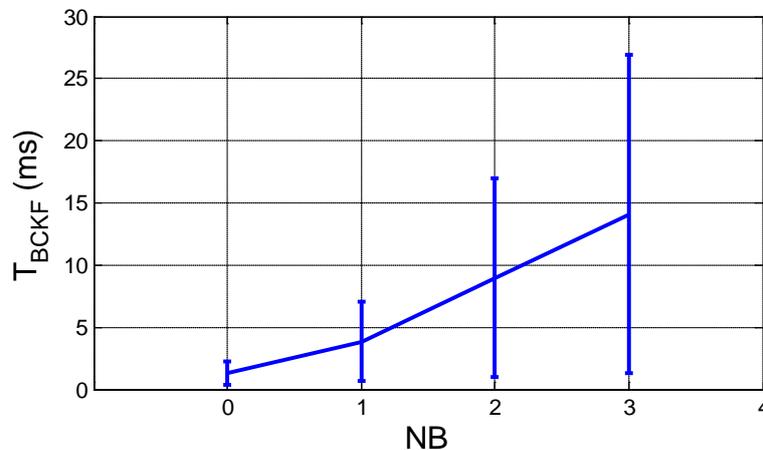


Figura 4.8: Tempos de *backoff* para quadro níveis de NB.

Neste trabalho, o tempo de sensor é considerado constante. Deste modo, em um sensor o tempo restante de processamento, ED e comunicação é investido no modo *sleep* garantindo que o valor T_S não seja ultrapassado (*duty cycle*). Adicionalmente, o tempo no canal deve ser muito maior que o tempo de sensor para conseguir que o líder de *cluster* detecte sequências de mensagens dos sensores em uma época de comunicação ($T_{CH} \gg T_S$). Isto é importante para manter o enlace entre sensor e líder conforme são sintonizados dinamicamente os canais, como é descrito na próxima seção. Nos resultados, o desempenho da RSSF é bom quando T_S é dez vezes menor que T_{CH} . Um $T_{CH} = 10T_S$ garante que o sensor troque dados em vários momentos mantendo o enlace ativo com o líder. Entretanto, valores altos de T_{CH} significam que o líder vai permanecer muito tempo no m_0 sem realizar sensoriamento e caso ocorrer um aumento na atividade primária naquele canal a RSSF poderia experimentar uma queda de desempenho (este assunto deve ser pesquisado futuros trabalhos). Valores recomendados como tamanho da época são: $10T_S \leq T_{CH} \leq 20T_S$.

$$T_{CH} = \delta_{Max} T_S \quad (4.12)$$

O parâmetro δ_{Max} indica um número máximo de comunicações possíveis entre sensor e líder em uma determinada época. O contador de permanência é definido como o tempo restante para começar a utilização do canal futuro (CAS(2)).

O contador de permanência é $\delta = \delta_{Max}$ no início da época e decresce ao logo do tempo até zero, resultando na troca de canal definida nas equações (4.8) e (4.9). Isto pode ser visto no exemplo da Figura 4.9, já que o conjunto CAS do líder muda de {A; B} para {B; C}. Este processo é repetido indefinidamente pelo líder como tem sido discutido em seções prévias. O líder atualiza as informações CAS e δ de forma autônoma, porém, no sensor esta atualização depende principalmente das informações recebidas durante a troca de dados.

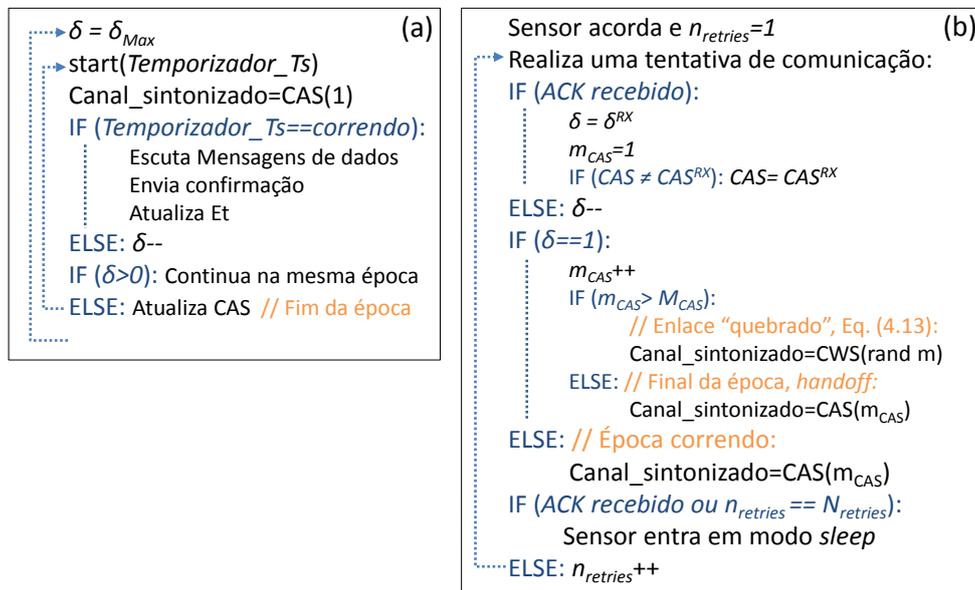


Figura 4.10: Pseudocódigos de escolha de canal: a) líder e b) sensor.

Entretanto, o processo para trocar o canal é diferente desde o ponto de vista do nó sensor. A Figura 4.10b apresenta o pseudocódigo deste processo. As informações repassadas pelo líder na mensagem de confirmação são fundamentais porque ajudam a manter a confiabilidade das informações CAS e δ no sensor.

Os três parâmetros utilizados pelo sensor durante a transferência de canal são: CAS, o δ e a posição associada ao conjunto de canais de acesso (m_{CAS}). Este último indica a posição do elemento dentro do conjunto CAS que deve ser utilizada como canal de operação (canal sintonizado), ou seja, m_{CAS} assume valores entre 1 e M_{CAS} . Diferentemente do líder que sempre usa CAS(1) como canal de operação, o sensor pode utilizar os dois elementos do conjunto CAS como canal sintonizado. Além disso, a variável m_{CAS} é usada pelo sensor para saber quando o

líder é perdido de vista, i.e., quando, depois de duas épocas consecutivas ($m_{CAS} > M_{CAS}$) não se tem recebido um ACK. Isto indica uma perda de confiabilidade nas informações CAS e δ , implicando que o sensor declare o enlace com líder como “quebrado”, para após executar uma rotina de busca ao longo dos canais CWS.

O processo realizado pelo sensor para manter o enlace com o líder é mostrado na Figura 4.10b. Três situações podem acontecer para atualizar os parâmetros do sensor: comunicação bem-sucedida, comunicação malsucedida e a troca de canal. Quando é recebida uma mensagem de confirmação, o sensor realiza o seguinte processo: atualiza CAS caso seja diferente daquele recebido no ACK (CAS^{RX}), atualiza δ com o contador recebido (δ^{RX}) e inicializa a posição de elemento ($m_{CAS} = 1$). Se terminada uma tentativa de comunicação, não é recebida a mensagem de confirmação (comunicação malsucedida), o sensor decrementa autonomamente o seu contador δ antes de entrar no modo *sleep* (por ex., $\delta = 5$ ou $\delta = 4$ da primeira época), as demais variáveis do sensor não mudam. Isto permite prever de forma aproximada quando o líder realizará a mudança de canal, caso não sejam recebidas mensagens de confirmação por um determinado tempo.

Quando o contador de permanência do sensor atinge a unidade ($\delta = 1$), é interpretado que o canal de operação está prestes a ser mudado pelo líder e então a transferência de canal é desencadeada (troca de canal). Assim, o sensor incrementa m_{CAS} para utilizar o canal futuro do conjunto de canais de acesso (CAS(2)). Entretanto, o canal CAS(1) fica inválido para uso até que o sensor receba uma mensagem de confirmação que o atualiza com valores confiáveis dos parâmetros para recomençar o processo assíncrono de transferência de canal. Este procedimento é mostrado na Figura 4.9. Observa-se que, na troca de canal, o sensor incrementa m_{CAS} estabelecendo ‘B’ como canal de operação até quando recebe uma mensagem de confirmação do líder que atualiza suas variáveis da forma: $CAS=\{B; C\}$, $\delta = \delta_{Max}$ e $m_{CAS} = 1$. Em resumo, as variáveis do sensor são atualizadas com base na informação derivada da comunicação e caso não seja recebida nenhuma informação antes de entrar no modo *sleep*, o sensor autonomamente decrementa o seu contador δ . Adicionalmente, se este contador atinge um ($\delta = 1$), o sensor incrementa m_{CAS} e inicializa o contador ($\delta = \delta_{Max}$) com o objetivo de utilizar o canal futuro (CAS(m_{CAS})) onde provavelmente está o líder. Por último, declara-se o enlace “quebrado” se $m_{CAS} > M_{CAS}$. O sensor deixa de confiar no seu conjunto de canais de acesso e no contador de permanência no canal. A escolha de canal torna-se então aleatória considerando o conjunto CWS. O canal de operação é escolhido com uma variável aleatória X_0 com probabilidade uniformemente distribuída de acordo com (4.13) sobre o conjunto CWS.

$$X_0 \sim f_{X_0}(x_0) = \begin{cases} 1/M, & 0 < x_0 \leq M \\ 0, & x_0 > M \end{cases} \quad (4.13)$$

Esta escolha é realizada a cada tentativa de comunicação, ou seja, a cada T_s segundos. O objetivo deste procedimento é procurar uma resposta por parte do líder para retornar o enlace à normalidade.

4.5 ALGORITMOS DOS DISPOSITIVOS

Nesta seção são descritos os algoritmos dos dispositivos que permitem a implementação prática dos conceitos definidos pela metodologia de sensoriamento e acesso dinâmico aos canais proposta.

4.5.1 Líder

Os principais processos inerentes ao líder de *cluster* são: troca de dados com os sensores, coleta das informações de sensoriamento, realimentação do modelo de aprendizagem, geração de mensagens de confirmação, permanência no canal de operação por um determinado tempo T_{CH} , escolha adaptativa de novos canais de operação e mudança de canal.

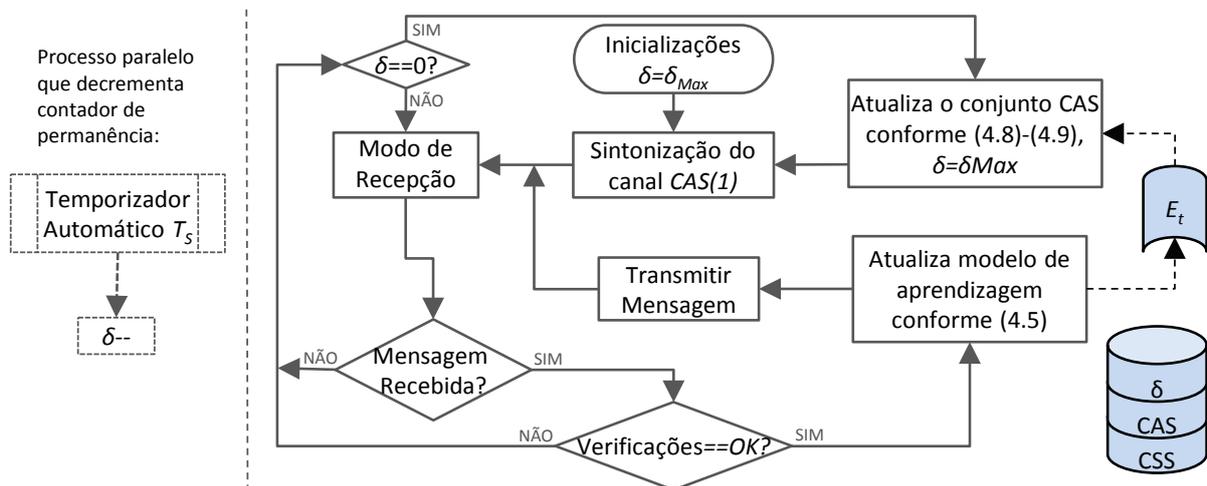


Figura 4.11: Diagrama do algoritmo operacional do líder.

O fluxograma dos processos realizados pelo líder é apresentado na Figura 4.11. Porém, este diagrama foca-se na metodologia desenvolvida e não apresenta outros processos e variáveis relacionados com o funcionamento normal do líder (por ex., a estrutura da mensagem, ou variáveis de controle interno). A seguir são definidos os passos do algoritmo da Figura 4.11:

O sensor tem a responsabilidade de realizar medições de energia em um canal aleatório e comunicar o resultado ao líder na mensagem de dados. O contador de permanência e o conjunto CAS são guias para a sintonização do canal, mas, a sintonização torna-se aleatória caso seja perdida comunicação com o líder. O sensor também deve entrar em modo de baixo consumo e processar dados, por exemplo, a leitura de uma variável do ambiente de aplicação. Na sequência é definido um pseudocódigo do algoritmo de funcionamento do sensor:

- a) Inicializações, definição de variáveis e funções, e no caso da metodologia proposta são inicializados o contador de permanência e o CAS;
- b) Processamento, execução de funções relacionadas à aplicação do nó sensor, por ex., medição de um sensor temperatura associado ao nó e inicialização de retransmissões;
- c) Seleção de canal de sensoriamento (4.4) e medição da energia conforme seção 4.3.1;
 - c.1) Verificação de contador de permanência;
 - c.1.1) Se δ é igual a um, se deve realizar a transferência de canal, assim, δ é inicializado com δ_{Max} e a variável m_{CAS} é incrementada, ir para “d”;
 - c.1.2) Se $\delta > 1$, ir para “d”;
 - d) A estrutura da mensagem DATA é atualizada para enviar o cabeçalho, a carga útil de informação e a medição de sensoriamento realizado previamente;
 - e) Seleção de canal;
 - e.1) Se $m_{CAS} \leq M_{CAS}$, sintonização do respectivo canal do conjunto CAS;
 - e.2) Se $m_{CAS} > M_{CAS}$, significa enlace “quebrado” e a seleção de canal torna-se aleatória para procurar uma resposta do líder;
 - f) Verificação do número de retransmissões ($n_{retries}$) possíveis;
 - f.1) não atingido, então: $n_{retries} = n_{retries} - 1$ e é realizada uma tentativa de comunicação usando o *unslotted CSMA/CA*;
 - f.1.1) tentativa malsucedida, ir para “e” para uma nova tentativa;
 - f.1.2) tentativa bem-sucedida, esperar a mensagem de resposta do líder;
 - f.1.2.1) Sem resposta, ir para “e” para uma nova tentativa;
 - f.1.2.2) Resposta recebida, atualizar δ e CAS caso sejam diferentes daqueles enviados pelo líder e inicializar m_{CAS} , e ir para “g”;
 - f.2) atingido, como não foi recebida, $\delta = \delta - 1$, e ir para “g”;
 - g) Entrar no modo *sleep*, terminado este tempo acordar e ir para “b”.

Um aspecto importante do algoritmo operacional do sensor é que existe um temporizador ajustado ao tempo T_S que roda paralelamente. Este permite acordar o sensor para

realizar seu processamento interno (“b”), deste modo, o sensor realiza suas tarefas com periodicidade T_S . Note-se que as tarefas de sensoriamento e comunicação são realizadas antes de entrar em modo *sleep* e o início do temporizador acontece na saída do *sleep*. Por último, no algoritmo da Figura 4.12 é possível ter um enlace complementar com um *cluster* vizinho. Para isto deve ser usado um conjunto adicional de variáveis (δ , m_{CAS} , CAS e CSS) junto um identificador de enlace (i_e) com, $i_e = 1$ no caso do *intra-cluster* e $i_e = 2$ para representar o *inter-cluster*. Deste modo, o processo de comunicação *inter-cluster* começaria antes de entrar no modo *sleep* (“g”). Naquele ponto o i_e seria incrementado para repetir o processo desde o passo “c1”, mas, para o enlace $i_e = 2$.

4.6 RESUMO

Este capítulo apresentou a proposta de uma nova metodologia de sensoriamento e acesso dinâmico aos canais para uma RSSF. Primeiramente, o modelo de rede e um resumo da metodologia proposta são apresentados. O objetivo é representar os elementos e as interações que formam a metodologia. Além disso, características e assuntos relacionados ao modelo de rede considerado foram discutidos. Em segundo lugar, a política de sensoriamento espectral e o modelo de aprendizagem são definidos como pares complementares cujo objetivo é permitir ao *cluster* adquirir conhecimento do comportamento de um conjunto de canais ao longo do tempo. Em seguida, o projeto do mecanismo assíncrono de coordenação e acesso é apresentado. Este mecanismo habilita a comunicação, a seleção dinâmica de canais e a transferência de canal de forma adaptativa e assíncrona entre os dispositivos do *cluster*. Finalmente, são mostrados os algoritmos funcionais dos dispositivos que implementam a metodologia desenvolvida.

5 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo é verificado e avaliado o funcionamento da metodologia MSDAC proposta no contexto das RSSF. Para alcançar este objetivo são utilizadas uma plataforma de simulação e um estudo de caso experimental. Para começar é descrita a plataforma de simulação de rede junto com suas principais características. Na sequência é definido o estudo experimental que abrange assuntos que vão desde a definição do estudo de caso, as características do experimento, as programações dos sensores até os resultados obtidos.

5.1 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

A plataforma de simulação de rede é projetada para realizar testes do funcionamento da metodologia MSDAC. Esta permitiu o desenvolvimento e verificação dos diversos conceitos associados à metodologia. Graças a sua funcionalidade, versatilidade, simplicidade e suporte, o Matlab é selecionado como software de simulação. Outras ferramentas de simulação não foram consideradas pelo tempo de aprendizagem associado e porque a maioria delas são de código fechado, porém, a plataforma de simulação desenvolvida é mais versátil e a licença do Matlab é de uso institucional. Para ajudar no entendimento da plataforma de simulação, esta seção é dividida em três partes que discutem ordenadamente: o modelo de simulação, o cenário simulado e os resultados alcançados.

5.1.1 Modelo de simulação

A finalidade da simulação é criar um ambiente virtual que permita a interação entre PUs presentes em uma determinada banda CWS e SUs representados por uma RSSF. O modelo realiza uma abstração das camadas física e de acesso ao meio dos dispositivos para simular o comportamento das redes ao longo do tempo. Na Figura 5.1 é apresentado de forma geral o diagrama de classes do modelo de simulação. Nota-se as ligações existentes entre as diversas partes do modelo, que permitem simular o comportamento e a influência mútua das redes. A interação entre os dispositivos se dá ao nível de símbolos, i.e., a recepção de um símbolo por um dispositivo específico depende do ruído e da intensidade dos demais símbolos interferentes presentes no canal de operação naquele instante de tempo. Conseqüentemente o tempo é dividido em *slots* (t_s), tipicamente de $32\mu s$, que representam a transmissão de um símbolo de 8 bits. O

modelo de simulação de rede é realizado em duas etapas: pré-processamento e execução. Na primeira, todas as variáveis, parâmetros e objetos são definidos. Na execução, vários laços que percorrem o tempo, as redes (primárias e secundária) e os dispositivos, implementam a simulação. Na próxima seção são descritas as diversas partes do modelo de simulação.

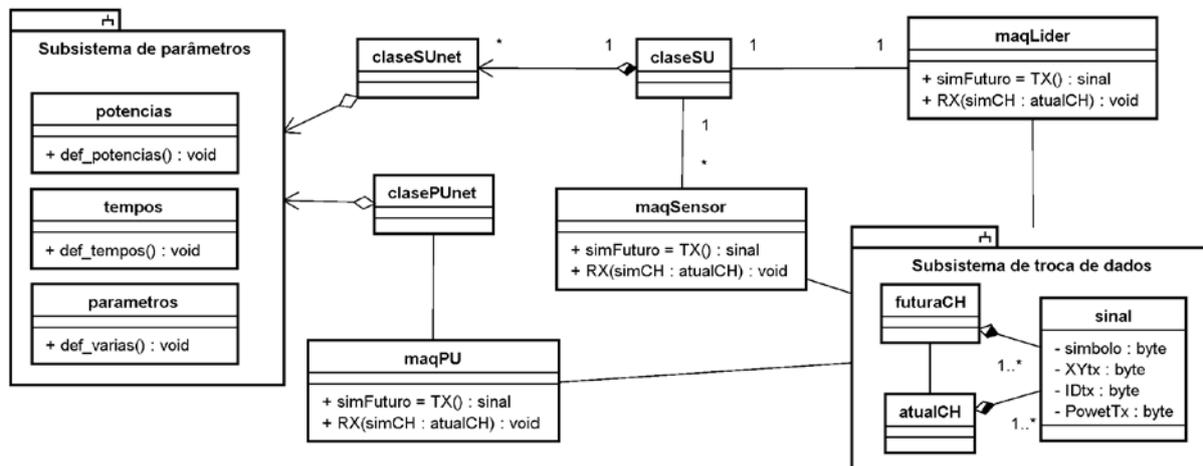


Figura 5.1: Diagrama de classes do modelo de simulação.

5.1.2 Subsistema de parâmetros

O *subsistema de parâmetros* é o conjunto de parâmetros consultado pelas diversas partes do modelo de simulação. Três classes conformam este subsistema: *tempos*, *potências* e *parâmetros*.

A primeira classe define a maioria de assuntos relacionados com variáveis de tempo. Uma instância de *tempos* é consultada ao longo da simulação por alguns elementos do modelo, por exemplo, os nós secundários utilizam uma instância de *tempos* recebida na etapa de pré-processamento para implementar seus processos de comunicação, já que na classe *tempos* são definidos tanto os períodos de comunicação quanto os parâmetros de *backoff*. A Tabela 3 apresenta os parâmetros que compõem a classe *tempos*. Os parâmetros de *backoff* do algoritmo CSMA/CA são definidos segundo (DE GUGLIELMO; ANASTASI; SEGHETTI, 2014).

Em segundo lugar, a classe *potências* agrupa parâmetros utilizados pelos dispositivos na transmissão e recepção de símbolos. Como potência de TX primária é utilizada a quinta parte de 17dBm (potência característica roteador WLAN), i.e., porque o canal ocupado tem BW de 4MHz que representa aproximadamente $\frac{1}{5}$ da largura de banda de um canal WLAN (IEEE 802.11AB STD, 2003) real. A distância típica de alcance (d_{PU}) de um roteador WLAN considerando boas condições de propagação é de 100 metros.

Tabela 3: Elementos do subsistema de parâmetros

<i>tempos</i>		<i>potências</i>		<i>parâmetros</i>	
Parâmetro	Valor ⁴	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Tempo de símbolo	$t_S=32\mu s$	Potência de TX primária	$P_P=10mW$	Tempo total de simulação	$T=4687200$
Tempo do sensor	$T_S=3906$	Potência de TX secundária	$P_S= P_P/10$	Quantidade de canais de operação	$M=6$
Tempo no canal	$T_{CH}=39060$	Distância de cobertura do PU	$d_{PU}=100m$	Localizações dos PUs	X_p, Y_p
Tempo de CCA (IEEE 802.15.4 STD, 2003)	$T_{CCA}=20$	Ruído no canal	$N_{BW}=3,2e-10mW$	Quantidade de redes primárias	M_{PU}
Tempo de ED	$T_{ED}=200$	Largura de banda canal	$BW=4MHz$	Estatísticas de tráfego primário	$\sigma_{on}, \sigma_{off}$
Tamanho do quadro de dados	$T_{QTX}=122$	Limiar ED	$Th_{ED}=4N_{BW}$	Matriz de localizações dos SUs	X_s, Y_s
Tamanho do quadro de confirmação	$T_{QACK}=22$	Nível sensibilidade do RX	$N1=-100dBm$	Número total de SUs	N
Tempo de <i>sleep</i>	$T_{SLEEP}\approx 2897$	Nível saturação do RX	$N2=-15dBm$	Dimensões do ambiente	X, Y
Mínimo BE	$minBE=2$	Quantidade de máxima de BER tolerável	$minBER=0,05$	Máximo contador de permanência	$\delta_{Max}=10$
Máximo BE	$maxBE=5$	SNR mínima para que exista	$minSNR=-5,5 dB$	Fator de aprendizagem	$\alpha=0,65$
Mínimo NB	$minNB=0$	Distância de alcance de SU ⁵	$d_{SU}=102,4m$	Distância base de separação entre líderes	$d_{Base}=36,2m$
Máximo NB	$maxNB=3$	Distância de referência	$r_o=1m$	Curva de desempenho de DSSS-OQPSK	ϕ'
Unidade de <i>Backoff</i>	$U_{BCKF}=20$	Coefficiente de perda do percurso	$n_o=4$	Desvanecimento por sombreamento	$\sigma_s=0dB$

Na simulação são assumidos uma largura de banda de 4MHz para cada canal primário, um ruído branco Gaussiano N_{BW} associado de -95dBm (COUCH, 2014) e um limiar ED de $4N_{BW}$. A sensibilidade e a saturação dos dispositivos considera as características técnicas de um sensor real (MÜLLER *et al.*, 2012). O modelo de propagação utilizado é o *median path-loss* estudado em (MOLISCH; GREENSTEIN; SHAFI, 2009) cujos parâmetros r_0 , n_0 e σ_s representam a distância de referência, o coeficiente de perda do percurso e o desvanecimento por sombreamento (desconsiderado na simulação), respectivamente.

Por último, a classe *parâmetros* define vários elementos fundamentais para a simulação: as dimensões do ambiente ($X=200m$ e $Y=200m$), o tempo total de simulação, as localizações

⁴ A menos que seja especificado de forma contrária, as variáveis de tempo são expressadas em quantidade de símbolos.

⁵ Calculada para uma potência de transmissão igual a 1mW da forma apresentada na equação (5.2).

dos diversos dispositivos, a quantidade de dispositivos das redes, estatísticas de ocupação e outros. O tempo de simulação é suficiente para observar uma tendência estável dos resultados. Os parâmetros σ_{on} e σ_{off} que quantificam a intensidade do tráfego primário em cada canal será explicada na seção seguinte. Os PUs são localizados mediante a definição manual da matriz $Locp$. Entretanto, a localizações dos líderes e sensores (X_s, Y_s) são definidas de forma automática considerando um vértice da área ocupada pela rede e uma distância mínima entre líderes (d_{Base}).

Na equação (5.1) é definida a distância entre *clusters* (d_{Base}) que depende da distância máxima de alcance (5.2) de uma comunicação secundária, está por sua vez se relaciona com os parâmetros $minSNR$. Assume-se que uma comunicação DSSS-OQPSK é bem-sucedida se a SNR é maior que -5.5dB ($minSNR$) ou de forma equivalente se a BER é menor que 5% ($minBER$).

$$d_{Base} = \frac{d_{SU}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (5.1)$$

$$d_{SU} = \sqrt[no]{\frac{r_0^{no}}{(N_{BW} 10^{(minSNR/10)}) / P_S}} \quad (5.2)$$

Os líderes de *cluster* são colocados segundo o esquema mostrado na Figura 5.2. A distância vertical ou horizontal entre dois líderes vizinhos é d_{Base} . O parâmetro $minSNR$ representa o limiar de SNR para que aconteça comunicação com um BER máximo igual a 5%.

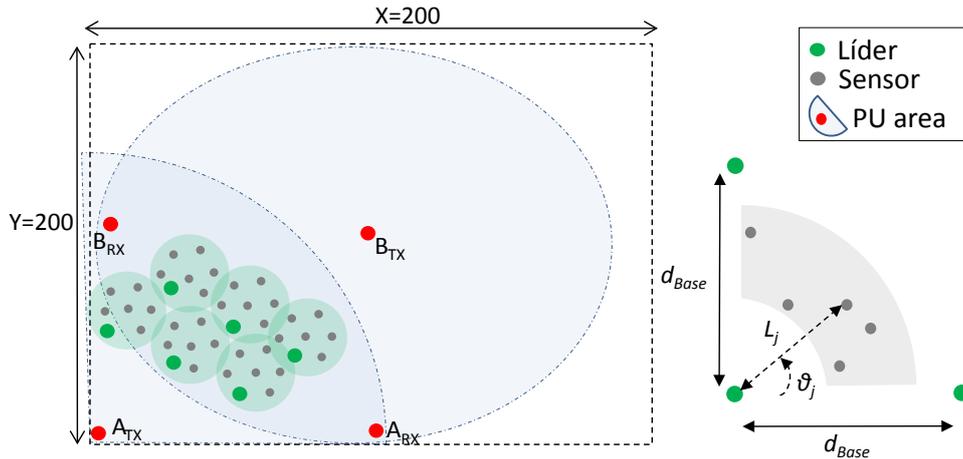


Figura 5.2: Localização dos nós em um ambiente de RF de dimensão X e Y.

Considere um *cluster* formado por J sensores e um líder. A localização dos sensores próximos ao líder é selecionada aleatoriamente em dois passos (veja Figura 5.2). Primeiro, um ângulo aleatório (θ_j) é selecionado para cada sensor j conforme a equação (5.3) cuja quantia x_1

é definida por uma variável aleatória com distribuição uniforme que assume valores entre zero e um. No segundo passo, a distância L_j entre o líder e o sensor é selecionada a partir de uma variável aleatória X_2 com distribuição uniforme conforme a equação (5.4). À direita da Figura 5.2 é mostrada a região (área cinza) onde são distribuídos aleatoriamente os nós sensores, especificamente, com distância até o líder entre 12m e 18,1m (que garante que os sensores se encontrem na área de alcance do líder).

$$\vartheta_j = x_1 \frac{\pi}{2}; \quad \text{onde,} \quad X_1 \sim f_{X_1}(x_1) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x_1 \leq 1 \\ 0, & x_1 > 1 \end{cases} \quad (5.3)$$

$$L_j = x_2; \quad \text{onde,} \quad X_2 \sim f_{X_2}(x_2) = \begin{cases} 6/d_{Base}, & \frac{d_{Base}}{3} \leq x_2 \leq \frac{d_{Base}}{2} \\ 0, & \text{outro caso} \end{cases} \quad (5.4)$$

5.1.3 Redes primárias

A classe *clasePUnet* permite implementar objetos que atuam como PUs. Nela, são definidas as principais variáveis e funções que permitem enviar e receber símbolos em um canal. Esta classe trabalha em parceria com a classe *maqPU*. Em conjunto, elas permitem simular o tráfego das redes primárias alocadas nos canais. A ocupação de um canal por parte de um PU é modelada usando o mecanismo de estado do canal primário utilizado tradicionalmente em CR (JIANG; CHEN; LIU, 2011). Nele o estado do canal alternativamente muda entre ligado (*ON*) e desligado (*OFF*) como apresentado na Figura 5.3 (cadeia de Markov de dois estados).

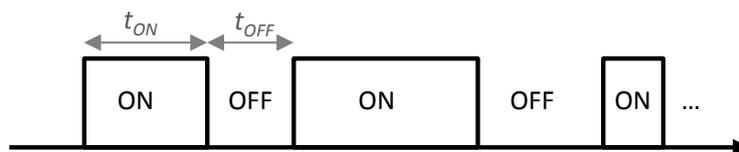


Figura 5.3: Modelo de tráfego primário em um canal.

ON significa que o canal está sendo ocupado pelo PU e *OFF* denota a inatividade do PU (espaço branco). Os períodos dos estados *ON* e *OFF* são definidos por duas variáveis aleatórias T_{on} e T_{off} , respectivamente. Assume-se que as variáveis T_{on} e T_{off} são independentes e seguem distribuições de Rayleigh que geram valores positivos em torno dos parâmetros σ_{on} e σ_{off} (JIANG; CHEN; LIU, 2011). Nas equações (5.5)-(5.6) são mostradas estas distribuições ($f_{T_{on}}$ e $f_{T_{off}}$) cujos parâmetros σ_{on} e σ_{off} representam a escala que podem assumir os tempos ligado e desligado, respectivamente.

$$f_{T_{on}}(t_{on}) = \frac{t_{on}}{\sigma_{on}^2} e^{\left(\frac{-t_{on}^2}{2\sigma_{on}^2}\right)}, \quad t_{on} \geq 0 \quad (5.5)$$

$$f_{T_{off}}(t_{off}) = \frac{t_{off}}{\sigma_{off}^2} e^{\left(\frac{-t_{off}^2}{2\sigma_{off}^2}\right)}, \quad t_{off} \geq 0 \quad (5.6)$$

Uma rede primária é formada por um PU-TX (ex., uma BS) e um PU-RX (ex., um nó terminal). Uma instância da classe *clasePUnet* realiza o seguinte processo repetitivo: gera um tempo t_{on} conforme (5.5) para a comunicação e seleciona um tempo aleatório usando (5.6) para permanecer em inatividade. A comunicação acontece como segue: o terminal envia um requerimento à BS primária (REQ), a qual responde com DATA e finalmente um ACK é gerado pelo nó terminal. O tempo t_{on} é dividido em três proporções para cada transmissão: 10% para REQ, 80% para DATA e 10% para ACK. O conteúdo das mensagens primárias é aleatório.

5.1.4 Subsistema de troca de dados

Este subsistema permite que todos os dispositivos transmitam ou recebam símbolos em um determinado tempo t_s . Duas classes principais formam este subsistema: *futuraCH* e *atualCH*. Ambas atuam como filas que armazenam instâncias da classe *senal*, que representa um símbolo que está sendo transmitido por um determinado dispositivo. As variáveis contidas por um objeto de *senal* são: símbolo (Ω), posição (XY), identificador (ID) e potência de transmissão (Ptx). A classe *atualCH* é somente de leitura e serve para que os dispositivos realizem a recepção de símbolos como será descrito posteriormente, enquanto que, *futuraCH* é de escritura, permitindo que os dispositivos em transmissão adicionem objetos da classe *senal*. Para cada canal existe uma instância de *atualCH* e *futuraCH* permitindo desta forma gerenciar as comunicações de símbolos em todos os canais do conjunto CWS. O laço repetitivo ao longo dos *slots* t_s para gerenciar as comunicações em um canal faz:

- a) objeto da classe atual assume os valores do *slot* anterior (t_s-1), $atualCH=futuraCH$;
- b) objeto da classe futura é inicializado, $futuraCH=\emptyset$;
- c) os transmissores adicionam seus símbolos (*senal*) no objeto da classe *futuraCH*;
- d) os receptores consultam o objeto da *atualCH* para detectar símbolos e saber o nível de ruído na entrada da antena;
- e) finaliza o *slot* t_s e o processo recomeça de novo para o *slot* seguinte t_s+1 .

Considerando um canal m específico, a classe *atualCH* é formada por K objetos da classe *senal*: como é mostrado na equação (5.7). O primeiro elemento está reservado para o ruído associado ao receptor, deste modo, Ptx_1 é a potência do ruído (No_{BW}).

$$atualCH(l) = \begin{bmatrix} \Omega_1 & XY_1 & ID_1 & Ptx_1 \\ \Omega_k & XY_k & \ddots & Ptx_k \\ \Omega_K & XY_K & \ddots & Ptx_K \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

5.1.5 Rede de sensores secundária

A *claseSU* define um nó secundário considerando dois tipos de nós: sensor e líder. Os componentes que formam os nós são o foco da *claseSU* que deixa os detalhes comportamentais deles para serem definidos pelas máquinas de estado (ex., *maqLide*). Esta classe é uma estrutura genérica que define as variáveis e métodos que habilitam a simulação do comportamento de um sensor secundário. As variáveis da *claseSU* são classificadas segundo sua finalidade:

- a) identificação e endereçamento;
- b) condição, i.e., o estado do nó, o tempo de permanência em um estado (t_{onst}), o canal sintonizado e a potência ajustada;
- c) comunicação e acesso (por ex., NB , $n_{retries}$);
- d) informações de transmissão (por ex., mensagem TX);
- e) informações de recepção (por ex., símbolo recebido ou mensagem final recebida);
- f) variáveis e parâmetros do método proposto, i.e., CAS , CSS , δ , δ_{Max} ou m_{CAS} ;
- g) medição por energia (parâmetros, canal, medição ED ou medição CCA);
- h) desempenho da rede, i.e., mensagens recebidos, mensagens perdidos, DR;
- i) informação do *cluster* no líder (ex., nós membros).

O construtor de *claseSU* serve para inicialização dos parâmetros. Outros métodos desta classe são invocados de forma recorrente pelas máquinas de estados dos nós para realizar, por exemplo, tarefas de comunicação ou medições de energia. Desta forma, a *claseSU* é interpretada como uma abstração da PHY enquanto que as máquinas definidas nas classes *maqLider* e *maqSensor* são uma analogia da camada MAC. A classe *claseSU* abrange os métodos descritos na sequência do texto (Figura 5.4), começando com os públicos para depois passar aos privados. Os métodos chamados dentro da classe *claseSU* são privados: *initPERF()* inicializa variáveis relacionadas com assuntos de desempenho; *geraBER()* permite determinar qual é a porcentagem de bits com erros para uma determinada SINR; e *integridadeQuadroRx()* realiza

algumas verificações para determinar a legitimidade da mensagem detectada quanto a erros de bit, tamanho e destino.

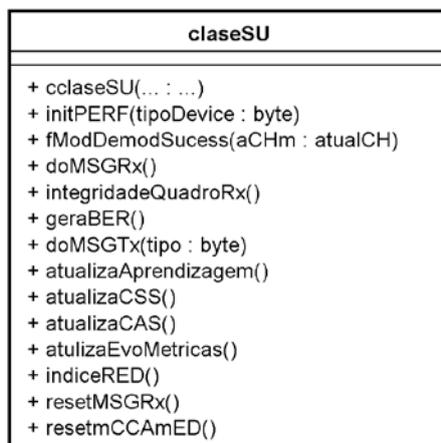


Figura 5.4: Métodos da classe *claseSU*.

Entretanto, aqueles métodos que são invocados por classes diferentes da *claseSU* (e.g., *maqLider*) são públicos: *resetMSGRx()* serve para esvaziar o buffer da mensagem recebida; *resetmCCAmED()* inicializa as variáveis que armazenam as medições de sensoriamento; *indiceRED()* permite determinar a posição que ocupa um membro na informação do *cluster* do líder; *atualizaEvoMetricas()* é usada pelo líder para calcular e armazenar as métricas de desempenho de uma determinada época; *atualizaCAS()* permite ao líder atualizar os conjuntos CAS (conforme (4.8)-(4.9)) e CSS; *atualizaCSS()* permite ao sensor atualizar CSS caso o conjunto CAS tenha mudado; *atualizaAprendizagem()* permite ao líder atualizar a função de aprendizagem (4.5) caso previamente tenha recebido uma mensagem de um sensor; e *doMSGTx()* permite construir uma mensagem de dados ou confirmação com carga útil aleatória para ser transmitida no canal de operação.

Já outros métodos públicos importantes para realizar o processo de recepção e verificação de uma mensagem inteira são: *fModDemodSucess()* e *doMSGRx()*. O objetivo de *fModDemodSucess()* é analisar todos os símbolos presentes no canal, consultando a variável *atualCH* para detectar o símbolo com maior intensidade e salvar: símbolo recebido, identificador do transmissor e SINR associada, além disso, para medições ED é calculada a soma das intensidades de todos os símbolos presentes naquele t_s incluindo o ruído. A intensidade de potência que um nó n recebe de um transmissor k é definida na equação (5.8), com exceção de $k = 1$ que representa o ruído no receptor, i.e., $Prx_1 = No_{BW}$. O parâmetro h_k é o ganho ou perda por propagação (5.9) considerando o modelo *median path-loss*.

$$Prx_k = h_k Ptx_k, \text{ para } k > 1 \quad (5.8)$$

$$h_k = \frac{c}{(4\pi f_m)} \cdot \frac{r_0^{n_0-1}}{(\sqrt{(x_k-x_n)^2+(y_k-y_n)^2})^{n_0}} \cdot S \quad (5.9)$$

Os parâmetros do modelo (5.8) são: a potência de transmissão (Ptx_k), a velocidade da luz (c), a frequência do canal m (f_m), as localizações do receptor $\{x_n; y_n\}$, as localizações do transmissor ($XY_k = \{x_k; y_k\}$) e o desvanecimento por sombreamento $S \sim N(0; \sigma_s)$.

As saídas percebidas pela função $fModDemodSucess()$ são: SINR (γ_s), tipo ($type_s$), identificador (ID_s) e símbolo (Ω_s). Estas definem a informação do símbolo detectado mediante a comparação de todos os níveis de potência recebidos, assim, é escolhido aquele com maior potência RX segundo a equação (5.10), onde $PCrx$ é o conjunto de potências de (5.8).

$$s = \underset{2 \leq k \leq K}{\operatorname{argmax}} PCrx \quad (5.10)$$

A variável $type_s$ define se o símbolo s é primário ou secundário e na equação (5.11) é determinada a relação SINR do símbolo s . Entretanto, $fModDemodSucess()$ também deve gerar a potência total recebida (Prx_o) na entrada do receptor n conforme a equação (5.12).

$$\gamma_s = \frac{Prx_s}{-Prx_s + \sum_{k=1}^K Prx_k} \quad (5.11)$$

$$Prx_o = \sum_{k=1}^K Prx_k \quad (5.12)$$

Já o método $doMSGRx()$ tem a função de juntar ordenadamente os símbolos recebidos para formar a mensagem inteira e de armazenar os bits com erro de todos os símbolos. Este método permite também reiniciar a recepção da mensagem caso o ID do transmissor do símbolo previamente recebido seja diferente do ID do símbolo atual. Considere ψ como o conjunto de símbolos recebidos (mensagem RX) e R como o tamanho variável deste conjunto. Em um dispositivo n em modo de recepção, ψ é construída ao longo do tempo da forma apresentada na equação (5.13). Além disso, o número bits com erro (φ) daquela mensagem é calculado usando (5.14). Estas atualizações acontecem a cada instante de tempo t_s e os valores das variáveis são inicializados caso uma mensagem de fonte diferente seja detectada.

$$\psi = \begin{cases} \Omega_s, & \psi = \emptyset \\ \psi \cup \Omega_s, & ID_s(t_s) = ID_s(t_s - 1) \\ \Omega_s, & ID_s(t_s) \neq ID_s(t_s - 1) \end{cases} \quad (5.13)$$

$$\varphi = \begin{cases} 8\varphi'(\gamma_s), & \psi = \emptyset \\ \varphi + 8\varphi'(\gamma_s), & ID_s(t_s) = ID_s(t_s - 1) \\ 8\varphi'(\gamma_s), & ID_s(t_s) \neq ID_s(t_s - 1) \end{cases} \quad (5.14)$$

Neste caso, a função φ' permite gerar uma porcentagem de bits com erro a partir de γ_s . φ' é a taxa de bits errados em função da relação SINR usando o esquema DSSS junto à modulação OQPSK (IEEE 802.15.4 @2,4GHz). A função φ' mostrada na Figura 5.5 é implementada pelo método *geraBER()* através de uma tabela armazenada em memória cujos dados representam o desempenho da modulação DSSS-OQPSK para um canal AGWN (ALNUAIMI; SHUAIB; JAWHAR, 2006; SHUDONG FANG *et al.*, 2010).

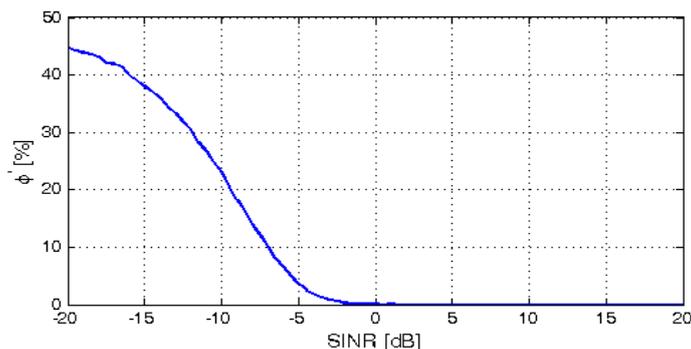


Figura 5.5: Desempenho do esquema DSSS-OQPSK.

Note-se que a faixa de valores SINR é -20 até 20 dB, assim, *geraBER()* permite gerar uma taxa de BER a partir de um valor γ_s . Caso γ_s seja maior a 20 dB ou menor a -20 dB, a taxa gerada será $\varphi'(20)$ e $\varphi'(-20)$, respectivamente.

A construção da mensagem é realizada pelo método *doMSGRx()*, porém, a decisão se a mensagem foi recebida com sucesso ou não é tarefa de *integridadeQuadroRx()*. Este método verifica primeiro que a mensagem seja do tamanho adequado e depois calcula a porcentagem total de bits com erros do quadro recebido para comparação com um limiar de BER. A porcentagem total de BER da mensagem é calculada na equação (5.15), entretanto, a comparação para decidir se a mensagem foi bem-sucedida ou não é realizada em (5.16).

$$\varphi_{final} = \frac{\varphi}{8R} \quad (5.15)$$

$$decisao = \begin{cases} 0, & \varphi_{final} > minBER \\ 1, & \varphi_{final} \leq minBER \end{cases} \quad (5.16)$$

Caso o φ_{final} da mensagem seja menor ou igual ao limiar de BER a comunicação é bem-sucedida e a saída de decisão é representada com o número um. Contrariamente, a decisão é zero se φ_{final} ultrapassa o limiar de BER. A função *integridadeQuadroRx()* é chamada por *doMSGRx()*.

Por outro lado, as classes *MaqLider* e *MaqSensor* executam os algoritmos descritos na seção 4.5. Além disso, a classe *claseSUnet* é simplesmente uma forma de agrupar usuários

secundários (objetos de *claseSU*) para formar uma rede. Nota-se que o modelo de simulação é genérico no sentido que diversos métodos MAC podem ser testados só mudando as máquinas de estados do líder e do sensor.

5.1.6 Pseudocódigo da simulação

O modelo de simulação é fundamentado na técnica de simulação por eventos discretos (*discrete-event*). Nesta técnica, um estado do modelo de simulação pode mudar só quando um evento discreto acontece ao longo do tempo (WEHRLE; GÜNES; GROSS, 2010). A simulação acontece no domínio dos símbolos (camada PHY) e também na camada MAC. O objetivo do modelo é verificar a operação de funcionalidades específicas da metodologia proposta sem necessidade de projetar uma RSSF real. Porém, por sua complexidade e tempo de processamento não é objetivo ser uma ferramenta exata de avaliação do desempenho da rede, para esta finalidade é realizado um estudo experimental que evidencia uma tendência similar aos resultados simulados (como será apresentado em seções posteriores). Um pseudocódigo que representa os diversos procedimentos do modelo de simulação é mostrado na Figura 5.6.

<p>Pré-processamento: Definição de objetos, variáveis e parâmetros.</p>
<p>Execução:</p> <p>Loop1: percorrer o tempo t_s (1:T)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Para todo canal m: $atualCH_m = futuraCH_m$; - Reinicia $futuraCH$ em todos os canais, adicionando ruído: $futuraCH_m(1) = sinal(ruído)$; <p>Loop2: percorrer rede primária (1:M_{PU})</p> <p style="padding-left: 20px;">Executar a maquina de estados primária: $maqPU(m_{PU})$;</p> <p>End Loop2</p> <p>Se t_s é um determinado valor então mudar trafego dos PU; End</p> <p>Loop3: percorrer rede secundaria (1:N)</p> <ul style="list-style-type: none"> Se $Objeto_claseSU.tipo == 'Lider'$ então Rodar maquina líder: $maqLider(n)$; Senão Rodar maquina sensor: $maqSensor(n)$; End <p>End Loop3</p> <p>End Loop1</p> <p>Salvar resultados;</p>

Figura 5.6: Pseudocódigo resumido das etapas da simulação.

Vários laços ao longo do tempo e dos dispositivos permitem simular o comportamento das redes. Os dispositivos interagem ao longo dos *slots* de tempos usando as classes *atualCH* e *futuraCH* descritas previamente. Nota-se que as máquinas dos dispositivos (*maqPU*, *maqLider* e *maqSensor*) interagem com as classes *atualCH* e *futuraCH* para a transmissão ou recepção de um símbolo em um instante t_s . As máquinas do líder e do sensor invocam um objeto n da classe

claseSU. Isto permite simular o comportamento de um dispositivo secundário qualquer. O algoritmo dos sensores segundo a MSDAC (seção 4.5.1) é implementado na classe *maqSensor*, entretanto, o algoritmo do líder proposto pela MSDAC (seção 4.5.2) é programado na classe *maqLider*. As estatísticas de tráfego dos PUs podem mudar se determinados tempos são alcançados. A simulação finaliza quando o tempo T é alcançado e conseqüentemente os resultados são salvos.

5.1.7 Resultados da simulação

Os parâmetros de simulação são definidos na Tabela 3, a menos que seja especificado o contrário. O conjunto CWS é formado pelos canais 11 até 26 da Figura 2.3 com 5MHz de espaçamento e 4 MHz de BW . Com a finalidade de simplificar a simulação, este sistema de canais é usado tanto pela rede primária quanto pela rede secundária. A rede secundária é uma RSSF que utiliza os conceitos da metodologia MSDAC. Já uma rede do tipo WLAN atua como rede primária em cada canal do conjunto CWS. A distribuição física das redes na simulação é apresentada na Figura 5.7.

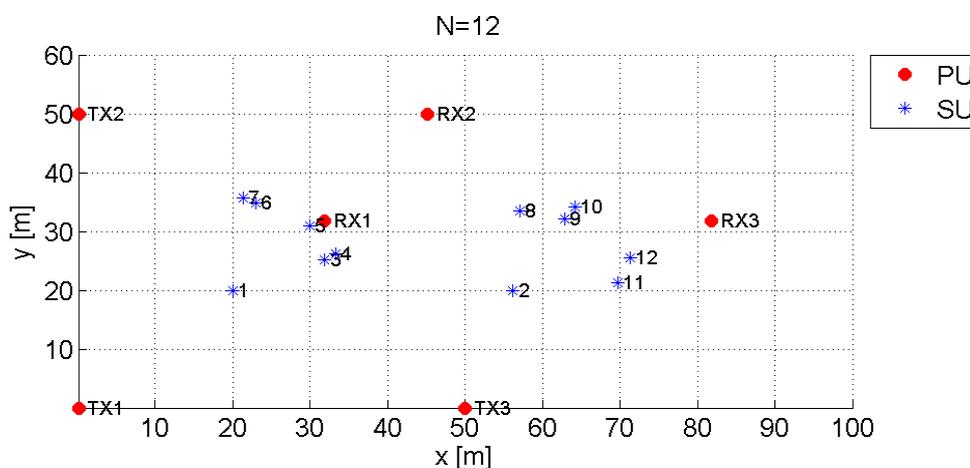


Figura 5.7: Localização dos dispositivos no cenário simulado com $N=12$.

O conjunto de canais de trabalho é formado por seis canais ($M = 6$), entretanto, a quantidade de canais ocupados por PU é $M_{PU} = 3$. Cada rede primária é formada por um TX e um RX localizados nas posições $\{0,1; 0,1\}$, $\{31,9; 31,9\}$, $\{0,1; 50\}$, $\{45,1; 50\}$, $\{50; 0,1\}$ e $\{81,9; 31,9\}$, respectivamente. Dois *cluster* de uma rede de sensores são adicionados ao ambiente simulado, localizando os líderes em $\{20; 20\}$ e $\{56,2; 20\}$ e os sensores conforme descrito na seção anterior.

A Figura 5.8 mostra as atividades realizadas pelos membros do primeiro *cluster* (líder $n=1$) durante uma janela de tempo de 15 épocas de comunicação (18,75 segundos). Uma época de comunicação é igual a 39060 símbolos. Pela dificuldade de mostrar um gráfico tão extenso da simulação, a janela da Figura 5.8a representa 12% do tempo de simulação e apresenta a forma de exemplo como acontecem os processos de comunicação ao longo de tempo e canais. Em cor amarela são mostrados os processos de transmissão de mensagens primárias. Note-se que só três canais têm PUs e que suas comunicações acontecem com $\sigma_{on} = 1250$ e $\sigma_{off} = 750$. Com a finalidade de observar como os nós do *cluster* se adaptam às mudanças do ambiente de RF, os canais de operação das redes primárias são deliberadamente alterados assumindo a cada 8 épocas os três primeiros ou os três últimos canais, isto é, se o resto da operação $t_S/8T_{CH}$ é igual a zero e os canais de operação primária são {1; 2; 3}, então os novos canais de operação serão {4; 5; 6}, entretanto, os canais {1; 2; 3} são escolhidos no caso contrário.

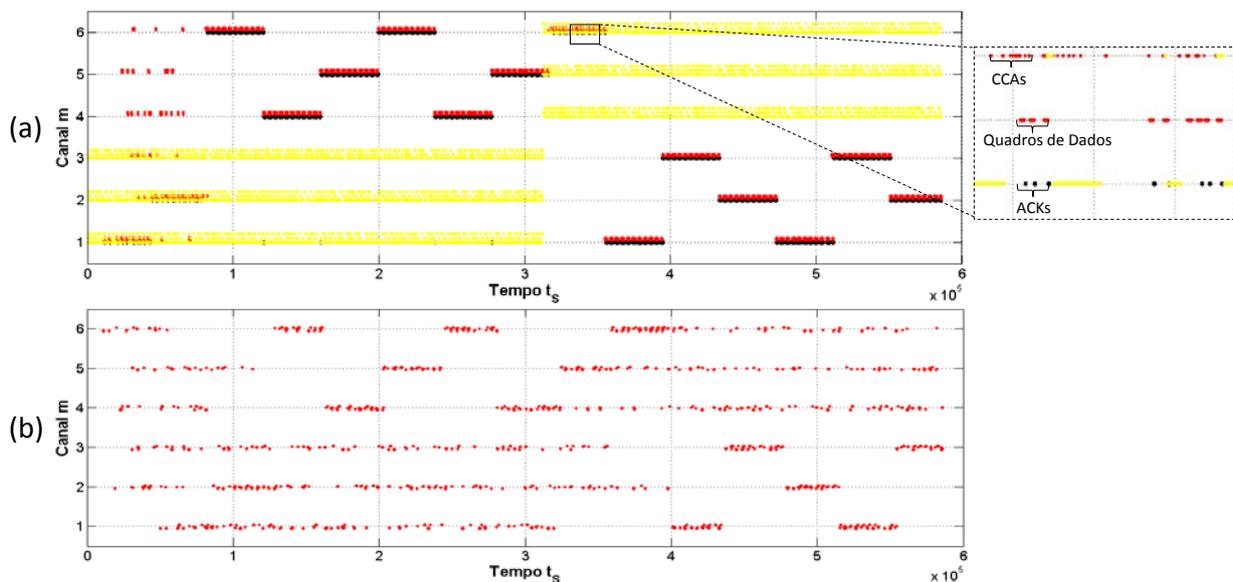


Figura 5.8: Ações dos dispositivos: a) acesso (troca de dados) e b) medições ED.

Na Figura 5.8a também é possível observar as atividades de acesso ao canal dos sensores do *cluster*. Em cor vermelha é mostrado quando um sensor realiza CCA e transmissão de dados e em cor preta, aparecem as mensagens de confirmação transmitidas pelo líder. Nas duas primeiras épocas, os sensores desconhecem o conjunto CAS do líder, assim, as tentativas de comunicação acontecem em todos os canais na procura do líder. A partir da terceira época os sensores conseguem manter atualizado o conjunto CAS, deste modo, seguem o líder ao longo dos canais e do tempo. Quando os PUs mudam drasticamente os canais de operação em $t_S = 8T_{CH}$, os sensores entram em conflito com o PU no canal 6. Isto acontece somente na época 9.

A partir da época 10 os sensores já conseguem identificar aquela mudança no ambiente de RF e começam a selecionar os três primeiros canais.

Em todo momento, os sensores do *cluster* executam a política de sensoriamento espectral definida pela metodologia MSDAC. Na Figura 5.8b são apresentadas as diversas ações de sensoriamento (pontos vermelhos) realizadas pelos sensores. O processo de sensoriamento nos canais CSS acontece em forma paralela às tentativas de acesso dos sensores mediante a execução de medições ED.

Simulação alterando N :

O número de nós sensores N é alterado de 4 até 28 com o objetivo de verificar o funcionamento da MSDAC e analisar a adaptação da rede secundária às mudanças do ambiente de RF. As localizações dos dispositivos e o comportamento dos PUs são os mesmos descritos anteriormente. Na Figura 5.9 é mostrada a evolução da aprendizagem (E_t) no *cluster* 1 cuja quantidade de membros varia em sete situações diferentes: $N_c = \{2; 4; 6; 8; 10; 12; 14\}$.

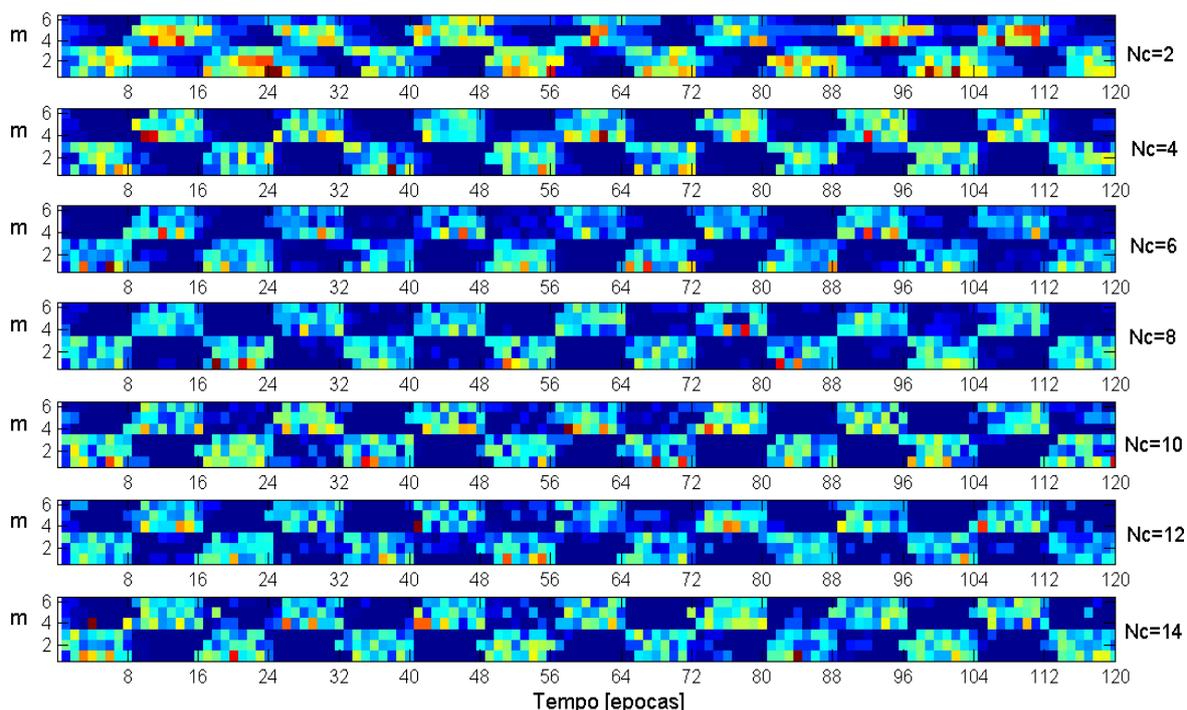


Figura 5.9: $E_t(m)$ no *cluster* 1 em cada época de comunicação.

Em cada situação é apresentada a energia interferente em cada canal m aprendida pelo líder, ao longo de 120 épocas de comunicação. As cores azul escuro indicam um nível baixo de energia medida no canal enquanto que as cores avermelhadas indicam um nível alto de energia.

Os PUs mudam de canais de operação nas épocas múltiplas de 8. Estas mudanças nos padrões de uso dos canais são identificadas pela aprendizagem do *cluster* em todas as situações. Porém, na situação $N_c = 2$, o processo de aprendizagem da energia interferente presente nos canais é mais demorado porque a aquisição de medições ED é realizada por somente um sensor. Entretanto, a partir de $N_c \geq 4$, as mudanças na banda CWS decorrentes do uso dos canais pelos PUs são identificadas de forma quase imediata. Não são observadas diferenças significativas na energia detectada nas situações $N_c \geq 4$. Isto indica que a quantidade de sensores tem pouca influência na aprendizagem considerando o padrão de tráfego primário utilizado e que a partir de certa quantidade de sensores o comportamento é similar, porém, outros padrões de tráfego primário e uma maior quantidade de canais devem ser considerados em futuras pesquisas. Também, a aleatoriedade na escolha dos canais ED pelos sensores leva à detecção das mudanças de RF sem precisar uma fase de exploração na aprendizagem.

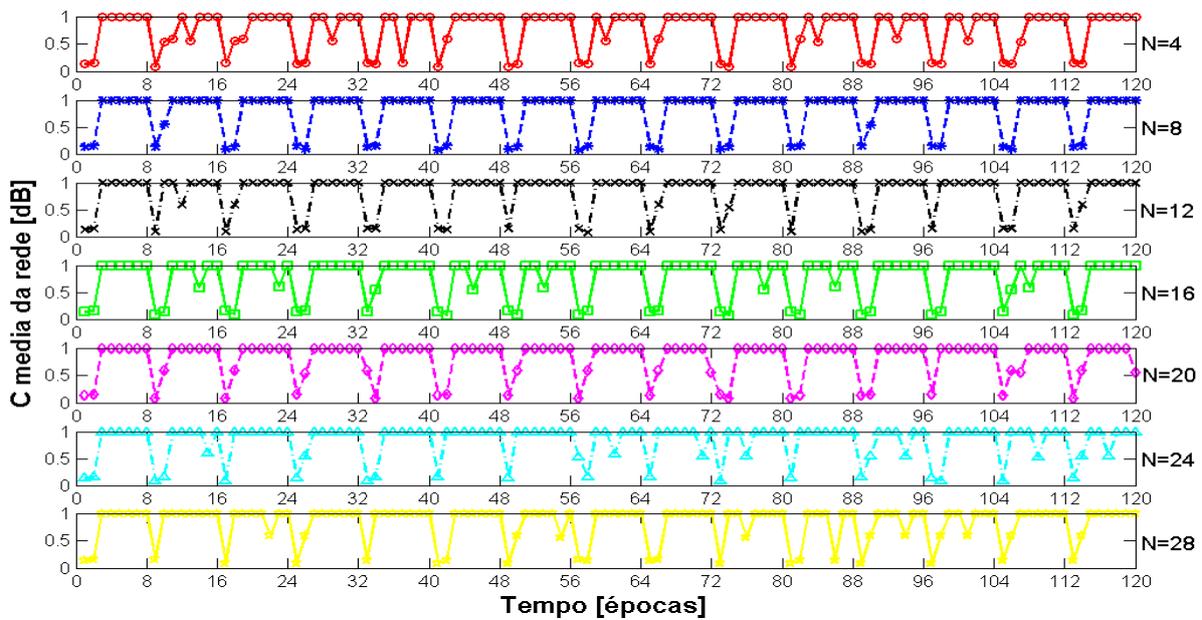


Figura 5.10: Métrica de convergência ao longo do tempo.

Na Figura 5.10 é mostrada a métrica de convergência ao longo das épocas de comunicação obtida nas diversas situações de N . No modelo de simulação, uma métrica nova de convergência (C) é proposta. Esta é uma medição proposta que indica o quão adequado é o canal usado pelo líder em uma determinada época considerando dois pontos de vista: a quantidade de tráfego primário presente naquele canal e a distância entre o líder e PU transmissor (d'). Ao início de uma época, o líder atualiza a métrica de convergência considerando o canal atual de operação (m_o) e as estatísticas de ocupação primária naquele canal ($\sigma_{on}(m_o)$ e $\sigma_{off}(m_o)$). A métrica de convergência é calculada usando a equação (5.17),

onde a parcela C_d representa uma parte da métrica que mede quão afastados se encontram o líder e o PU alocado naquele canal m_o .

$$C = \frac{\sigma_{off}(m_o)}{\sigma_{on}(m_o) + \sigma_{off}(m_o)} C_d \quad (5.17)$$

$$C_d = \begin{cases} 1, & \sigma_{on}(m_o) = 0 \\ \zeta + \frac{(1-\zeta)d'}{\sqrt{X^2+Y^2}-d_{PU}}, & d' \geq d_{PU} \\ \frac{\zeta d'}{d_{PU}}, & d' < d_{PU} \end{cases} \quad (5.18)$$

$$d' = \sqrt{(x_{lider} - x_{Pm_o})^2 + (y_{lider} - y_{Pm_o})^2} \quad (5.19)$$

A parcela C_d calculada na equação (5.18) pode assumir três valores diferentes conforme a circunstância: não existe PU naquele canal ($C_d = 1$), se a distância d' é maior ou não que a distância de cobertura da rede primária (d_{PU}). A distância entre o líder e o usuário primário TX do canal m_o é determinada em (5.19). O parâmetro ζ representa um peso que permite priorizar o fato de que o líder se encontre fora da área de cobertura do PU transmissor. Assim, ζ é assumido igual a 0.8 para indicar que o líder fora ou dentro da área do PU tem uma métrica C_d maior ou menor que 80%, respectivamente. A métrica de convergência assume valores entre zero e um. Valores de C próximos a 1 significam que o líder tem selecionado aqueles canais cujo PU está suficientemente afastado e possuem pouca ou nenhuma atividade primária. Já valores próximos a zero significam que o canal selecionado não é o mais adequado em termos de interferência. A métrica de convergência é uma forma de avaliar o quão adequado é o canal escolhido pelo líder para troca de dados.

Na Figura 5.10 é possível observar o comportamento de C ao longo das épocas para as diversas situações de N . Ressalta-se que em cada situação, os resultados mostrados correspondem à média das métricas C dos dois *clusters* da rede definida na Figura 5.7. Nas diversas situações a rede conseguiu convergir cada vez que uma mudança no uso dos canais pelos PUs aconteceu (a cada 8 épocas). Em todas as situações e na maioria do tempo a RSSF utilizou aqueles canais mais adequados considerando quão livres de interferência estão, por isso, a maioria das vezes C assume valores iguais ou próximos a um.

Apesar dos PUs alternarem seus canais de operação a cada 8 épocas, na Figura 5.10 é observado um bom desempenho na seleção de canal da RSSF. Isto pode ser constatado analisando um valor final C_o que consiste em calcular o valor médio da C média da rede, resultando em $C_o = \{0,761; 0,787; 0,822; 0,762; 0,811; 0,82; 0,807\}$ para as situações de $N=2$

até $N=28$. Em todas as circunstâncias C_O tem uma tendência à unidade indicando que os líderes de *cluster* selecionam os canais com menor atividade primária.

Outra métrica utilizada para avaliação de desempenho é a taxa de entrega de mensagens, que é calculada da forma indicada em (5.20). Com MSG_{RX} representando o número total de mensagens recebidas pelos líderes da RSSF e MSG_{LOSS} sendo o número total de mensagens que não foram detectadas pelos líderes.

$$DR = \frac{MSG_{RX}}{MSG_{RX} + MSG_{LOSS}} \quad (5.20)$$

Na Figura 5.11 é apresentada a taxa DR ao longo das épocas de comunicação. Observa-se como a DR evolui no tempo para cada situação de N . O comportamento nas diversas circunstâncias de N é similar. Somente no início (épocas 1 até 3) é observada uma taxa DR baixa, ocasionada porque os sensores desconhecem os canais CAS do líder e precisam percorrer aleatoriamente o conjunto CWS para encontrar o líder. A partir da quarta época, o desempenho da rede em termos de DR é alto, assumindo na maior parte das épocas valores próximos ao 100%. Além disso, uma pequena diminuição na DR é observada em seguida que os PUs mudam seu canal de operação a cada 8 épocas.

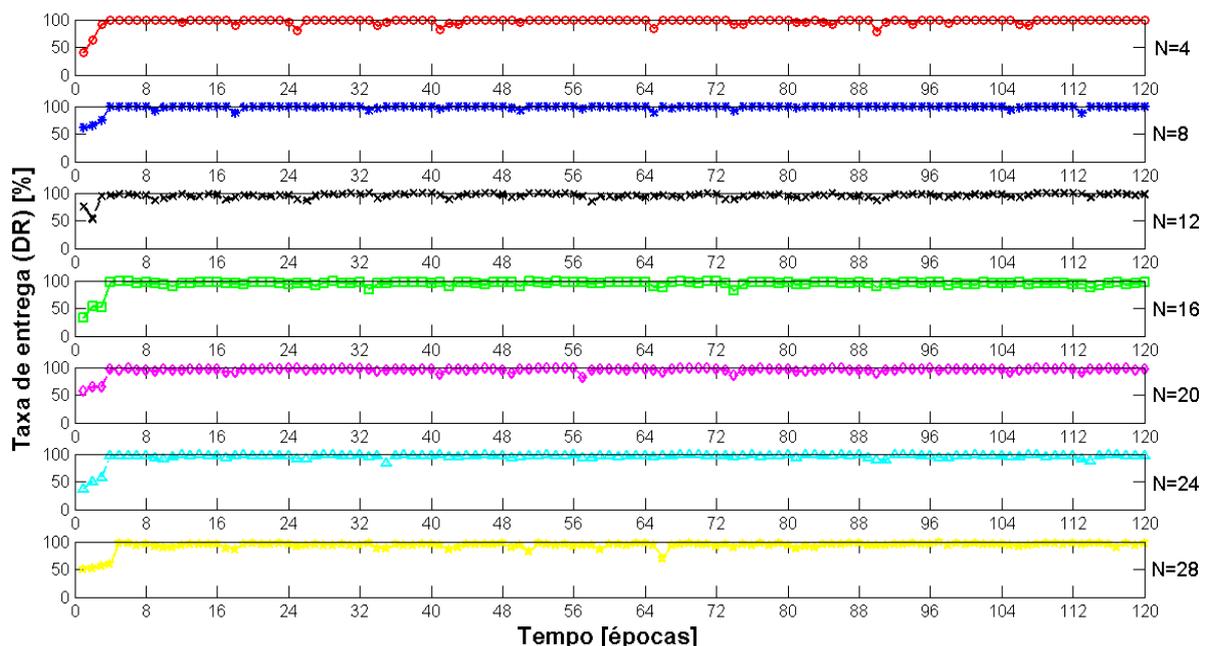


Figura 5.11: Taxa de entrega de mensagens da RSSF.

Note-se que a variação na quantidade de nós da RSSF não altera de forma significativa a DR, mantendo um bom desempenho ao longo das épocas. Isto é devido à alta imunidade ao ruído do mecanismo DSSS-OQPSK, porém, resultados não tão bons quanto a DR podem ser obtidos se um mecanismo de modulação com imunidade ao ruído menor for usado e se

quantidades de sensores maiores forem testadas. Na Tabela 4 são resumidas algumas métricas obtidas na simulação.

Tabela 4: BER e DR da RSSF nas situações de N

Resultado	Situação de N						
	4	8	12	16	20	24	28
Bits com erro	194	1506	189	3012	1323	870	3412
Porcentagem de BER	0,009	0,024	0,002	0,021	0,007	0,004	0,016
Mensagens recebidas	2170	6533	10762	14372	18149	20768	21630
Mensagens perdidas	52	85	540	823	744	918	1741
Taxa de entrega total [%]	97,66	98,72	95,22	94,58	96,06	95,77	92,55

Baixa BER é obtida como consequência de que o líder evita usar aqueles canais com maior nível de interferência. Isto pode ser verificado mediante a observação da evolução do número de bits errados ao longo das épocas que indica maior presença de erros naquelas épocas que sucedem a mudança primária de canal de operação, mesma tendência observada na evolução da DR da Figura 5.11. Em todas as situações de N , a maioria de bits errados acontecem como consequência direta do aumento na interferência no canal de operação da rede de sensores decorrente da mudança dos PUs a cada 8 épocas, porém, a metodologia proposta programada nos *clusters* permite evitar esta interferência, conseguindo minimizar o número de bits errados nas demais épocas. A Tabela 4 também apresenta a DR calculada considerando todas as mensagens recebidas e perdidas nas 120 épocas. Taxas de entrega de mensagens altas são conseguidas em todas as situações de N . Isto é devido ao fato de que os dispositivos do *cluster* selecionam os canais com menor interferência, diminuindo assim as mensagens perdidas. Porém, há uma maior quantidade de mensagens perdidas na medida que N aumenta. Isto pode levar a uma queda no desempenho da RSSF usando MSDAC, portanto, pesquisas com mais nós devem ser realizadas para analisar mais detalhadamente este assunto.

Simulação alterando δ_{Max} :

Para verificar como δ_{Max} afeta o funcionamento da metodologia MSDAC é realizada uma simulação com δ_{Max} assumindo diversos valores. Este parâmetro está relacionado com o tempo de permanência no canal de operação indicando a quantidade de tempos T_S que o líder fica esperando dados em um determinado canal. Neste cenário, a rede de sensores é formada só por um *cluster* (primeiro da Figura 5.7) com seis membros ($N = 6$). As características das redes primárias são as mesmas descritas anteriormente com a exceção que tem sido aumentado o tempo de atividade dos PUs para causar um impacto maior sobre a RSSF, i.e., $\sigma_{on} = 1750$ e

$\sigma_{off} = 250$. O parâmetro δ_{Max} é testado em dez situações diferentes na faixa de 1 até 10 com uma unidade de passo. O tempo de simulação é novamente de 120 épocas, porém, a duração de cada época é diferente, decorrente de sua relação direta com δ_{Max} (4.12).

Na Figura 5.12 é apresentada a evolução da métrica de convergência do *cluster* nas diversas situações de δ_{Max} . Um bom desempenho na seleção dinâmica de canal é observado quando o parâmetro δ_{Max} assume valores maiores ($\delta_{Max} \rightarrow 10$), deste modo, a métrica de convergência tem uma tendência a ficar em 100% apesar das mudanças que os PUs realizam a cada 8 épocas. Por outro lado, o líder seleciona com mais frequência canais com interferência primária (não converge) se o parâmetro δ_{Max} adota valores menores ($\delta_{Max} \rightarrow 1$) e a métrica C fica próxima de zero. A tendência apresentada na Figura 5.12 é resultado da relação entre δ_{Max} e a quantidade de medições ED recebidas pelo líder em cada época.

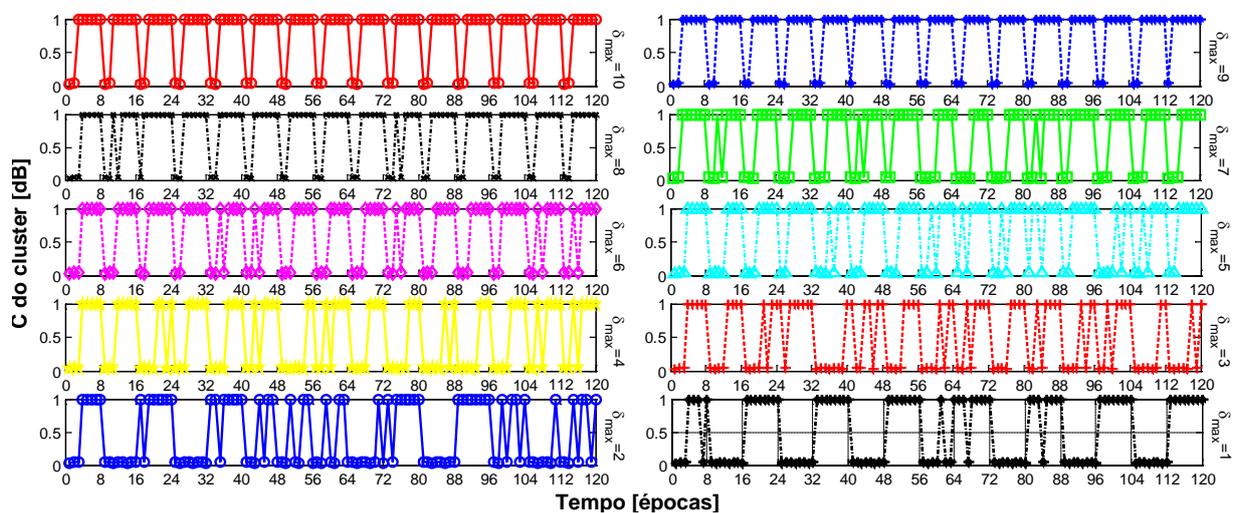


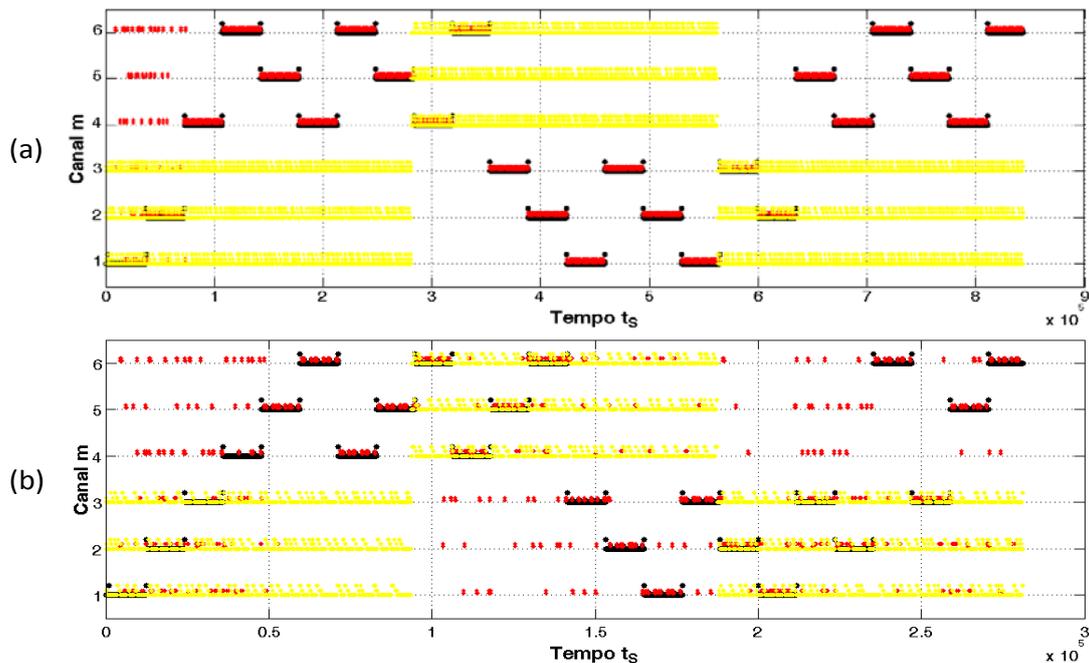
Figura 5.12: Convergência da rede em cada situação de δ_{Max} .

Se δ_{Max} é pequeno, a quantidade de medições ED disponíveis para alimentar E_t é menor e conseqüentemente o líder não consegue reagir adequadamente às mudanças do ambiente de RF. Na Figura 5.12 é observado que quando $\delta_{Max} = 1$, a escolha de canal é ineficiente, porém, quando $\delta_{Max} = 10$, a escolha de canal é mais eficiente porque tem uma tendência definida por aqueles canais livres de interferência ($C = 100\%$). Na Tabela 5 são descritas a DR e a BER para cada variação do parâmetro δ_{Max} . Os valores mostrados na Tabela 5 representam o total acumulados das taxas DR e BER durante todo o tempo de simulação. A taxa de BER é baixa em todas as situações. Entretanto, um indicador relevante é encontrado quando a DR é analisada. DR altas são conseguidas quando o parâmetro δ_{Max} é maior que sete, no entanto, dois tipos de diminuições na DR são observadas: uma moderada, durante a faixa $7 \geq \delta_{Max} \geq 3$ e outra, substancial, quando $\delta_{Max} < 3$.

Tabela 5: BER e DR da RSSF nas diversas situações de δ_{Max}

Resultado	δ_{Max}									
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Bits com erro	2591	3286	3382	2474	2041	1952	1561	1351	1112	184
BER [%]	0,05	0,08	0,09	0,09	0,08	0,10	0,12	0,14	0,23	0,16
Mensagens recebidas	4873	4483	3833	2902	2623	1967	1318	971	489	121
Mensagens perdidas	385	267	340	589	376	518	822	665	746	520
Taxa de entrega total [%]	92,68	94,38	91,85	83,13	87,46	79,15	61,59	59,35	39,59	18,88

Uma vez que valores menores de δ_{Max} tornam mais difícil manter o enlace entre sensor e líder, i.e., o sensor não consegue atualizar adequadamente suas variáveis CAS e δ (procedimento da seção 4.4.4) e deve buscar o líder ao longo do conjunto CWS, gerando consequentemente perdas maiores de mensagens. A pior das circunstâncias é δ_{Max} igual a um, já que os sensores não conseguem acompanhar a mudança de canal do líder ao longo do tempo e precisam constantemente procurar de forma aleatória o líder através dos canais. Isto é exemplificado na Figura 5.13 que compara as atividades do *cluster* em uma situação boa ($\delta_{Max} = 9$) e outra ruim ($\delta_{Max} = 3$). A Figura 5.13a mostra que os sensores seguem o líder ao longo dos canais e do tempo, além disso, só acontecem enlaces “quebrados” na época inicial. Pelo contrário, na Figura 5.13b é observado que os sensores têm ampla atividade (cor vermelha) em canais além daqueles usados pelo líder (cor preta). Esta atividade indica que os sensores estão procurando de forma aleatória o líder através dos canais como resultado das constantes “quebras” dos enlaces entre sensores e líder.

Figura 5.13: Atividade dos dispositivos nos M canais com: a) $\delta_{Max}=9$ e b) $\delta_{Max}=3$.

Simulação alterando tráfego dos PUs:

Um conjunto de simulações alterando as estatísticas de tráfego primário são realizadas. Os seguintes parâmetros de simulação são considerados: $M = 6$, $N = 6$, a $M_{PU} = 3$ e o tempo de simulação é de 50 épocas. Os dispositivos são localizados como mostrado na Figura 5.14.

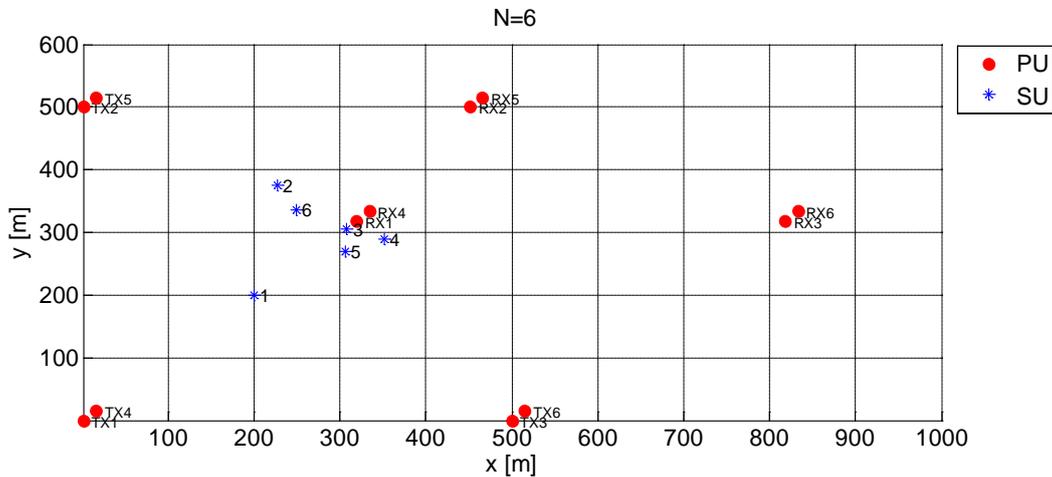


Figura 5.14: Cenário simulado para alteração de tráfego dos PUs.

O perfil de tráfego primário é alterado como é mostrado na Tabela 6. Os canais são divididos em dois grupos, um para os PUs alocados nos três primeiros canais e outro para os PUs alocados nos três últimos. Segundo a Tabela 6, os três últimos canais são mais adequados para comunicação secundária que os três primeiros. No primeiro caso, a diferença entre o grupo $m \leq 3$ e o grupo $m > 3$ é extrema (m é um canal primário qualquer), mas essa relação vai diminuindo até que no nono caso os dois grupos experimentam o mesmo perfil de tráfego. O objetivo é analisar até que ponto a rede com MSDAC consegue diferenciar os melhores canais.

Tabela 6: Estatísticas dos usuários primários em cada simulação

Perfil de tráfego	Caso								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Similaridade entre grupos [%]	0	6,7	14,3	23,1	33,3	45,4	60	77,8	100
σ_{ON} dos PUs nos canais $m \leq 3$	2000	1875	1750	1625	1500	1375	1250	1125	1000
σ_{OFF} dos PUs nos canais $m \leq 3$	0	125	250	375	500	625	750	875	1000
σ_{ON} dos PUs nos canais $m > 3$	0	125	250	375	500	625	750	875	1000
σ_{OFF} dos PUs nos canais $m > 3$	2000	1875	1750	1625	1500	1375	1250	1125	1000

Na Figura 5.15 é apresentada a quantidade de épocas em que o líder do *cluster* seleciona um canal do grupo $m \leq 3$ ou $m > 3$ para operação. A figura mostra os resultados nos nove casos definidos na Tabela 6. Nos três primeiros casos o líder consegue identificar que os melhores canais são do grupo $m > 3$. Em todos os casos (com exceção do caso 9) os três

últimos canais são identificados como os mais adequados para comunicação da RSSF, porém, a partir do sexto caso (similaridade entre os dois grupos de 45,4%) é mais difícil para o líder decidir, e essa dificuldade aumenta à medida que os canais ficam mais parecidos. Possivelmente o uso de mais nós realizando sensoriamento pode ajudar a diferenciar melhor os canais em casos onde os canais primários apresentam tráfego com sutis diferenças, contudo, em um cenário real as diferenças dependem da faixa primária escolhida, por exemplo, os TVWS têm duração de horas, facilitando o sensoriamento realizado pela RSSF. Entretanto, a RSSF não sofre baixo desempenho em termos de DR, atingindo valores próximos a 94% nos nove casos simulados.

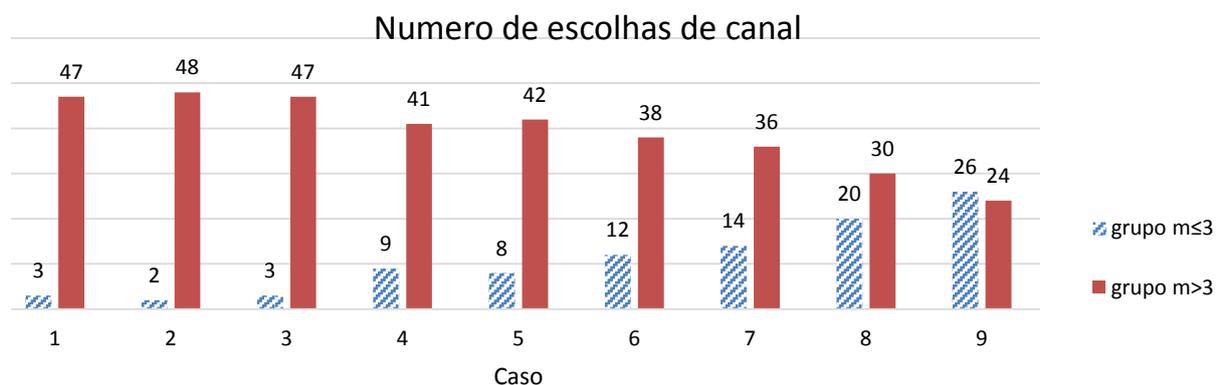


Figura 5.15: Número de épocas que o líder opera em um canal do grupo $m \leq 3$ ou $m > 3$.

O modelo de simulação é uma ferramenta de teste que permite desenvolver a metodologia proposta. De forma rápida, este permitiu realizar verificações de funcionalidades e mudanças de parâmetros sem necessidade de uma implementação real, que implicaria em programação, depuração, gravação e teste. Assim, a metodologia obtida na simulação é utilizada a seguir no estudo experimental.

5.2 ESTUDO EXPERIMENTAL

Nesta seção é definido um estudo de caso que permite avaliar de forma experimental a metodologia MSDAC. Além disso, outras abordagens propostas para acesso dinâmico aos canais no contexto das RSSF são também testadas para comparação. O estudo de caso compreende a banda ISM de 2,4GHz e considera como rede primária uma WLAN e como rede secundária uma RSSF. Os assuntos abordados nesta seção são: a rede primária, a RSSF, características dos cenários de teste e resultados experimentais.

5.2.1 Descrição da rede primária

Como rede primária é utilizada uma WLAN formada por um *Access Point* (AP) e uma estação sem fio. Os dois dispositivos sem fio são programados para operar usando o padrão IEEE 802.11b que consegue teoricamente uma taxa de até 11Mbps. As características mais importantes deste padrão são: o método de acesso ao meio CSMA/CA, a técnica de modulação *Complementary Code Keying* (CCK) e a técnica de espalhamento espectral DSSS. Maiores detalhes do padrão 802.11b podem ser encontrados em (IEEE 802.11AB STD, 2003). O conjunto de canais usado pelos dispositivos 802.11b descrito na Tabela 7 é assumido como banda primária. Esta banda abrange de 2401 até 2495MHz e está constituída de 14 canais sobrepostos com 22 MHz de largura de banda.

Tabela 7: Banda primária

ID. do canal	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
Freq. Central [MHz]	2412	2417	2422	2427	2432	2437	2442	2447	2452	2457	2462	2467	2472	2484
Largura do canal [MHz]	2401-2423	2406-2428	2411-2433	2416-2438	2421-2443	2426-2448	2431-2453	2436-2458	2441-2463	2446-2468	2451-2473	2456-2478	2461-2483	2473-2495

Para gerar tráfego primário é utilizado o esquema mostrado na Figura 5.16. A rede primária é formada por um AP, um computador de controle primário e uma estação sem fio. O ponto de acesso é um roteador WIFI que atua como o transmissor primário (PU-TX), a estação sem fio é um computador portátil cuja função é de recepção primária (PU-RX) e por último, um computador conectado via cabo ethernet ao roteador.

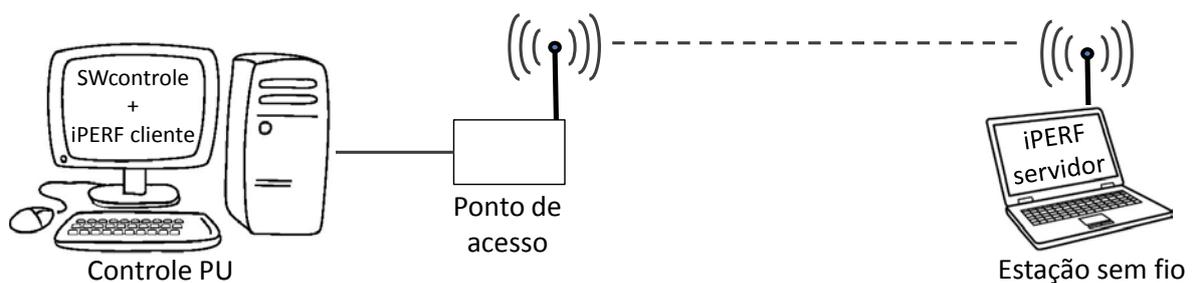


Figura 5.16: Elementos da rede WLAN primária.

O tráfego da rede é gerado utilizando o software iPERF (DUGAN, 2010). Esta ferramenta utiliza um esquema cliente-servidor que permite medir a taxa de dados, o retardo ou a perda de mensagens em situações particulares de tráfego.

A medição realizada pelo iPERF acontece na direção cliente-servidor, i.e., o cliente transmite informação enquanto o servidor fica em modo recepção. Na estação sem fio é alocado

o servidor iPERF e no computador é executado o software do cliente iPERF. Se configurado em modo TCP (*Transmission Control Protocol*), o software mede a taxa de transmissão alcançada através dos meios de comunicação. No entanto, para enviar dados com uma taxa de transmissão específica, por ex., 2Mbps, o iPERF deve ser configurado em modo UDP (*User Datagram Protocol*). Durante os experimentos são utilizados como pontos de acesso, um roteador DIR-600 e um roteador WRT120N cujas características são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Características técnicas dos roteadores

Parâmetro	Equipamento	
	WRT120N	DIR-600
Faixa de operação (GHz)	2.4	2.4
Tecnologias 802.11 suportadas	b-g-n	b-g-n
Potência de Transmissão no 802.11b (dBm)	16.5	17
Ganho da antena (dBi)	2	5
Portas LAN Ethernet	4 @ 10/100Mbps	4 @ 10/100Mbps

A estação sem fio é um Notebook Dell Studio-1555 com as seguintes características: processador Core2Duo P8600 de 2,4GHz, memória RAM de 3GB, adaptador sem fio Intel Link 5100 e sistema Windows 7. Por fim, o controle PU é um computador Lenovo 71Y3516 que atua como cliente iPERF e tem como características técnicas: processador Core2Duo E8400 de 3GHz, memória RAM de 3GB e sistema Windows 7. Adicionalmente, um software controlador (*SWcontrole*) é desenvolvido usando a linguagem Visual Basic. O módulo *SWcontrole* é rodado no computador de controle PU e suas funções essenciais são executar comandos do cliente iPERF e controlar o ponto de acesso. Desta forma, o canal de operação do AP pode ser alterado durante faixas de tempo, já que o *SWcontrole* permite configurar no AP um canal do conjunto da Tabela 7, como canal de operação durante um tempo (T_{PU}). O T_{PU} é o tempo que a rede primária fica em um determinado canal. O objetivo do módulo *SWcontrole* é gerar um padrão de tráfego de forma automática na rede primária que permita analisar como a rede secundária reage às mudanças do PU.

A Figura 5.17a apresenta o padrão de tráfego gerado pelo PU ao longo do tempo. Nota-se que o canal de operação do PU é alternado (entre A1 e A4) a cada 5 minutos (T_{PU}) mediante o módulo *SWcontrole*. Durante a maioria deste tempo o cliente iPERF é ativado para gerar dados, somente dois espaços de silêncio (10 segundos) são deixados ao início e fim para permitir uma adequada configuração do canal de operação no AP. Na Figura 5.17b é mostrado como o módulo *SWcontrole* envia o comando de configuração de canal ao AP e na sequência gera tráfego iPERF com o destino da estação sem fio.

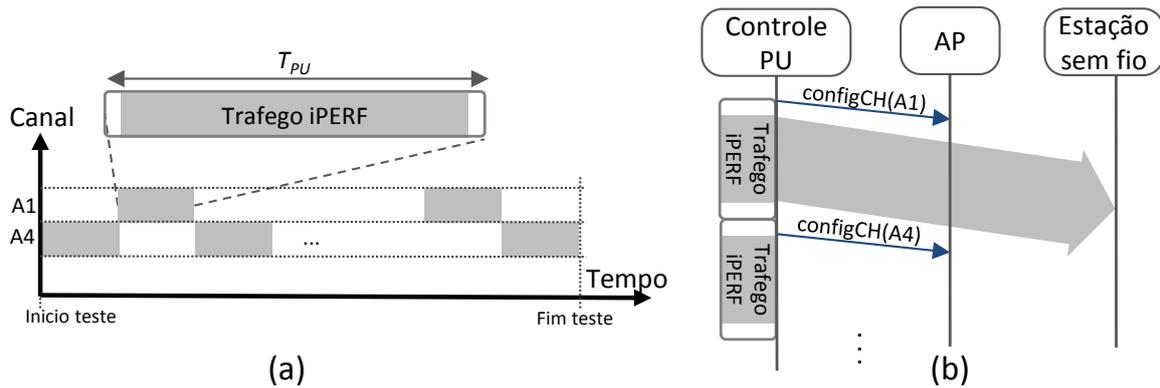


Figura 5.17: Padrão de tráfego do PU gerando com *SW* controle.

Este processo é repetido até atingir um determinado tempo de teste e a quantidade de interferência gerada depende do comando iPERF configurado no cliente.

5.2.2 Descrição da RSSF

A RSSF é formada por um líder e vários sensores. O cenário de aplicação testado contempla nós sensores enviando ao líder diversas medições do ambiente (ex., temperatura, luminosidade, etc.). Um quadro de dados é enviado pelos sensores com uma periodicidade de meio segundo ($T_S = 500ms$). No experimento, a rede de sensores tem o papel de rede secundária e deve ocupar preferivelmente aqueles canais livres de atividade primária. O líder e os nós sensores são implementados usando sensores “Namimote” (MÜLLER *et al.*, 2012), dispositivos desenvolvidos no contexto do projeto Brasileiro INTC Namitec. O Namimote é uma unidade de nó sensor de baixo custo e de múltiplo propósito usado para aquisição de variáveis. A Figura 5.18 apresenta um nó Namimote e um diagrama de blocos com seus elementos constitutivos.

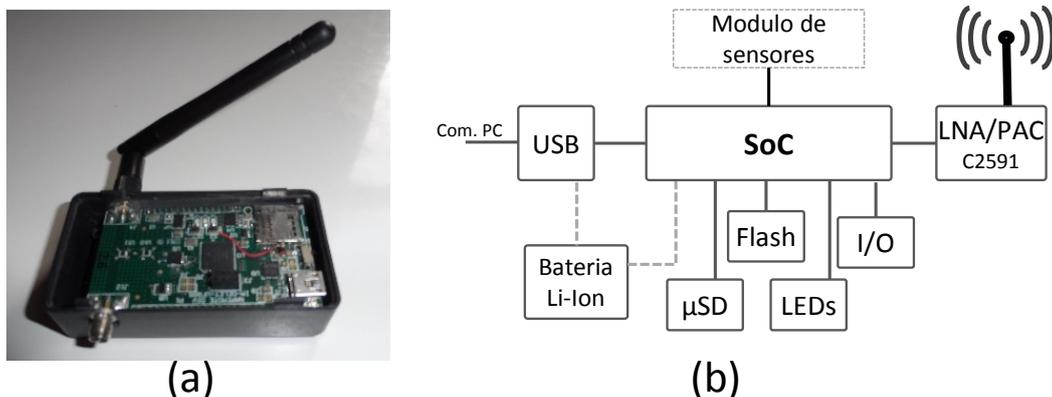


Figura 5.18: Nó sensor Namimote: a) hardware e b) diagrama de blocos.

O circuito CC2591 é um *front-end* na banda ISM de 2,4GHz que conectado à antena amplifica o sinal entrante mediante um LNA (*Low Noise Amplifier*) ou o sinal transmitido mediante um PA (*Power Amplifier*). O sistema-em-um-chip (SoC) MC13224 controla todos os demais elementos do Namimote e habilita comunicações do tipo: UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) e IEEE 802.15.4. Um circuito adicional (FT232R) atua como interface entre o SoC e a porta USB (*Universal Serial Bus*). Informação detalhada do Namimote é apresentada em (MÜLLER et al., 2012).

Todos os dispositivos da RSSF utilizam como antena W1030 de 2dBi de ganho que opera na faixa 2,4GHz. Por outro lado, as potências de transmissão possíveis entregadas à antena dependem da configuração de um registro no Namimote (*gu8Power*).

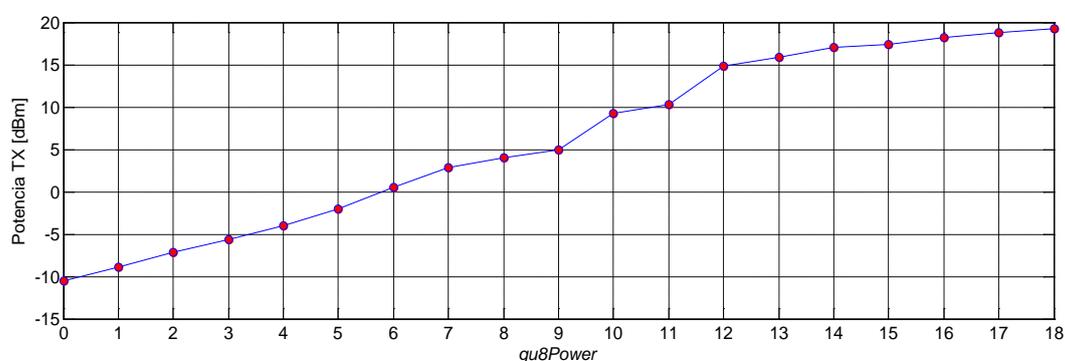


Figura 5.19: Potência TX do Namimote conforme a configuração.

Na Figura 5.19 são apresentados os possíveis níveis de potência resultantes da escritura de diversos valores no registro *gu8Power*. As potências apresentadas na Figura 5.19 consideram tanto a potência gerada pelo MC13224 quanto amplificação do PA.

O Namimote é programado usando a interface JTAG do MC13224, que conectada a um computador mediante um módulo J-link permite carregar e verificar o firmware operacional do dispositivo. Como plataforma de desenvolvimento é utilizado o software IAR e a linguagem C/C++. O IAR permite: programar e compilar o código fonte em C/C++, carregar no MC13224 o código em linguagem máquina e verificar a execução deste código em tempo real.

O firmware do Namimote é fundamentado nas primitivas SMAC (*Simple Media Access Controller*) definidas para o MC13224 (22XSMACRM, 2007). SMAC é uma pilha de código em linguagem C disponível como código fonte de protótipo, que permite desenvolver transceptores proprietários. O SMAC é uma API (*Application Programming Interface*) que permite conectividade sem fio IEEE 802.15.4 PHY. Em resumo, SMAC é um conjunto de bibliotecas (e.g., *RadioManagement.h*) para programar funcionalidades específicas do MC13224.

Na Tabela 9 são mostradas algumas primitivas utilizadas durante o projeto experimental. Já outras primitivas próprias do código base do Namimote permitem definir funcionalidades relacionadas à aplicação, por exemplo, aquisição de dados do módulo de sensores, comunicação via UART com computador, definição de T_S e do modo *sleep*.

Tabela 9: Funções exemplo do API-SMAC

Primitiva	Funcionalidade no MC13224
<i>MLMEPAOutputAdjust</i>	Ajustar o nível de potência do transmissor IEEE 802.15.4 conforme <i>gu8Power</i>
<i>MLMSEtChannelRequest</i>	Sintonização de um canal de operação
<i>MCPSDataRequest</i>	Transmissão de uma mensagem
<i>MLMEEnergyDetect</i>	Retorna um valor de energia entre 0x00 e 0xFF para um determinado canal
<i>MLMERXEnableRequest</i>	Configura o dispositivo em modo recepção
<i>process_radio_msg</i>	Função que habilita a execução da máquina de estados para transmitir ou receber mensagens

O MC13224 opera na banda de 2,4 GHz definida no IEEE 802.15.4 (Figura 2.3). Este conjunto de canais é definido na equação (5.21), com F_c sendo a frequência de operação e k o identificador de canal associado ao IEEE 802.15.4 (Canais CH11 até CH26). Cada canal tem uma largura de banda de 2MHz e o espaço entre canais adjacentes é de 3MHz. No API-SMAC, cada canal é identificado usando uma etiqueta específica (ex. *gChannel20_c* para o canal $k=20$).

$$F_c[\text{MHz}] = 2405 + 5(k - 11), \quad \text{para } k = \{11; 12; \dots; 26\} \quad (5.21)$$

As bibliotecas SMAC são definidas ao início dos arquivos fonte escritos em C/C++ usando o software IAR e além de permitir a configuração de parâmetros do MC13224, habilitam o desenvolvimento de algoritmos ao nível da camada MAC, assunto abordado neste trabalho. Portanto, a partir de um código base escrito para uma aplicação simples de monitoramento no contexto do projeto Namitec, são desenvolvidos novos firmwares de operação que permitem avaliar e comparar a metodologia proposta nesta tese.

5.2.3 Métodos programados nos dispositivos

No total, cinco métodos de acesso dinâmico aos canais são programados para funcionarem como algoritmos MAC nos sensores Namimote: a) a abordagem MSDAC; b) o enfoque guiado por recompensas de acesso (MRA); c) o enfoque guiado por salto cego (BCH – *Blind Channel Hopping*); d) o enfoque tradicional que usa canal fixo (*fixed channel*); e 5) uma alteração de MSDAC que considera também as recompensas por acesso (MSDAC-RA). Na sequência, as programações C/C++ desenvolvidas para implementação das diversas

metodologias testadas são mostradas em forma abreviada usando máquinas de estados. Note-se que cada uma das cinco metodologias analisadas abrange duas máquinas de estados, uma para o líder e outra para os sensores. As diferenças entre os cinco métodos testados são basicamente: a forma como o líder realiza a seleção de canal, a forma como o líder aprende do ambiente de RF e se o sensor realiza ou não sensoriamento espectral na banda, porém, o processo de transferência de canal é o mesmo proposto na metodologia MSDAC (seção 4.4.4), i.e., usando o contador de permanência no canal.

Método MSDAC: na Figura 5.20 são apresentadas as máquinas de estado do líder e dos sensores programadas nos dispositivos Namimote que implementam a metodologia proposta. A máquina de estados do líder (Figura 5.20a) é estudada detalhadamente na seção 4.5.1. No estado *UPDATE_CH*, o conjunto *CAS* é atualizado conforme seção 4.4.1. Para isto é usada a informação de $E_t(m)$ que constantemente é realimentada no estado *LEARNING*.

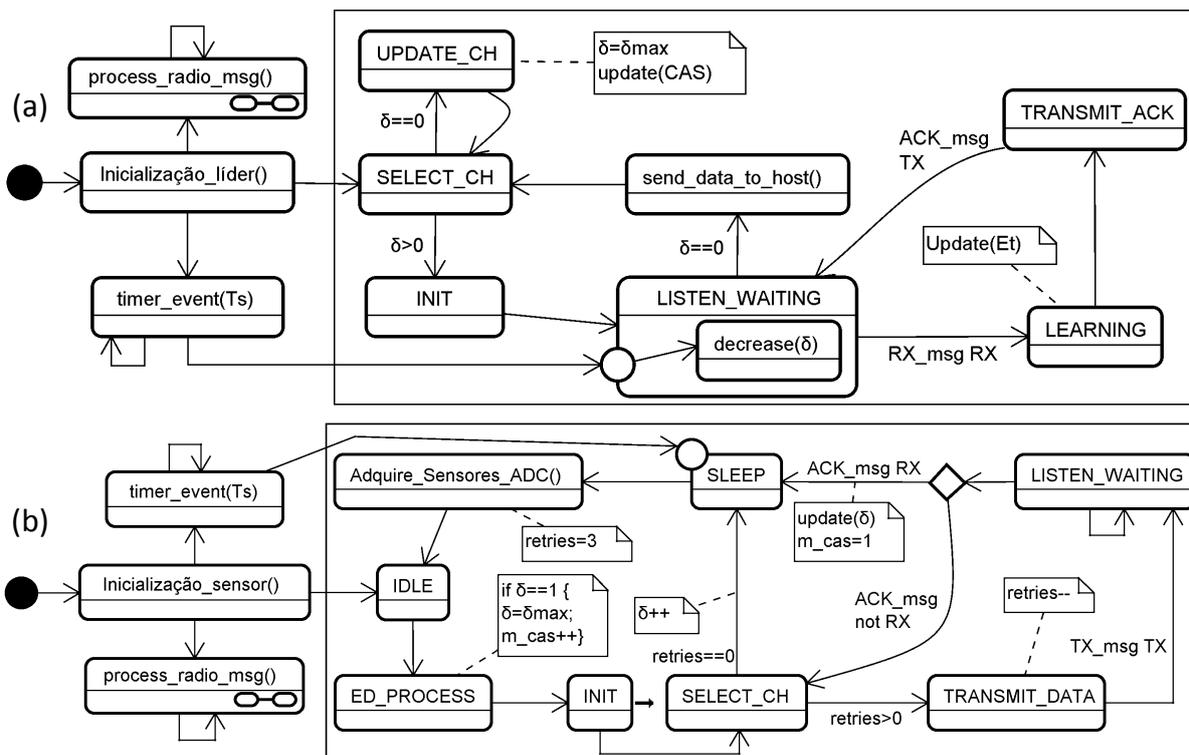


Figura 5.20: Máquinas de estado MSDAC: a) líder e b) sensores.

O canal de operação sintonizado no estado *SELECT_CH* é sempre *CAS(1)*. A máquina dos sensores (Figura 5.20b) programada em C/C++ descreve o mesmo procedimento de operação dos sensores descrito na seção 4.5.2. O estado *ED_PROCESS* permite realizar uma medição da energia interferente, gerando um valor entre 0x00 e 0xFF conforme o padrão IEEE 802.15.4. No estado *ED_PROCESS*, o sensor executa uma função do API-SMAC para realizar

a medição da energia em um determinado canal durante 6,5ms. Este tempo é definido em (MACHADO *et al.*, 2014), onde foi realizada uma calibração experimental visando a detecção por energia de sinais WLAN em um canal de operação do Namimote.

Método MRA: na Figura 5.21 é mostrada a máquina de estados usada na programação e teste do líder da metodologia guiada por recompensas de acesso, e.g., (CHEN, J. *et al.*, 2015; FAGANELLO *et al.*, 2013; LI, 2009; YAU; KOMISARCZUK; TEAL, 2009; ZHAO *et al.*, 2007).

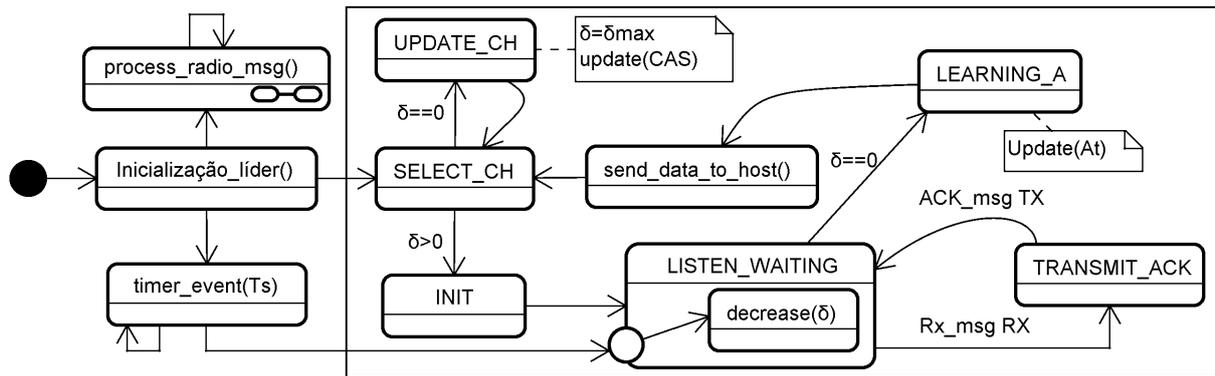


Figura 5.21: Máquina de estado MRA do líder.

Já que os sensores são dispositivos simples e têm restrições de consumo e processamento, um método de baixa complexidade computacional é escolhido na implementação. Assim, um método de aprendizagem por reforço das recompensas em termos de DR ao longo do tempo é preferido (FAGANELLO *et al.*, 2013; YAU; KOMISARCZUK; TEAL, 2009). Na Figura 5.21, o líder termina uma época de comunicação quando $\delta = 0$ no estado *LISTEN_WAITING*, assim, no estado *LEARNING* é realizada a realimentação da função de aprendizagem. Isto é definido na equação (5.22) com A_t sendo a aprendizagem das recompensas por acesso ao longo dos canais e DR_t a taxa de entrega de mensagens durante a época de comunicação t .

$$A_{t+1}(m_{ED}) = \alpha_a A_t(m_S) + (1 - \alpha_a) DR_t \quad (5.22)$$

Taxa de entrega relaciona a quantidade de mensagens recebidas pelo líder com a quantidade total de mensagens transmitidas pelos sensores (5.20) e assume valores entre zero e um. A aprendizagem acontece a cada época e o parâmetro α_a representa o fator de aprendizagem. Nos testes é utilizado α_a igual a 0,65 que representa um valor intermediário de aprendizagem. A atualização do conjunto de canais CAS é realizada considerando as informações A_t . Na aprendizagem, a DR obtida em cada época é utilizada como recompensa no

líder com MRA (Figura 5.21), porém, as medições ED obtidas em cada época são utilizadas como recompensas no líder com MSDAC (Figura 5.20a).

Um novo canal de acesso é selecionado no estado *UPDATE_CH* (Figura 5.21). As equações (5.23) e (5.24) apresentam o processo de atualização do CAS no método MRA.

$$CAS(1) = CAS(2) \quad (5.23)$$

$$CAS(2) = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{m \in CWS} A_t(m), & x_e < \beta_e \\ x_0, & x_e \geq \beta_e \end{cases} \quad (5.24)$$

O canal futuro é escolhido em (5.24) usando um limiar de exploração (β_e) que considera duas situações. Na primeira, se x_e é menor que o limiar β_e , o canal que maximiza a função A_t é selecionado, porém, um canal aleatório do conjunto CWS é selecionado usando a variável aleatória discreta X_0 (4.13). O parâmetro x_e é uma variável aleatória discreta que assume valores entre zero e um conforme a distribuição uniforme definida na equação (5.25).

$$X_e \sim f_{X_e}(x_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x_e \leq 1 \\ 0, & x_e > 1 \end{cases} \quad (5.25)$$

O limiar β_e é igual a 0,5 e permite que aproximadamente 50% das vezes a seleção do canal seja conforme a aprendizagem por recompensas de acesso e as outras 50% das vezes, a escolha seja aleatória. Isto com a finalidade de permitir explorar ou aprender todos os canais. Caso contrário, o líder ficaria ligado em um canal só, sem saber que acontece nos demais canais CWS, já que não são adquiridas recompensas de acesso.

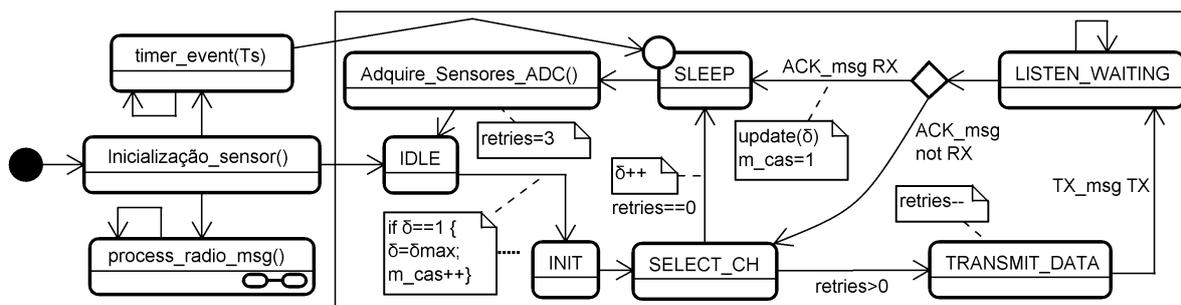


Figura 5.22: Máquina de estado do sensor nas abordagens MRA, BCH e canal fixo.

Na Figura 5.22 é apresentada a máquina de estados programada nos dispositivos sensores para trabalhar com MRA. Note-se que o processo realizado pelos sensores é o mesmo da máquina MSDAC (Figura 5.20b) com a exceção de que os sensores não realizam sensoriamento espectral.

Método BCH: o método de seleção cega de canal é utilizado por diversas abordagens de RSSF, e.g., WirelessHART. A escolha do novo canal de operação não considera as

condições dos canais CWS nem o desempenho obtido ao longo do tempo como resultado dos acessos. Neste caso o novo canal de operação é escolhido de forma aleatória.

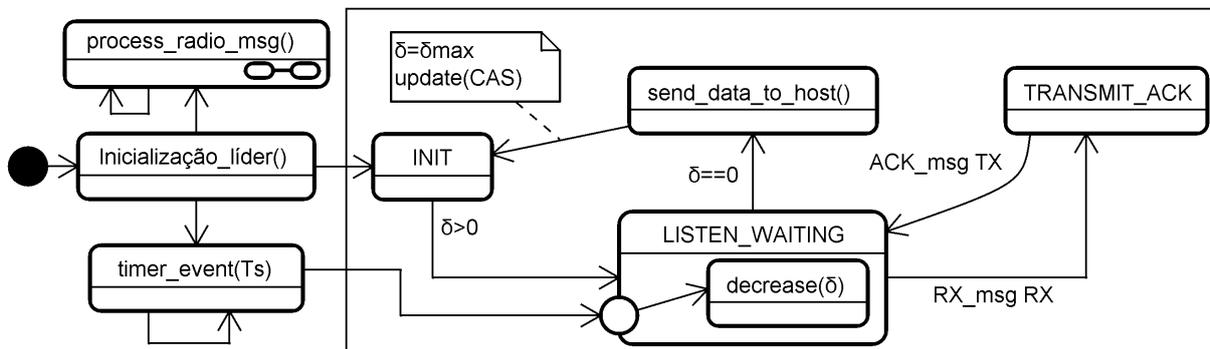


Figura 5.23: Máquina de estados do líder nas abordagens BCH e canal fixo.

A Figura 5.23 apresenta a máquina de estados do líder que seleciona canais conforme a abordagem de salto cego. O líder atualiza o conjunto CAS antes de começar uma nova época de comunicação, isto é, na transição até o estado *INIT*. O novo canal de operação é obtido pela equação (5.26) usando a variável aleatória X_0 definida em (4.13).

$$CAS(2) = x_0 \quad (5.26)$$

A equação (5.26) representa uma escolha aleatória sobre o conjunto CWS e permite saltar aleatoriamente através dos canais à medida que as épocas passam. Já o CAS(1) é obtido da mesma forma que em (5.23). A máquina de estados dos sensores no método é a mesma apresentada na Figura 5.22.

Método de canal fixo: na Figura 5.23 é apresentada a máquina de estados do líder programada com enfoque de canal fixo no Namimote. Neste caso, a rede de sensores utiliza sempre o mesmo canal m_{fixo} ao longo de todas as épocas de comunicação (5.27). Esta abordagem é comumente utilizada nas RSSF, já que na implementação é configurado um canal específico da banda de trabalho (e.g., CH11 da Figura 2.3) pelo projetista e a rede fica permanentemente naquele canal (e.g., ZigBee). Por último, os sensores são programados em C/C++ da forma mostrada na Figura 5.22. Nos experimentos é usado $m_{fixo} = CH15$.

$$CAS(2) = m_{fixo} \quad (5.27)$$

Método MSDAC-RA: na Figura 5.24 é apresentada a máquina de estados do líder programada no Namimote que implementa uma variação do método MSDAC. Esta máquina acrescenta as recompensas por acesso como parte da aprendizagem. Assim, MSDAC-RA é uma mistura entre o método proposto e o método MRA e realiza duas aprendizagens.

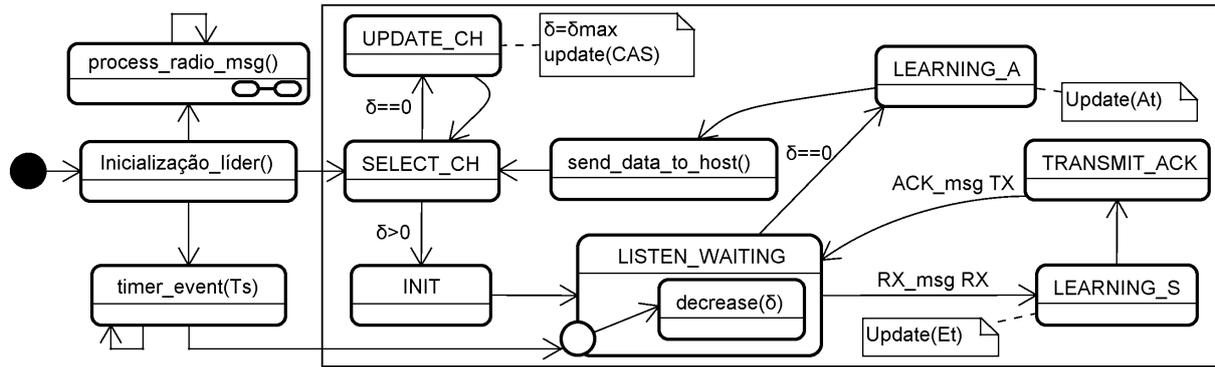


Figura 5.24: Máquina de estados do líder na abordagem MSDAC junto RA.

No estado *LEARNING_S*, o líder realimenta a função de aprendizagem E_t da mesma forma que em MSDAC, apesar disso, no *LEARNING_A*, o líder realimenta outra função de aprendizagem A_t adicional desta vez considerando as recompensas por acesso como definido na equação (5.22).

Por outro lado, a seleção de canal (no estado *UPDATE_CH*) é realizada considerando o conjunto de canais com menor energia (CLES). Na equação (5.28) é calculado o novo canal de operação com os dois elementos do conjunto CLES sendo calculados nas equações (5.29) e (5.30). Isto é, primeiro são selecionados os dois canais com menor interferência segundo E_t e depois é escolhido aquele canal que apresentou a maior recompensa de acesso ao longo das épocas. Note-se que não é necessária uma fase de exploração como acontece no método MRA. É importante ressaltar que uma atualização do conjunto CAS no líder, implica também uma atualização do conjunto CSS tanto no MSDAC quanto no MSDAC-RA.

$$CAS(2) = \underset{m \in CLES}{\operatorname{argmax}} A_t(m) \quad (5.28)$$

$$CLES(1) = \underset{m \in CSS}{\operatorname{argmin}} E_t(m) \quad (5.29)$$

$$CLES(2) = \underset{m \in CSS \ \& \ m \neq CLES(1)}{\operatorname{argmin}} E_t(m) \quad (5.30)$$

Para finalizar, todas as máquinas de estados do líder programadas têm o estado `send_data_to_host` que permite enviar um conjunto de dados seriais pela interface USB usando comunicação UART. A informação enviada permite visualizar em tempo real o desempenho da RSSF (e.g., DR, mensagens recebidas, canal selecionado). O estado *Acquire_Sensores_ADC* permite ao sensor ler o módulo de sensores do Namimote com a finalidade de ter medições atualizadas (por ex., da temperatura). Durante este estado o sensor realiza algumas tarefas de processamento de dados. Estas medições são utilizadas como carga útil da mensagem DATA a ser transmitida. O tempo que o sensor demora em estado ativo é de aproximadamente 98ms

(19,6%) na máquina da Figura 5.22 e de 105ms (21%) no caso da máquina que realiza medições ED (Figura 5.20b). Nestas máquinas, o sensor entra em modo *sleep* e permanece até que o contador do RTC (*Real Time Clock*) atinge 8755, assim, o Namimote é acordado. O RTC do Namimote está configurado em 17,5KHz, o que leva a o ciclo total de 500 ms.

5.2.4 Resultados experimentais

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos de forma experimental. Dois cenários são considerados para realizar o teste experimental visando a avaliação e a comparação dos métodos mencionados anteriormente. O primeiro é um cenário indoor com as redes primária e secundária trabalhando no mesmo ambiente de RF. O local de teste deste cenário é o laboratório de comunicações da Universidade. A segunda experiência é realizada em um cenário confinado cujo objetivo é realizar um experimento em condições mais controladas de interferência. Para isto os dispositivos primários e secundários são conectados entre eles para eliminar a interferência gerada por outras fontes no local de teste, por exemplo, roteadores WIFI na redondeza. Alguns parâmetros comuns usados durante os experimentos são: $\delta_{Max} = 10$; $T_S = 500ms$ e $M_{CAS} = 2$.

Procedimento de teste indoor:

Os testes indoors são realizados em horário não comercial da universidade a fim de diminuir a influência da interferência proveniente das diversas fontes WIFI presentes nas cercanias. Nestes horários a interferência proveniente das fontes WIFI é menor em decorrência do menor tráfego gerado pelos usuários. Assim, durante os finais de semana e nos horários noturnos as comunicações dos aparelhos WIFI são menores e conseqüentemente a influência da interferência destas fontes externas sobre o cenário de teste é menor também. Além disso, os seguintes detalhes são considerados para não perturbar as condições de propagação do local durante o experimento: os objetos permaneceram inalterados e não há presença de pessoas. Para conseguir isto os experimentos são executados de forma remota mediante o software AnyDesk que permite controlar os computadores envolvidos no teste. Na Figura 5.25 é apresentado o cenário indoor e fotos do local do experimento. A sala tem 6,6m de largura (eixo x) e 8,28m de comprimento (eixo y). Considerando o canto inferior esquerdo como sistema de referência, as localizações dos diversos dispositivos são mostradas na Figura 5.25.

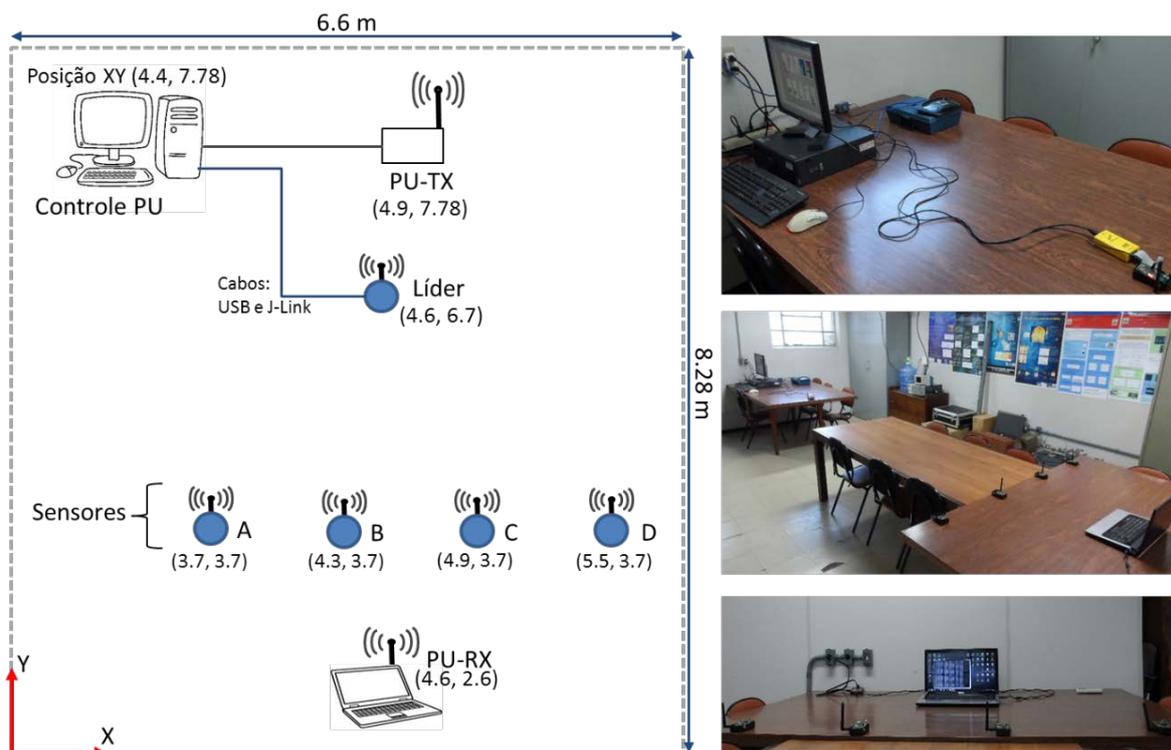


Figura 5.25: Distribuição espacial dos dispositivos e fotos do Cenário indoor.

Os nós sensores (A, B, C e D) encontram-se afastados do líder 3 metros na vertical e 60cm é o espaço horizontal entre eles. Os sensores são localizados próximos do computador portátil que atua como receptor primário. O líder da rede de sensores é localizado na posição 4,6m (eixo x) e 6,7m (eixo y). Já a distância vertical entre o TX e o RX primários é de 5,2m. O ponto de acesso (PU-TX) governa a rede WLAN e envia dados conforme a seção 5.2.1. O PU-TX usa os canais A1 e A4 (Tabela 7) como canais de operação e alterna entre eles a cada cinco minutos (T_{PU}) segundo o processo definido na Figura 5.17. O tráfego gerado pelo PU-TX é controlado pelo computador ($SW_{controle}$) localizado nas posições 3,6m no eixo x e 7,78m no eixo y . O tráfego gerado pelo PU-TX segue o padrão UDP com uma taxa de transmissão de 4Mbps. Como ponto de acesso é usado o roteador WRT120N cuja potência de transmissão é igual a 16,5dBm.

O computador de controle PU também tem a tarefa de adquirir os dados de desempenho da rede de sensores, por isso, o líder é conectado a ele usando cabo USB (Figura 5.25). O líder envia estas informações mediante a função *send_data_to_host* no final de cada época de comunicação. No computador é projetada uma rotina no MATLAB para aquisição dos dados transmitidos pelo líder. As diversas máquinas de estados do líder podem ser programadas ou configuradas de forma remota usando a conexão J-Link entre líder e o computador de controle PU. Já a máquina de estados habilitada nos sensores depende de um dado de controle enviado

pelo líder. O tempo do experimento para cada uma das cinco metodologias descritas na seção anterior é de 6 horas. Neste período de tempo a rede primária alterna 72 vezes entre os canais A1 e A4 e o número total de épocas de comunicação na rede de sensores é 4320 considerando que cada época tem duração de 5 segundos (T_{CH}).

Cenário indoor com $N=4$:

Um primeiro experimento indoor é realizado usando uma rede de sensores com $N=4$: um líder e três sensores (A, B e C) localizados conforme a Figura 5.25. Os nós da RSSF utilizam como canais de operação o conjunto $CWS=\{CH11; CH12; \dots; CH17\}$ de tamanho $M=7$. Deste modo, quando a rede primária opera em A1 gera interferência nos canais CH11 até CH14 e quando opera no canal A4 gera interferência nos canais CH14 até CH17. A potência de transmissão de todos os nós Namimote é configurada em 10,29dBm ($gu8Power=11$).

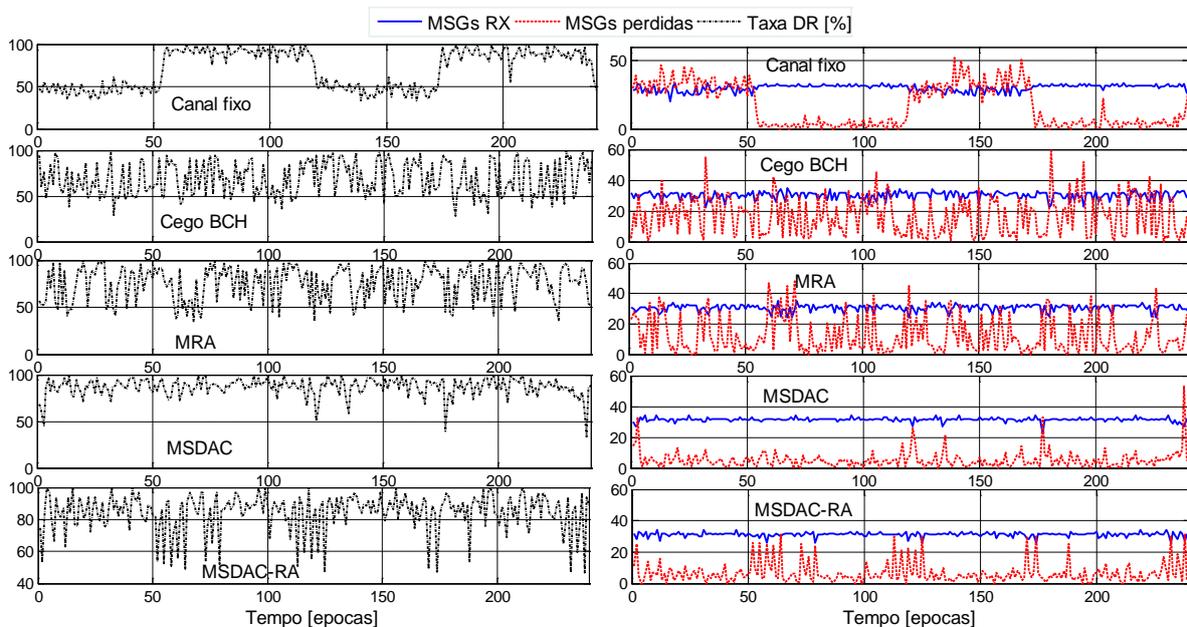


Figura 5.26: Resultados dos experimentos em uma janela de 20 minutos.

Na Figura 5.26 é mostrada uma janela de 20 minutos com alguns resultados exemplo dos cinco métodos testados. Na Figura 5.26 (esquerda) é apresentada a DR ao longo de 240 épocas de comunicação. Já na Figura 5.26 (direita) são apresentadas a quantidade de mensagens recebidas e perdidas ao longo das épocas. Note-se que a cada 60 épocas o PU-TX troca de canal de operação causando uma perturbação (interferência) nos canais de operação da rede de sensores. Cada método reage diferentemente a esta perturbação. A rede com o método de canal fixo tem algumas faixas de tempo que resultam visivelmente afetadas e outras não, como pode ser observado na taxa de entrega da Figura 5.26 (esquerda). O método BCH tem uma perda de

pacotes relativamente estável ao longo das épocas. Isto é porque a seleção de canal é aleatória com PDF uniforme (5.26) fazendo com que de forma equilibrada certas vezes seja selecionado um canal com interferência e outras não. A rede com MRA se liga em alguns canais adequados em termos de recompensas de acesso futuras, porém, o comportamento em perda de pacotes é similar a BCH devido a que MRA às vezes realiza uma escolha aleatória para conseguir aprender com os canais (exploração) resultando na possível escolha de um canal que está sendo interferido pelo PU-TX. A rede trabalhando com o método MSDAC evita as interferências geradas pelo padrão de tráfego do PU-TX, deste modo, o líder seleciona aqueles canais com menor nível de interferência conseguindo uma menor perda de mensagens (Figura 5.26, direita). Em MSDAC, as maiores perdas de mensagens acontecem na mudança de canal do PU-TX, já que o líder deve aprender de novo o estado dos canais. Por último, a rede com MSDAC-RA tem um comportamento similar ao MSDAC.

Os resultados de desempenho da RSSF obtidos para cada método programado são apresentados na Tabela 10. Os resultados apresentam a quantidade total de mensagens transmitidas, recebidas e perdidas ao longo das 6 horas de duração de cada um dos cinco experimentos. A Tabela 10 também apresenta a DR média para cada um dos métodos implementados com um intervalo de confiança de 95% (distribuição normal). Um total de 4320 amostras de DR são obtidas durante as 6 horas de cada experimento, tempo suficiente para garantir a confiabilidade dos resultados mostrados na tabela.

Tabela 10: Taxa de entrega obtida no cenário indoor com N=4

Parâmetro	Método implementado				
	Canal fixo	BCH	MRA	MSDAC	MSDAC-RA
Mensagens Perdidas	70653	73451	53481	21292	25796
Mensagens Recebidas	131188	129447	132583	136145	135488
Mensagens Transmitidas	201841	202898	186064	157437	161284
DR média [%]	65,00 ± 0,71	63,80 ± 0,6	71,26 ± 0,64	86,48 ± 0,63	84,01 ± 0,62

Da análise comparativa da Tabela 10 pode se ressaltar que os casos canal fixo e BCH apresentam o menor desempenho devido ao fato de não conseguirem evitar adequadamente a interferência proveniente da rede primária. A rede com BCH permanece no canal CH15, assim, seu desempenho DR é afetado nos tempos que o PU-TX sintoniza o canal A1. A rede de sensores usando BCH não sabe quais canais tem menor interferência e sua seleção de canal é aleatória afetando evidentemente o desempenho DR. O desempenho do método MRA (71,26%) tem uma boa melhora com relação aos métodos de canal fixo e BCH, porém, não consegue um melhor resultado porque deve realizar uma escolha aleatória de canal (similar ao BCH) com a

finalidade de explorar e aprender outros canais. Isto permite a escolha de canais com presença primária aumentando assim a quantidade de mensagens perdidas. Entretanto, o método proposto consegue a melhor taxa de entrega de mensagens com e sem recompensas por acesso: 84% e 86,48%, respectivamente. A rede de sensores com MSDAC recebeu a maior quantidade de mensagens e experimentou a menor quantidade de mensagens perdidas durante as 6 horas de experimento conseguindo assim o maior desempenho dos cinco métodos testados. A principal causa do bom resultado MSDAC é resultado de sua aprendizagem e sua escolha de canal que permitiu ao líder evitar aqueles canais com interferência da rede WLAN primária.

Na Tabela 11 é apresentada a porcentagem do tempo de atividade experimentada para cada um dos métodos implementados. Este valor representa o tempo do sensor que não está em modo *sleep*, no qual o sensor realiza diversas tarefas, por ex., sensoramento, transmissão, recepção e aquisição. Esta métrica é calculada da seguinte forma: o contador do relógio RTC é registrado quando o sensor entra ou sai do modo *sleep*; com esses tempos são calculados o tempo total (T_S) e o tempo ativo (T_A); e finalmente a porcentagem de tempo ativa é obtida para ser enviada na carga útil da mensagem.

Tabela 11: Porcentagem de atividade dos sensores no cenário indoor com N=4

Parâmetro	Método implementado				
	Canal fixo	BCH	MRA	MSDAC	MSDAC-RA
Porcentagem T_A do A	20,815	20,909	20,145	20,961	20,815
Porcentagem T_A do B	20,644	21,828	20,512	21,647	21,726
Porcentagem T_A do C	22,085	20,440	21,263	20,693	22,029
Porcentagem T_A média dos Sensores	21,181	21,059	20,640	21,100	21,523

Os tempos de atividade e inatividade (*sleep*) têm relação com o consumo de energia dos sensores, i.e., um maior tempo de atividade é análogo a um maior consumo energético. Em (STABELLINI; JAVED, 2010), os tempos de atividade e de *sleep* são usados para calcular o consumo de energia. Os dados são adquiridos na conexão USB do líder e o valor acumulado para cada sensor é mostrado na Tabela 11.

Na Tabela 11 também é apresentado o valor médio da porcentagem de atividade dos três sensores para cada método testado. O método que registrou a menor porcentagem de atividade dos sensores foi MRA com 20,64% (103,2ms). Entretanto, os métodos canal fixo, BCH e MSDAC apresentaram um comportamento similar próximo a 21,1% (105,5ms). A maior porcentagem de atividade acontece nos sensores que trabalham com o método MSDAC-RA. Em condições ótimas (DR de 100%) a porcentagem T_A de um sensor é aproximadamente 19,6%

($\frac{98}{500}$) com a máquina da Figura 5.22 (Canal fixo, BCH e MRA) e de 21% ($\frac{105}{500}$) com a máquina de estados da Figura 5.20b (MSDAC). Assim, o método que mais aumenta a porcentagem T_A é canal fixo com um tempo de atividade medido de 105,9ms.

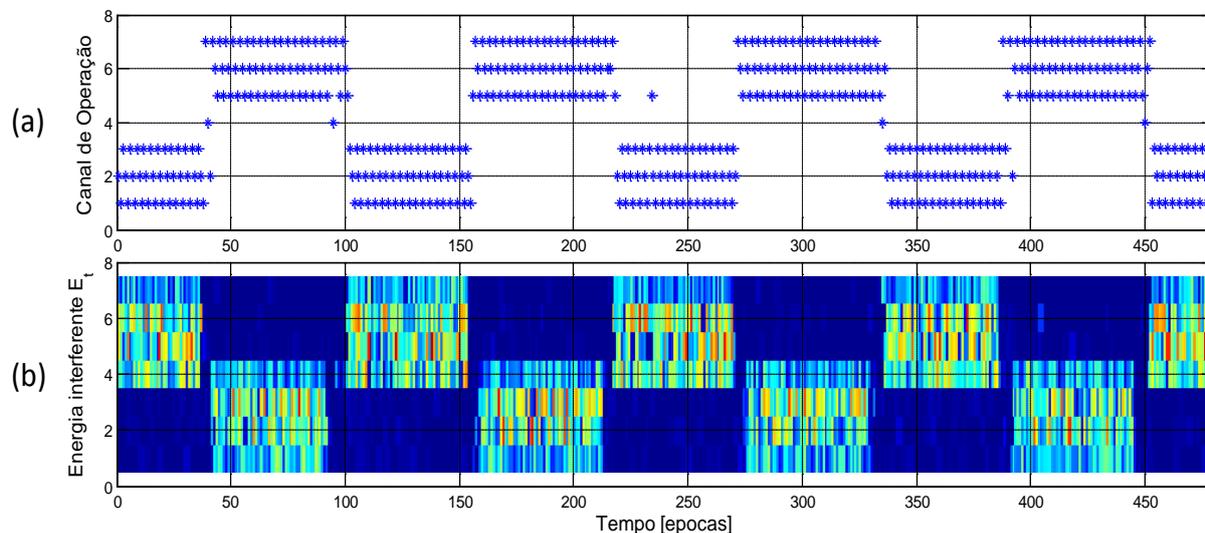


Figura 5.27: Evolução de: a) escolha de canal no MSDAC e b) função E_t e.

Entretanto, a Figura 5.27b apresenta a função de aprendizagem E_t e a seleção de canal de operação (CAS(1)) do método MSDAC durante uma parte do experimento (40 minutos). A função E_t do método MSDAC consegue aprender os níveis de interferência presentes ao longo dos sete canais (Figura 5.27b). As mudanças de canal de operação da rede primária (alternando entre A1 e A4) são detectadas na E_t e consequentemente o líder seleciona o canal de operação que apresenta menos interferência como mostrado na Figura 5.27a.

Cenário indoor com $N=5$:

Um segundo teste indoor é realizado usando $N=5$ (4 nós sensores e um líder). Os nós da rede de sensores são configurados para trabalhar com $M=7$ (CH11 até CH17). O registro $gu8Power$ é igual a 10, assim, a potência de transmissão dos nós da RSSF é 9,25dBm. Os diversos dispositivos utilizados durante os experimentos são distribuídos no local de teste conforme a Figura 5.25. Na Tabela 12 são apresentados resultados de desempenho da RSSF obtidos nos cinco experimentos realizados. Esta tabela detalha a quantidade de mensagens perdidas, recebidas e totais transmitidas durante as 6 horas de cada experimento. Também é apresentada a DR média considerando um intervalo de confiança de 95%. Note-se que os resultados apresentam a mesma tendência da Tabela 10. O desempenho dos métodos BCH e canal fixo é menor como resultado de que os sensores são mais interferidos pela rede primária.

Tabela 12: Taxa de entrega obtida no cenário indoor com N=5

Parâmetro	Método implementado				
	Canal fixo	BCH	MRA	MSDAC	MSDAC-RA
Mensagens Perdidas	99701	81912	61958	33888	48923
Mensagens Recebidas	179516	179509	181715	183765	182135
Mensagens Transmitidas	279217	261421	243673	217653	231058
DR média [%]	64,29 ± 0,64	68,67 ± 0,59	74,57 ± 0,58	84,43 ± 0,32	78,83 ± 0,47

O método de canal fixo apresentou a menor taxa DR com 64,29%. O método MRA conseguiu desempenho razoável de DR=74,57%. Entretanto, os experimentos da rede de sensores com o método proposto nesta tese conseguiram os melhores desempenhos, especificamente, o método MSDAC atingiu a melhor taxa de entrega com 84,43%. MSDAC seleciona os canais com menor energia interferente, por isso, evita tanto gerar interferência à rede primária quanto receber interferência da rede primária.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados de desempenho da rede primária obtidos em cada experimento. As comunicações secundárias provenientes da RSSF não afetam em forma considerável o desempenho do PU e nas cinco situações testadas a DR mostra um bom comportamento com aproximadamente 99% das mensagens sendo bem-sucedidas.

Tabela 13: Resultados de desempenho da rede primária no cenário indoor com N=5

Parâmetro	Método implementado				
	Canal fixo	BCH	MRA	MSDAC	MSDAC-RA
Retardo médio [ms]	15,35	15,417	14,045	15,335	15,631
Mensagens Perdidas	1814	4747	1580	12486	14048
Mensagens Recebidas	1184538	1181604	1184750	1173933	1172293
Mensagens Transmitidas	1186352	1186351	1186330	1186419	1186341
Taxa de entrega [%]	99,85	99,60	99,87	98,95	98,82

Na Tabela 14 é apresentada a porcentagem dos tempos de atividade de cada sensor da RSSF. Além disso, o valor médio da porcentagem T_A dos sensores é computado também. O MRA apresenta o menor tempo T_A com 20,73% (103,6ms) como consequência de sua DR média e devido a não realizar medições ED. Nos métodos canal fixo e BCH, a porcentagem T_A média é maior do normal (19,6%) devido ao fato de que os sensores devem transmitir mais mensagens (retransmissões) para compensar a perda de mensagens. Assim, os tempos médios de atividade dos sensores são: 107,8ms para a RSSF com canal fixo e 105,3ms no caso BCH. Os tempos médios de atividade nos métodos MSDAC e MSDAC-RA são 107,1ms e 108,3 respectivamente, valores um pouco acima dos obtidos por MRA e BCH. Mas, isto é, porque os sensores da RSSF com MSDAC devem realizar uma tarefa adicional (sensoriamento espectral).

Tabela 14: Porcentagem de atividade dos sensores no cenário indoor com N=5

Parâmetro	Método implementado				
	Canal fixo	BCH	MRA	MSDAC	MSDAC-RA
Porcentagem T_A do A	21,912	20,417	21,543	22,259	22,511
Porcentagem T_A do B	21,289	21,129	20,953	20,971	21,325
Porcentagem T_A do C	22,490	21,942	20,407	20,801	21,807
Porcentagem T_A do D	20,585	20,767	20,032	21,664	21,032
Porcentagem T_A média	21,569	21,064	20,734	21,424	21,669

A DR e os tempos de atividade obtidos nos dois testes indoor para as cinco metodologias implementadas apresentam a mesma tendência. O método MSDAC apresenta o maior desempenho na entrega de mensagens. O tempo de atividade é sempre menor usando MRA e os demais métodos apresentam uma porcentagem T_A similar, porém, o MSDAC tem a desvantagem de que os sensores devem realizar uma tarefa adicional de sensoriamento.

Cenário Confinado:

O cenário confinado tem como objetivos avaliar a metodologia proposta em um ambiente mais livre de interferência proveniente das fontes externas e verificar se os resultados têm a mesma tendência que aqueles obtidos no cenário indoor. Neste cenário, os sinais dos diversos dispositivos viajam via cabo coaxial e a interferência percebida das fontes WIFI presentes no prédio da engenharia elétrica é mínima. Dispositivos utilizados durante o teste confinado são: um atenuador RF de faixa variável até 121dB com passo de 1dB, um divisor/combinador de 50 ohms tipo Wilkinson, cabos coaxiais com conector N fêmea e vários conversores de N/SMA.

Na Figura 5.28 é mostrado o diagrama do cenário confinado e fotos do experimento. O líder é conectado mediante cabo coaxial a uma porta secundária do combinador, já o sensor é conectado diretamente na outra porta secundária como apresentado na imagem. O meio de transmissão entre sensor e líder tem uma atenuação aproximada de 30dB sem considerar as perdas no cabo nem nos conectores. O líder é conectado a um computador para aquisição de dados e reconfiguração do firmware. O conjunto de canais de trabalho da rede secundária é $CWS=\{CH11; \dots; CH16\}$. Como ponto de acesso (PU-TX) é usado o roteador DIR-600 cuja potência de transmissão é configurada no nível máximo (17dBm). O PU-TX é conectado via cabo coaxial ao atenuador duplo da Figura 5.28 que está configurado para atenuar o sinal em 32dB. O atenuador é conectado com um cabo coaxial à entrada primária do combinador.

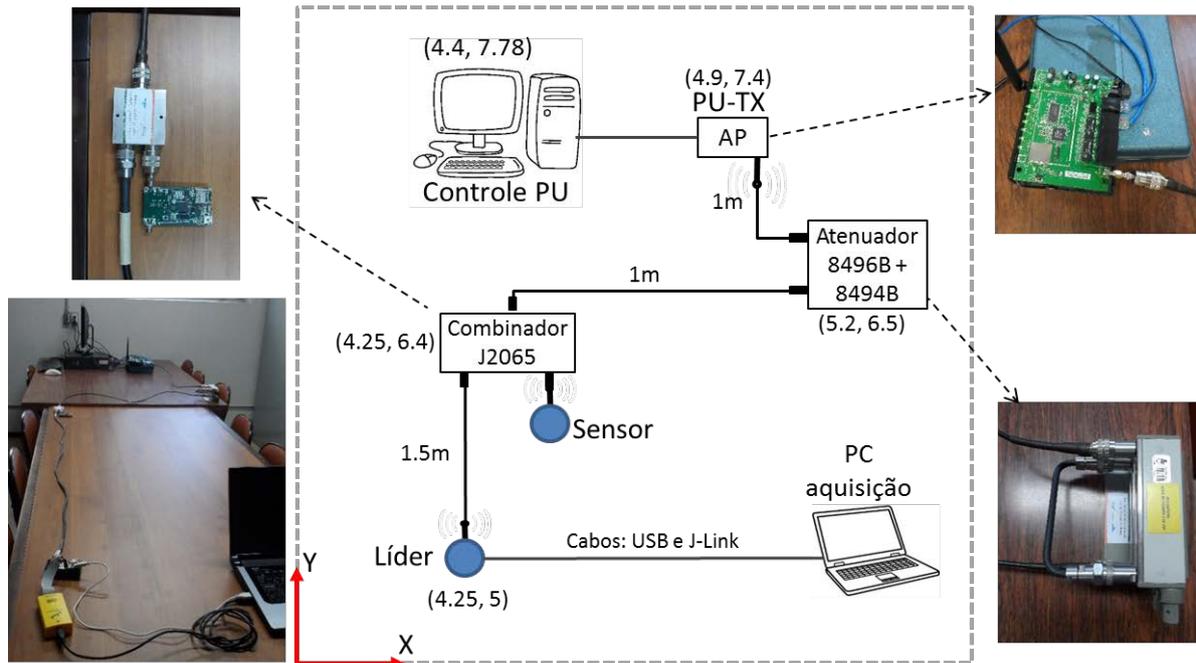


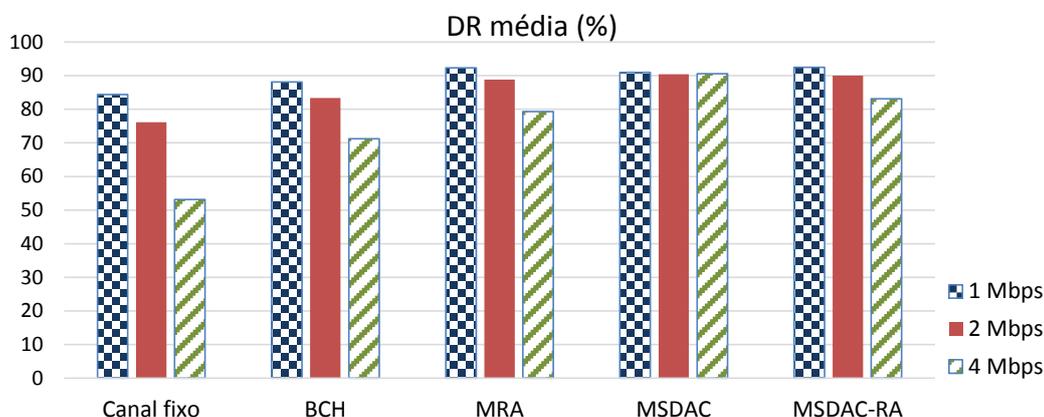
Figura 5.28: Diagrama e fotos do Cenário confinado.

O sinal primário proveniente do PU-TX sofre uma atenuação adicional de 3dB ao passar através do combinador em direção às portas secundárias, já que a potência do sinal é dividida em dois, com uma metade indo para o líder e a outra indo para o sensor. O PU-TX é conectado via cabo ethernet ao computador de controle PU. O software *SWcontrole* permite configurar o ponto de acesso para transmitir dados repetidamente durante cinco minutos (T_{PU}) e mudar de canal (alternando entre os canais A1 e A4). Assim, uma interferência primária de natureza dinâmica é gerada nos CWS. No cenário confinado, os experimentos consideram três situações diferentes de taxa de transmissão UDP: 1, 2 e 4Mbps. Isto permite observar a resposta dos cinco métodos quando o nível de interferência gerado pelo PU-TX é alterado. Deste modo, um total de 15 experimentos são realizados para analisar o funcionamento de cada um dos métodos implementados. Cada experimento tem uma duração de 4 horas. Na Tabela 15 são apresentados os resultados do funcionamento da RSSF para cada método e em cada situação de taxa UDP: a DR média (intervalo de confiança de 95%), a quantidade de mensagens transmitidas, perdidas e recebidas. A rede de sensores que experimenta a maior quantidade de mensagens perdidas e transmitidas é aquela implementada para trabalhar com um canal fixo, entretanto, a rede programada usando a abordagem BCH também apresenta desempenho similar, porém, um pouco melhor que aquele mostrado pelo método de canal fixo. Em todas as variações de nível de tráfego primário, os métodos BCH e canal fixo foram superados pelos outros métodos implementados.

Tabela 15: Resultados obtidos no cenário confinado para diversas taxas UDP primárias

Resultado	Taxa UDP do PU-TX	Canal fixo	BCH	MRA	MSDAC	MSDAC-RA
Mensagens Perdidas	1	5606	4081	2509	2995	2454
Mensagens Recebidas		30201	30285	30172	30028	30092
Mensagens Transmitidas		35807	34366	32681	33023	32546
DR média [%]		84,34 ± 0,82	88,12 ± 0,85	92,32 ± 0,75	90,93 ± 0,80	92,46 ± 0,74
Mensagens Perdidas	2	9270	6039	3803	3160	3329
Mensagens Recebidas		29515	30164	30084	29844	29943
Mensagens Transmitidas		38785	36203	33887	33004	33272
DR média [%]		76,10 ± 0,96	83,32 ± 1,02	88,78 ± 0,96	90,43 ± 0,87	89,99 ± 0,85
Mensagens Perdidas	4	21946	11653	7610	3079	6092
Mensagens Recebidas		24898	28778	29207	29447	29974
Mensagens Transmitidas		46844	40431	36817	32526	36066
DR média [%]		53,15 ± 1,32	71,18 ± 1,42	79,33 ± 1,38	90,53 ± 1,08	83,11 ± 1,36

O método MRA apresentou uma quantidade de mensagens transmitidas e perdidas relacionada a taxa UDP. Aumento da interferência do PU-TX gerou aumentos na perda de mensagens da rede usando MRA. Entretanto, a quantidade de mensagens transmitidas e perdidas são bem similares na rede usando MSDAC para todas as situações de taxa UDP primária. Porém, a rede de sensores implementada mediante MSDAC-RA apresentou um aumento nas mensagens perdidas, em especial quando a taxa UDP é 4Mbps.

**Figura 5.29: Taxa de entrega obtidas durante os experimentos no cenário confinado.**

Na Figura 5.29 são comparadas as diversas taxas de entrega de mensagens dos 15 experimentos realizados no cenário confinado. O método de canal fixo apresenta o desempenho mais baixo em todos os casos com a DR sendo visivelmente afetada à medida que a taxa UDP primária aumenta. Na continuação está o método BCH que tem taxas de entrega um pouco maiores que o método de canal fixo: 88,1% (1Mbps), 83,3%(2Mbps) e 71,1% (4Mbps), porém, seu desempenho também é dependente da taxa UDP do tráfego primário. O segundo melhor

desempenho é obtido pelas abordagens MRA e MSDAC-RA, mas, com uma pequena vantagem para rede usando MSDAC-RA que consegue evitar melhor a interferência. No caso UDP=1Mbps, a rede usando MSDAC-RA ou MRA atinge a maior DR (92%) e a rede usando MSDAC fica com desempenho levemente abaixo com 90,9%.

No primeiro caso as taxas DR com o MRA e com a MSDAC são altas: 92,3% e 90,93% respectivamente. Nos demais casos, a rede usando o método MSDAC sempre consegue a maior taxa de entrega de mensagens. Mesmo com o sensoriamento sendo realizado por somente um sensor, a rede com MSDAC atinge um excelente desempenho e mudanças na taxa de tráfego do PU-TX não influenciam a DR de mensagens que está acima de 90% em todos os casos. O bom desempenho de MSDAC é resultado de sua capacidade para aprender e evitar a faixa de operação do PU-TX.

Na Tabela 16 são apresentadas as porcentagens de tempo de atividade obtidas em cada caso durante o experimento no cenário confinado. Os valores consignados na Tabela 16 representam o tempo em que o nó sensor não está em modo *sleep* durante o tempo total de cada experimento.

Tabela 16: Porcentagem de atividade dos sensores no cenário confinado

Taxa UDP	Canal fixo	BCH	MRA	MSDAC	MSDAC-RA
1	19,818	19,520	19,388	20,643	20,545
2	20,222	19,780	19,505	20,651	20,637
4	21,114	20,391	19,921	20,571	20,920

Maiores porcentagens de atividade indicam um maior consumo de energia. Nas três situações UDP, o sensor da RSSF com MRA experimentou o menor tempo de atividade: 94,94ms (1Mbps), 97,52ms (2Mbps) e 99,6ms (4Mbps). Em todas as abordagens implementadas, com exceção da rede com MSDAC, se observam aumentos na porcentagem T_A causados pelos incrementos na taxa de transmissão do PU-TX. O método de canal fixo é o mais sensível, experimentando tempos T_A de 99,1ms, 101,1ms e 105,57ms, respectivamente. Um teste adicional usando o método de canal fixo em ausência de tráfego primário é realizado, obtendo uma DR igual a 95% e uma porcentagem de atividade de 19,28% (96,4ms). Isto mostra um aumento no tempo de atividade do sensor na abordagem de canal fixo como resultado da maior quantidade de mensagens transmitidas decorrente do aumento na taxa de transmissão primária. O tempo de atividade no caso do método BCH apresenta um desempenho um pouco melhor que o método de canal fixo, contudo, não consegue tempos T_A menores que o MRA. Já o MSDAC e sua variante experimentam os maiores tempos de atividade como consequência do

sensoriamento que realizam os sensores. Ressalta-se que os tempos de referência descritos no experimento indoor não são exatamente iguais no cenário confinado devido a que a conexão entre os dispositivos usando cabos pode afetar levemente o relógio RTC causando pequenas mudanças, por exemplo, no T_S . O tempo de atividade no método MSDAC permanece mais ou menos constante em 103,1ms (porcentagem $T_A \approx 20,6\%$) nas três situações de tráfego UDP. Esta característica de não dependência é consequência da mudança adaptativa realizada pelo líder usando MSDAC que consegue evitar a interferência gerada por PU-TX.

5.3 RESUMO

O comportamento da RSSF com MSDAC é analisado mediante simulações, onde são testados: o acesso dinâmico aos canais e os processos de sensoriamento e aprendizagem realizados pelos membros dos *clusters*. Nas diversas simulações é mostrado o bom comportamento do método MSDAC em termos de convergência e taxa de entrega de mensagens ao longo do tempo. Isto é realizado considerando variações relacionadas com o tráfego dos PUs, a quantidade de sensores e o contador máximo de permanência no canal.

Nos experimentos realizados nos cenários indoor e confinado é observada a mesma tendência nos resultados dos diversos métodos comparados: maior desempenho em termos de entrega de mensagens para o método MSDAC proposto e menor tempo de atividade dos sensores no caso do MRA. Entretanto, à medida que a taxa de transmissão primária aumenta, todos os métodos com exceção do método proposto devem realizar mais retransmissões de mensagens, impactando negativamente no tempo de atividade dos sensores. Deste modo, a menor quantidade de retransmissões necessária na RSSF que usa o método MSDAC proposto implica uma redução do tempo de atividade que é favorável para compensar o tempo investido para realizar sensoriamento espectral.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da tese que incluem assuntos da literatura, da metodologia proposta e da avaliação realizada. Também são descritos possíveis caminhos para a realização de trabalhos futuros e a produção científica.

6.1 CONCLUSÕES

Como resultado da análise realizada no início desta tese, são identificadas as principais características, limitações e enfoques das redes de sensores sem fio. As RSSF são de grande importância para uma ampla variedade de aplicações porque permitem aquisição ou monitoramento de parâmetros de diversos ambientes, além disso, tornam-se uma ferramenta que habilita o conceito emergente de integrar e comunicar diversos objetos (Internet das Coisas). Os desafios das RSSF são verificados, em particular, a coexistência na banda ISM, os requerimentos de sincronismo, a escalabilidade, o consumo de energia e a complexidade são assuntos destacados. Por outro lado, o protocolo IEEE 802.15.4 tem sido chave no desenvolvimento da tecnologia dos sensores sem fio, já que serve de base funcional para a maioria das tecnologias atuais de RSSF. As técnicas de acesso das RSSF podem ser classificadas em duas categorias: por *slots* de tempo sincronizados com salto cego (TSCH do IEEE 802.15.4e) e aleatório não sincronizado (MAC do IEEE 802.15.4). Entretanto, os conceitos de CR são estudados e surgem como um mecanismo para melhorar o comportamento das RSSF. Em especial, o CR pode ajudar a organizar os serviços de RF de forma dinâmica e permitir que uma RSSF tire vantagem do acesso dinâmico ao espectro para melhorar seu desempenho operando em outras bandas de natureza primária diferentes à banda ISM. O sensoriamento espectral é também descrito como funcionalidade de cognição que habilita os dispositivos secundários para detectar a situação do espectro de RF. Os principais métodos de sensoriamento espectral são estudados, cada um deles apresenta características únicas de exatidão e complexidade computacional. A detecção por energia utilizada neste trabalho é preferida por sua simplicidade e baixo custo de implementação nos sensores.

Os métodos de acesso dinâmico aos canais em redes cognitivas e RSSF são estudados no capítulo três com ênfase nos métodos distribuídos e são definidos alguns critérios de análise para comparação. As principais conclusões desta análise do estado da arte são descritas a seguir. As RSSF tradicionais são dependentes de sincronismo, usam esquemas centralizados e realizam

uma seleção fixa ou cega de canal, de baixa flexibilidade, sem o acesso dinâmico aos canais, o que dificulta a coexistência. Alguns métodos de uso oportunista do espectro primário precisam de um canal de controle comum para coordenar a rede, requerem dispositivos complexos ou não abordam o consumo de energia, no entanto, nos limitados nós sensores estas características tornam-se de inviável implementação. Já outros métodos de acesso dinâmico aos canais usam esquemas de sinalização *in-band* caracterizados por uma alta complexidade e sincronismo que implicam custos em energia, *overhead* e processamento não adequados nas RSSF. Outras abordagens utilizam as recompensas resultantes das comunicações como experiência para guiar o acesso dinâmico aos canais sem aproveitar os benefícios do sensoriamento espectral e precisando uma exploração de canais adicional ou de maior complexidade computacional. Entretanto, os métodos que utilizam sensoriamento espectral não abordam a cooperação e os dispositivos individualmente devem monitorar toda a banda de operação, tarefa que demanda alto consumo de energia. Os poucos enfoques que consideram o *spectrum handoff* sofrem com alta complexidade ou requerimentos estritos de sincronismo. Ainda outras abordagens precisam treinar o método de acesso dinâmico de forma *off-line*. Segundo a análise do estado da arte ainda existem vários desafios abertos que correlacionam: o acesso dinâmico aos canais em RSSF distribuídas de caráter secundário, as políticas de sensoriamento espectral e a coordenação assíncrona dos sensores.

Nesta tese é proposta uma nova metodologia para realizar sensoriamento espectral e acesso dinâmico aos canais em uma RSSF dividida em *clusters* cujos processos de coordenação e comunicação são assíncronos. A metodologia proposta consegue manter operativos os enlaces de dados entre os sensores e o líder de *cluster* enquanto que os canais de operação são alterados de forma assíncrona e adaptativa conforme a situação do ambiente de RF. A metodologia MSDAC permite aos membros do *cluster* definir: a política de sensoriamento cooperativa; os procedimentos de economia de energia; as trocas de mensagens de dados; a aprendizagem do estado do espectro de RF realimentada pelas informações de sensoriamento; e a coordenação assíncrona para a seleção adaptativa do canal de operação usando um conjunto de canais de acesso e um contador de permanência no canal. Características importantes da metodologia proposta são: a não necessidade de sincronismo, ausência de *beacons* para coordenar os acessos, *spectrum handoff* simplificado, mínimas informações adicionais de sinalização e a não necessidade de um CCC nem sinalizações complexas. Além disso, a metodologia proposta não precisa utilizar uma fase de exploração para aprender os canais como ocorre nas abordagens guiadas por recompensas, o que evita tomar decisões que podem levar a interferir nos canais

ocupados por PUs. Formula-se uma metodologia que além de usar recompensas por sensoriamento utiliza também recompensas por acesso para alimentar a aprendizagem.

A metodologia proposta habilita aplicações de automação residencial com uma HAN representando um *cluster* da rede e com um grupo de sensores trabalhando cooperativamente para realizar, por exemplo, controle de temperatura ou luminosidade. Adicionalmente, o T_S utilizado é adequado para aplicações em tempo real como foi verificado experimentalmente onde altas taxas de entrega de mensagens são atingidas. Entretanto, é possível diminuir o tempo T_S para considerar aplicações mais estritas quanto ao tempo real, mas devem ser pesquisados os limites possíveis que pode assumir T_S considerando a exatidão do relógio RTC para assim garantir a confiabilidade do acesso dinâmico e assíncrono aos canais. A comunicação entre *clusters* tem sido parcialmente definida, porém, a pesquisa aprofundada deste assunto pode permitir que a metodologia proposta seja aplicada em outras aplicações e serviços, por exemplo, monitoramento do ambiente.

A metodologia proposta é testada tanto em simulações quanto em um cenário experimental. Em ambos casos, o correto funcionamento dos processos de acesso dinâmico aos canais, sensoriamento e aprendizagem realizados pelos membros dos *clusters* foi verificado.

Um modelo de simulação é desenvolvido para permitir interação no nível da camada física entre redes primária e secundária em um mesmo conjunto de canais. Nas simulações, a evolução da convergência e da taxa de entrega de mensagens da metodologia proposta apresentam um bom desempenho considerando os parâmetros usados e algumas variações realizadas no tráfego primário, na quantidade de sensores e no tamanho da época de comunicação. Da alteração na quantidade N de sensores (4 até 28) e considerando o padrão de tráfego primário, é observado um bom desempenho da metodologia proposta na seleção dinâmica de canais com métricas de convergência entre 76,1% e 82,2% e taxas de entrega de mensagens próximas a 95% para todas as situações de N . Por outro lado, a taxa de entrega da RSSF usando MSDAC com $N=6$ é susceptível ao tamanho da época de comunicação (δ_{Max}). Uma diminuição no tamanho da época causa uma queda considerável no desempenho da metodologia proposta. Taxas de entrega altas são conseguidas quando o parâmetro δ_{Max} é maior que sete, no entanto, uma diminuição moderada é identificada quando $7 \geq \delta_{Max} \geq 3$ e uma diminuição considerável quando δ_{Max} é menor que três. O parâmetro δ_{Max} deve ser próximo a dez para garantir a correta comunicação entre líder e sensores, porém, não deve ser grande demais porque implicaria que os dispositivos do *cluster* ficariam longo tempo sintonizando um mesmo canal sem adquirir medições ED deste canal, portanto, possíveis mudanças associadas ao tráfego primário poderiam passar despercebidas, recomenda-se $10 \leq \delta_{Max} \leq 20$. Também,

a capacidade da aprendizagem MSDAC de diferenciar os canais bons dos ruins é testada definindo dois grupos de canais cuja similaridade é alterada entre 0% e 100%. Os resultados mostram que a RSSF consegue diferenciar os melhores canais até quando estes apresentam uma similaridade de 45,4%, assim, em 36 e 14 ocasiões são usados os melhores e os piores canais, respectivamente.

Um estudo de caso experimental é realizado utilizando a banda ISM de 2.4GHz (banda primária) para avaliar e comparar a metodologia proposta. Nos dois experimentos do cenário indoor, a metodologia proposta atingiu as maiores taxas de entrega de mensagens com 86,4% e 84,4% usando 4 e 5 sensores respectivamente, entretanto, os outros métodos testados apresentaram taxas de entrega menores, com os piores resultados para os métodos de canal fixo e salto cego de canal, e com resultados intermediários para o método baseado em recompensas por acesso. Por outro lado, o método com recompensas por acesso registrou o menor tempo de atividade: 103,2ms e 103,6ms usando 4 e 5 sensores respectivamente. Já os tempos de atividades dos outros métodos foram um pouco maiores, situação esperada na metodologia proposta como consequência da tarefa de sensoriamento, mas, condição inesperada nos métodos de canal fixo e salto cego. A metodologia proposta apresentou tempos de atividade de 105,5ms e 107,1ms nos dois experimentos indoor. As comunicações da rede WLAN primária apresentaram bom desempenho em todos os experimentos indoor realizados com taxas de entrega próximas a 99% e retardos da ordem de 15ms. Isto é devido a que os experimentos foram realizados em horário não comercial, onde há baixa interferência na banda 2.4GHz, além disso, o impacto das comunicações da RSSF é mínimo. No cenário confinado, três situações diferentes de taxa transmissão UDP do PU são testadas. A taxa de entrega da metodologia proposta está sempre acima de 90% nos três experimentos apesar de que o sensoriamento é realizado por somente um sensor. Já os demais métodos ficam sempre com taxas de entrega menores em todas as situações, com exceção da situação UDP de 1Mbps, onde o método baseado em recompensas por acesso apresentou uma DR em torno de 92,3%. O método baseado em recompensa por acesso apresentou o menor tempo de atividade em todas as situações UDP. Nas demais abordagens testadas, com exceção da rede com MSDAC, se observam aumentos nos tempos de atividade causados pelos incrementos na taxa de transmissão do PU-TX.

Em resumo, os resultados experimentais mostram a mesma tendência: um maior desempenho em termos de entrega de mensagens para a RSSF usando a metodologia proposta e um menor tempo de atividade na RSSF que usa MRA. Entretanto, com exceção da metodologia proposta, todos os métodos comparados devem realizar mais retransmissões de mensagens à medida que a taxa PU aumenta, o que causa um aumento no tempo de atividade

dos sensores. Assim, a menor quantidade de retransmissões necessária da metodologia proposta é uma vantagem favorável porque implica uma redução do tempo de atividade que compensa de alguma forma o tempo gasto em realizar sensoriamento. Entretanto, as limitações da metodologia proposta são: uma boa seleção de canal pelo líder está associada à troca de dados com os sensores, o *duty cycle* deve ser o mesmo para todos os sensores da rede sem contemplar diversas periodicidades nos dispositivos, as constantes trocas de canal e o sensoriamento ED podem implicar um consumo adicional de energia nos sensores e assuntos de comunicação entre *clusters* devem ser pesquisados para analisar o comportamento da proposta em RSSF com alta densidade de dispositivos.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

A realização de uma pesquisa do desempenho da metodologia proposta considerando maiores quantidades de canais é importante para analisar: quão eficiente é a reação dos sensores quando o enlace com o líder está perdido; a agilidade da aprendizagem para reconhecer adequadamente o estado do conjunto de canais de operação; e a complexidade computacional.

Análise aprofundado do esquema de comunicação entre *clusters* vizinhos realizando testes simulados e experimentais dos enlaces *inter-cluster* definidos no capítulo 4. Analisar também esquemas de roteamento de mensagens eficientes que sejam adequados para uma implementação acima da metodologia proposta nesta tese.

Realizar um estudo do impacto das comunicações da RSSF usando a metodologia proposta quando o número de sensores é grande. Analisar também o impacto das comunicações entre *clusters* vizinhos quando a quantidade de sensores é grande e o número de canais primários é limitado.

Adicionar um esquema adaptativo à política de sensoriamento para desativar o sensoriamento de forma parcial em alguns sensores quando a situação do ambiente de RF o permite. Isto tem a finalidade de diminuir os consumos de energia relacionados ao sensoriamento. Analisar possíveis alternativas de seleção de canal de sensoriamento pelos sensores visando melhorar o desempenho da identificação dos canais mais adequados para troca de dados.

Pesquisar a integração da metodologia proposta com a abordagem baseada em recompensas por acesso. Além disso, pesquisar a imprecisão do modelo de aprendizagem

proposto relacionada com o a exatidão da técnica de detecção por energia e analisar possíveis alternativas para melhorar essa imprecisão.

O modo de baixo consumo no líder para economizar energia não foi considerado neste trabalho porque em uma aplicação de automação residencial sua energia pode ser fornecida diretamente de uma fonte de energia, porém, pesquisas futuras podem analisar este assunto considerando um líder usando bateria.

Realizar uma pesquisa da restrição temporal relacionando o tempo da época, o tempo de sensor, e a probabilidade de que um PU transmita dados no canal de operação ocupado pelos sensores. Deve-se pesquisar o parâmetro δ_{Max} mais detalhadamente considerando diversas situações de tráfego primário.

6.3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Os seguintes artigos foram escritos no contexto do trabalho de Doutorado, adicionalmente, um artigo adicional contendo o modelo de simulação proposto está sendo elaborado para submissão.

- a) Methodology of Sensing and Dynamic Access to the Channels in Wireless Sensor Networks. Computer Communications, Elsevier, 2017. (em revisão).
- b) Response of a learning method for channel access in a beacon-enabled wireless sensor network. In: 8th IEEE Latin-American Conference on Communications, Medellin, 2016.
- c) Energy detection method enhanced by autocorrelation. In: 2016 1st International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers, Belo Horizonte, 2016.
- d) Identification of IEEE 802.11g and IEEE 802.15.4 signals using energy and cyclostationarity detection approach. In: 2016 1st International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers, Belo Horizonte, 2016.

REFERÊNCIAS

- ABOLARINWA, J. *et al.* Energy-efficient, learning-inspired channel decision and access technique for cognitive radio-based wireless sensor networks. **International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering**, [S.l.], v. 10, n. 2, p. 11–24, 2015.
- AGARWAL, S. *et al.* DSAT-MAC: Dynamic slot allocation based TDMA MAC protocol for Cognitive Radio Networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS AND OPTICAL COMMUNICATIONS NETWORKS, 9., 2012, Indore, India. **Proceedings...** New York: IEEE, 2012. p. 1–6.
- AHMAD, A. *et al.* A Survey on Radio Resource Allocation in Cognitive Radio Sensor Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, New York, v. 17, n. 2, p. 888–917, Jan. 2015.
- AKAN, O.; KARLI, O.; ERGUL, O. Cognitive radio sensor networks. **IEEE Network**, New York, v. 23, n. 4, p. 34–40, 2009.
- AKYILDIZ, I. F. *et al.* A survey on spectrum management in cognitive radio networks. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 46, n. 4, p. 40–48, Apr. 2008.
- AKYILDIZ, I. F. *et al.* NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. **Computer Networks**, [S.l.], v. 50, n. 13, p. 2127–2159, Sept. 2006.
- AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C. **Wireless Sensor Networks**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010. v. 4.
- ALNUAIMI, M.; SHUAIB, K.; JAWHAR, I. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 Physical Layer Using MatLab/Simulink. In: INNOVATIONS IN INFORMATION TECHNOLOGY, 2006, Dubai. **Proceedings...** New York: IEEE, 2006. p. 1–5.
- ATAKAN, B.; AKAN, O. B. BIOlogically-Inspired Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks. In: IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2007, Hong Kong. **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 43–48.
- ATAPATTU, S.; TELLAMBURA, C.; JIANG, H. **Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio**. New York, NY: Springer, 2014.
- BRIK, V. *et al.* DSAP: a protocol for coordinated spectrum access. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 1., 2005. Baltimore, MD, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2005. p. 611–614.
- BUDDHIKOT, M. M. *et al.* DIMSUMNet: New Directions in Wireless Networking Using Coordinated Dynamic Spectrum Access. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON A WORLD OF WIRELESS MOBILE AND MULTIMEDIA NETWORKS, 6., 2005, Taormina-Giardini Naxos, Italy. **Proceedings...** New York: IEEE, 2005. p. 78–85.
- BYUN, S.-S.; BALASINGHAM, I.; LIANG, X. Dynamic Spectrum Allocation in Wireless Cognitive Sensor Networks: Improving Fairness and Energy Efficiency. In: IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 68., 2008, Calgary, Canada. **Proceedings...**

New York: IEEE, 2008. p. 1–5.

CHEN, D.; NIXON, M.; MOK, A. **WirelessHART™ Real-Time Mesh Network for Industrial Automation**. Boston, MA: Springer US, 2010.

CHEN, J. *et al.* Dynamic Channel Assignment for Wireless Sensor Networks: A Regret Matching Based Approach. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, New York, v. 26, n. 1, p. 95–106, Jan. 2015.

CHEN, T. *et al.* CogMesh: A Cluster-Based Cognitive Radio Network. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2., 2007, Dublin, Ireland. **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 168–178.

CORDEIRO, C. *et al.* IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2005. Baltimore, MD, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2005. p. 328–337.

CORDEIRO, C.; CHALLAPALI, K. C-MAC: A Cognitive MAC Protocol for Multi-Channel Wireless Networks. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2., 2007, Dublin, Ireland. **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 147–157.

CORMIO, C.; CHOWDHURY, K. R. A survey on MAC protocols for cognitive radio networks. **Ad Hoc Networks**, [S.l.], v. 7, n. 7, p. 1315–1329, Sept. 2009.

COUCH, L. W. **Digital and Analog communication systems**. New Jersey: Pearson Education, 2014.

DARPA. **Final Technical Report: Next Generation (XG) Architecture and Protocol Development (XAP)**. New York: Defense Advanced Research Projects Agency, 2005. p. 1–248.

DE GUGLIELMO, D.; ANASTASI, G.; SEGHETTI, A. From IEEE 802.15.4 to IEEE 802.15.4e: A Step Towards the Internet of Things. In: GAGLIO, S.; LO RE, G. **Advances in Intelligent Systems and Computing**. Cham: Springer, 2014. p. 135–152.

DOMENICO, A.; STRINATI, E. C.; BENEDETTO, M.-G. A Survey on MAC Strategies for Cognitive Radio Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, New York, v. 14, n. 1, p. 21–44, Jan. 2012.

DUGAN, J. **Iperf tutorial**. Columbus: Summer JointTechs, 2010. p. 1–4.

ENOCEAN ALLIANCE. **ENOCEAN: BACnet and EnOcean enable Energy Efficient Buildings**. Frankfurt, 2016.

FADEL, E. *et al.* Spectrum-aware bio-inspired routing in cognitive radio sensor networks for smart grid applications. **Computer Communications**, [S.l.], v. 101, p. 106–120, mar. 2017.

FAGANELLO, L. R. *et al.* Improving reinforcement learning algorithms for dynamic spectrum allocation in cognitive sensor networks. In: IEEE WIRELESS

COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2013, Shanghai, China. **Proceedings...** New York: IEEE, 2013. p. 35–40.

FANTACCI, R.; MARABISSI, D. Cognitive spectrum sharing: an enabling wireless communication technology for a wide use of smart systems. **Future Internet**, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 23, May 2016.

FLORES, A. B. *et al.* IEEE 802.11af: a standard for TV white space spectrum sharing. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 51, n. 10, p. 92–100, Oct. 2013.

FREESCALE SEMICONDUCTOR. **MC1322x Simple Media Access Controller (SMAC): Reference Manual 22XSMACRM**. [S.l.]: Freescale, 2007. p. 1–48.

FREESCALE SEMICONDUCTOR. **MC1322x Advanced ZigBee™ - Compliant SoC Platform for the 2.4 GHz IEEE® 802.15.4 Standard Reference Manual**. [S.l.]: Freescale, 2012. p. 1–532.

GANESAN, G.; YE LI. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2005. Baltimore, MD, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2005. p. 137–143.

GARZON, J. L. T. *et al.* Energy detection method enhanced by autocorrelation. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INSTRUMENTATION SYSTEMS, CIRCUITS AND TRANSDUCERS, 2016, Belo Horizonte. **Proceedings...** New York: IEEE, 2016. p. 61–66.

GARZON, J. T. *et al.* Response of a learning method for channel access in a beacon-enabled wireless sensor network. In: IEEE LATIN-AMERICAN CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, 8., 2016, Medellin, Colombia. **Proceedings...** New York: IEEE, 2016. p. 1–6.

GHASEMI, A.; SOUSA, E. S. Optimization of Spectrum Sensing for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks. In: IEEE CONSUMER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 4., 2007, Las Vegas, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 1022–1026.

HAMDAOUI, B.; SHIN, K. G. OS-MAC: An Efficient MAC Protocol for Spectrum-Agile Wireless Networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, New York, v. 7, n. 8, p. 915–930, Aug. 2008.

HAYKIN, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 23, n. 2, p. 201–220, Feb. 2005.

HOSSAIN, E.; NIYATO, D.; KIM, D. I. Evolution and future trends of research in cognitive radio: a contemporary survey. **Wireless Communications and Mobile Computing**, [S.l.], v. 15, n. 11, p. 1530–1564, 10 Aug. 2015.

HUNN, N.; LANE, W. Wibree - The Marvellous World of Wireless Microdata. **Wireless Connectivity out of the box**, [S.l.], v. 1, p. 1–6, 2007.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62601 STD: Wireless**

Industry Automation Specifications for Process Automation. Geneva, 2011.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 1900.1 STD:** IEEE Standard Definitions and Concepts for Dynamic Spectrum Access: Terminology Relating to Emerging Wireless Networks, System Functionality, and Spectrum Management. New York, 2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11AB STD:** Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. New York, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11AF STD:** Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 5: Television White Spaces (TVWS) Operation. New York, 2013.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.15.2 STD:** Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands. New York, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.15.3 STD:** Part 15.3: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for high rate wireless person area networks (WPANs). New York, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.15.4 STD:** Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). New York, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.15.4 STD:** Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York, 2006.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.22 STD:** Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands. New York, 2011.

JIA, J.; ZHANG, Q.; SHEN, X. HC-MAC: A Hardware-Constrained Cognitive MAC for Efficient Spectrum Management. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 26, n. 1, p. 106–117, Jan. 2008.

JIANG, C.; CHEN, Y.; LIU, K. Renewal-Theoretical Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks with Unknown Primary Behavior. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 31, n. 3, p. 406–416, 2011.

JOSHI, G. P.; NAM, S. Y.; KIM, S. W. Cognitive radio wireless sensor networks: applications, challenges and research trends. **Sensors**, [S.l.], v. 13, n. 9, p. 11196–11228, 2013.

KAELBLING, L. P.; LITTMAN, M. L.; MOORE, A. W. Reinforcement Learning: A survey. **Journal of artificial intelligence research**, [S.l.], v. 4, p. 237–285, 1996.

KONDAREDDY, Y. R.; AGRAWAL, P. Synchronized MAC Protocol For Multi-Hop

Cognitive Radio Networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, 2008, Beijing. **Proceedings...** New York: IEEE, 2008. p. 3198–3202.

KUMAR, K.; PRAKASH, A.; TRIPATHI, R. Spectrum handoff in cognitive radio networks: A classification and comprehensive survey. **Journal of Network and Computer Applications**, [S.l.], v. 61, p. 161–188, Feb. 2016.

KUOR-HSIN, C.; MASON, B. The IEEE 802.15.4g standard for smart metering utility networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART GRID COMMUNICATIONS, 3., 2012. **Proceedings...** New York: IEEE, 2012. p. 476–480.

LI, H. Multi-agent Q-learning of channel selection in multi-user cognitive radio systems: A two by two case. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 2009, San Antonio, TX, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2009. p. 1893–1898.

MA, L.; HAN, X.; SHEN, C.-C. Dynamic open spectrum sharing MAC protocol for wireless ad hoc networks. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2005. Baltimore, MD, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2005. p. 203–213.

MA, L.; SHEN, C.-C.; RYU, B. Single-Radio Adaptive Channel Algorithm for Spectrum Agile Wireless Ad Hoc Networks. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2., 2007, Dublin, Ireland. **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 547–558.

MACHADO, T. et al. WirelessHART network analyzer with coexistence detection. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS, 12., 2014, Porto Alegre. **Proceedings...** New York: IEEE, 2014. p. 696–701.

MINDEN, G. J. *et al.* KUAR: A Flexible Software-Defined Radio Development Platform. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2., 2007, Dublin, Ireland. **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 428–439.

MITOLA, J.; MAGUIRE, G. Q. Cognitive radio: making software radios more personal. **IEEE Personal Communications**, New York, v. 6, n. 4, p. 13–18, 1999.

MOLISCH, A. F.; GREENSTEIN, L. J.; SHAFI, M. Propagation Issues for Cognitive Radio. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 97, n. 5, p. 787–804, May 2009.

MÜLLER, I. *et al.* Namimote: A Low-Cost Sensor Node for Wireless Sensor Networks. In: INTERNET OF THINGS, SMART SPACES, AND NEXT GENERATION NETWORKING, 2012, Berlin. **Proceedings...** Heidelberg: Springer, 2012. p. 391–400.

MULLIGAN, G. The 6LoWPAN architecture. In: PROCEEDINGS OF THE 4TH WORKSHOP ON EMBEDDED NETWORKED SENSORS - EMNETS '07, 2007, Cork, Ireland. **Proceedings...** New York, USA: ACM Press, 2007. p. 78-82.

NAPARSTEK, O.; COHEN, K. Deep multi-user reinforcement learning for dynamic spectrum access in multichannel wireless networks. **arXiv preprint**, [S.l.], p. 1–17, 2017.

- NIXON, M. A Comparison of WirelessHART™ and ISA100.11a. **Emerson White Paper**, [S.l.]: Emerson, 2012. p. 1–39.
- OTO, M. C.; AKAN, O. B. Energy-Efficient Packet Size Optimization for Cognitive Radio Sensor Networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, New York, v. 11, n. 4, p. 1544–1553, Apr. 2012.
- PAWELCZAK, P. *et al.* Cognitive radio emergency networks - requirements and design. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2005. Baltimore, MD, USA. **Proceedings...**, New York: IEEE, 2005. p. 601–606.
- PEH, E.; LIANG, Y.-C. Optimization for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks. In: IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2007, Hong Kong. **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 27–32.
- QI, J.; SHIMAMOTO, S. A cognitive mobile sensor network for environment observation. **Telematics and Informatics**, [S.l.], v. 29, n. 1, p. 26–32, Feb. 2012.
- REED, J. H. **Software radio: a modern approach to radio engineering**. New Jersey: Prentice Hall Professional, 2002.
- ROMERO, E. *et al.* Energy efficiency strategy in D2D cognitive networks using channel selection based on game theory and collaboration. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, [S.l.], v. 12, n. 8, p. 2834652, 2016.
- SHUDONG FANG *et al.* A study on DSSS transceivers using OQPSK modulation by IEEE 802.15.4 in AWGN and flat Rayleigh fading channels. In: IEEE REGION 10 CONFERENCE TENCON, 2010, Fukuoka, Japan. **Proceedings...** New York: IEEE, 2010. p. 1347–1351.
- SILVA, V. F.; MACEDO, D. F.; LEONI, J. L. Machine learning-based spectrum decision algorithms for Wireless Sensor Networks. In: IEEE ANNUAL CONSUMER COMMUNICATIONS & NETWORKING CONFERENCE, 13., 2016, Las Vegas, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2016. p. 1024–1029.
- SINGHAL, D.; BARJATIYA, S.; RAMAMURTHY, G. A novel Network architecture for Cognitive Wireless Sensor Network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING, COMMUNICATION, COMPUTING AND NETWORKING TECHNOLOGIES, 2011, Thuckalay, Tamil Nadu, India. **Proceedings...** New York: IEEE, 2011. p. 76–80.
- SHARED SPECTRUM COMPANY. **General RF Band Survey: General Survey of Radio Frequency Bands – 30 MHz to 3 GHz**. Vienna, USA: Shared Spectrum Company (SSC), 2010. p. 1–47.
- SHARED SPECTRUM COMPANY. **Spectrum occupancy measurements: Chicago**, Illinois, november 16-18, 2005. Illinois, USA: Shared Spectrum Company (SSC), 2005. p. 1–58.
- STABELLINI, L. Energy-aware exploitation of white spaces in the time domain for wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS, 7., 2010, York, United Kingdom. **Proceedings...** New

York: IEEE, 2010. p. 981–985.

STABELLINI, L.; JAVED, M. U. Experimental Comparison of Dynamic Spectrum Access Techniques for Wireless Sensor Networks. In: IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 71., 2010, Taipei, Taiwan. **Proceedings...** New York: IEEE, 2010. p. 1–5.

STOJKOSKA, B. R.; AVRAMOVA, A. P.; CHATZIMISIOS, P. Application of Wireless Sensor Networks for Indoor Temperature Regulation. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, [S.l.], p. 1–10, May. 2014.

SUN, S. et al. A Stackelberg game spectrum sharing scheme in cognitive radio-based heterogeneous wireless sensor networks. **Signal Processing**, [S.l.], v. 126, p. 18–26, 2016.

TOSCHI, G. M.; CAMPOS, L. B.; CUGNASCA, C. E. Home automation networks: a survey. **Computer Standards & Interfaces**, [S.l.], v. 50, p. 42–54, Feb. 2017.

VAMSI KRISHNA, T.; DAS, A. A survey on MAC protocols in OSA networks. **Computer Networks**, [S.l.], v. 53, n. 9, p. 1377–1394, June 2009.

WANG, J.; GHOSH, M.; CHALLAPALI, K. Emerging cognitive radio applications: A survey. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 49, n. 3, p. 74–81, Mar. 2011.

WEISS, T. A.; JONDRAL, F. K. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 42, n. 3, p. S8-14, Mar. 2004.

WINTER, J. M. *et al.* Wireless Coexistence and Spectrum Sensing in Industrial Internet of Things: An Experimental Study. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, [S.l.], p. 1–12, 2015.

WUNSCH, F.; JAKEL, H.; JONDRAL, F. K. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 OQPSK and CSS PHY in the Presence of Interference. In: IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 82., 2015, Boston, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2015. p. 1–5.

YAU, K.-L. A.; KOMISARCZUK, P.; TEAL, P. D. Cognitive Radio-based Wireless Sensor Networks: Conceptual design and open issues. In: IEEE CONFERENCE ON LOCAL COMPUTER NETWORKS, 34., 2009, Zurich, Switzerland. **Proceedings...** New York: IEEE, 2009. p. 955–962.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. **Computer Networks**, [S.l.], v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008.

YUAN, Y. *et al.* KNOWS: Cognitive Radio Networks Over White Spaces. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2., 2007, Dublin, Ireland. **Proceedings...**, New York: IEEE, 2007. p. 416–427.

YUCEK, T.; ARSLAN, H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, New York, v. 11, n. 1, p. 116–130, 2009.

ZHANG, H. *et al.* Distributed Spectrum-Aware Clustering in Cognitive Radio Sensor Networks. In: IEEE GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE, 2011, Houston, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2011. p. 1–6.

ZHAO, Q. *et al.* Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v. 25, n. 3, p. 589–600, Apr. 2007.

ZIGBEE ALLIANCE. **Document 053474r17**: ZigBee Specification. San Ramon, CA, USA, 2008

ZOU, C.; CHIGAN, C. On game theoretic DSA-driven MAC for cognitive radio networks. **Computer Communications**, [S.l.], v. 32, n. 18, p. 1944–1954, Dec. 2009.