

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DAS - DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Suelen Macedo Laurindo

**SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE NODOS COOPERANTES EM
ABORDAGENS DE COMUNICAÇÃO COOPERATIVA EM REDES
DE SENSORES SEM FIO**

Florianópolis

2017

Suelen Macedo Laurindo

**SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE NODOS COOPERANTES EM
ABORDAGENS DE COMUNICAÇÃO COOPERATIVA EM REDES
DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação submetida ao PPGEAS - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas para a obtenção do Grau de mestre.

Orientador: Prof. Carlos Barros Montez, Dr.

Coorientador: Prof. Ricardo Moraes, Dr.

Coorientador: Prof. Odilson Tadeu Valle, Dr.

Florianópolis

2017

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

Laurindo, Suelen Macedo

Seleção automática de nodos cooperantes em
abordagens de comunicação cooperativa em redes de
sensores sem fio / Suelen Macedo Laurindo ;
orientador, Carlos Barros Montez, coorientador,
Ricardo Moraes, coorientador, Odilson Valle, 2017.
129 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas,
Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Nodos
Cooperantes. 3. Redes de Sensores Sem Fio. 4.
Diversidade Cooperativa. I. Montez, Carlos Barros.
II. Moraes, Ricardo . III. Valle, Odilson IV.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.
V. Título.

Suelen Macedo Laurindo

**“SELEÇÃO AUTOMÁTICA DE NODOS COOPERANTES EM
ABORDAGENS DE COMUNICAÇÃO COOPERATIVA EM REDES
DE SENSORES SEM FIO”**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas”, e aprovada em sua forma final pelo PPGEAS - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Florianópolis(SC), 26 de Maio 2017.

Prof. Daniel Ferreira Coutinho, Dr.
Coordenador do PGEAS

Prof. Ricardo Moraes, Dr.
Coorientador

Prof. Odilson Tadeu Valle, Dr.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.
Presidente/Orientador
Universidade Federal De Santa Catarina

Prof. Francisco Vasques, Dr.
Universidade do Porto

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Mario Antonio Ribeiro Dantas, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível direta e indiretamente pelo apoio que recebi. Por isso agradeço a Deus, por me mostrar que sempre é possível e por me dar forças nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais Fátima e José por não medirem esforços para tornar o meu sonho realidade. Que mesmo longe se fizeram presentes com toda demonstração de amor, me proporcionando motivação para a conclusão deste trabalho.

Ao meu namorado Luan, por estar sempre ao meu lado, me dando forças e me fazendo sorrir, por mais difíceis que tenham sido alguns momentos desta caminhada. Por fazer desta, sua caminhada também, tornando-a muito mais agradável.

Ao meu orientador Carlos Montez e meus co-orientadores Ricardo Moraes e Odilson Valle, por estarem sempre presentes tirando minhas dúvidas e por todas as suas orientações, que foram mais do que essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Gustavo Medeiros e Ríad Nassiffe pelas conversas, ideias trocadas e contribuição que cada um fez para este trabalho.

Á minha amiga Patrícia, pelas conversas e risadas que fizeram essa caminhada divertida.

A todos os meus colegas do mestrado pela parceria e troca de experiências. Aos colegas do LARM por compartilharem o laboratório e muitas risadas.

E por fim agradeço a CAPES pelo apoio financeiro neste estudo.
Obrigada!

Eis que eu estou convosco todos os dias, até a
consumação dos tempos.

(Bíblia, Mateus 28:20)

RESUMO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) estão sujeitas a problemas de confiabilidade de comunicação devido a interferências, atenuação de sinal, obstáculos etc. Nessas redes, a diversidade cooperativa é uma técnica muito utilizada para melhorar o desempenho das comunicações, na qual alguns nodos são escolhidos como cooperantes e são responsáveis por retransmitir mensagens de outros nodos. A escolha de quais nodos cumprirão o papel de nodos cooperantes é uma etapa decisiva na aplicação desta técnica. Alguns trabalhos na literatura fazem a escolha baseada apenas em um ou, no máximo, dois parâmetros, não sendo capazes de fazer uma escolha eficiente, reduzindo consequentemente a confiabilidade obtida em suas propostas. Nesta dissertação é proposta uma nova técnica de seleção de nodos cooperantes, chamada Smart, a qual considera vários critérios que são relevantes para o funcionamento da rede. A seleção é realizada usando técnicas de otimização, visando selecionar o menor número de nodos cooperantes mas, assegurando que todos os nodos da rede possuam um vizinho que seja cooperante, aumentando as chances das mensagens serem entregues ao destino. Para avaliar a técnica Smart foi utilizado o simulador OMNeT++/Castalia, comparando-a com três técnicas do estado do arte. Os resultados mostram que a técnica Smart apresenta um desempenho superior às outras técnicas analisadas.

Palavras-chave: RSSF. Diversidade Cooperativa. Nodos Cooperantes

ABSTRACT

Wireless Sensors Networks (WSNs) are subject to communication problems due to interference, signal attenuation, obstacles, etc. In these networks, cooperative diversity is a widely used technique for improving the communications performance, where some nodes are selected as relay and are responsible to assist neighbors nodes with packets retransmissions. The selection of relays nodes is a decisive step whenever this technique is applied. Some studies in the literature select relays nodes based on only one or two parameters. Consequently, this type of technique is unable to select relay node in an efficient way, reducing the network reliability. This master thesis proposes a new technique, named Smart, for the selection of relay WSN nodes according to criteria considered relevant for an adequate network operation. The selection is performed using optimization techniques, which target the selection of the smallest number of relay nodes and, at same time, ensure that all nodes are linked to at least one corresponding relay node, enabling messages reach their destinations in noisy environments. OMNeT++/Castalia was used to evaluate the Smart technique, which was compared with three state-of-the-art techniques. Simulation results show that the Smart technique clearly outperforms other analyzed state-of-the-art cooperative communication techniques.

Keywords: WSN. Cooperative Diversity. Relay.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 | Estrutura do superquadro em redes IEEE 802.15.4..... | 35 |
| Figura 2 | Fluxograma do algoritmo CSMA-CA. | 37 |
| Figura 3 | Topologia Estrela e Ponto-a-Ponto. | 39 |
| Figura 4 | Topologia <i>Cluster-Tree</i> | 39 |
| Figura 5 | Transmissão com nodos cooperantes. | 41 |
| Figura 6 | Taxonomia seleção de nodos cooperantes | 43 |
| Figura 7 | Etapas para estimar a condição do canal. | 44 |
| Figura 8 | Transmissão do símbolo piloto. | 47 |
| Figura 9 | Fluxo de mensagem para seleção periódica e adaptativa (a) e operações dos nodos depois da seleção (retransmissão) (b)..... | 55 |
| Figura 10 | Conjuntos X_1 (a), X_2 (b) e Y (c) | 60 |
| Figura 11 | Frame Beacon. | 73 |
| Figura 12 | Frame Mensagem de Dados. | 74 |
| Figura 13 | Rede ilustrando a vizinhança de cada nodo. | 77 |
| Figura 14 | Enumeração Explícita. | 79 |
| Figura 15 | corte por Otimilidade. | 80 |
| Figura 16 | corte por Limite. | 80 |
| Figura 17 | Sem Possibilidade de Corte. | 81 |
| Figura 18 | Etapa de transmissão. | 84 |
| Figura 19 | Etapa de retransmissão. | 85 |
| Figura 20 | Cenário com o Coordenador no Centro (a) e Cenário com o Coordenador em um Canto (b). | 94 |
| Figura 21 | Taxa de Sucesso - Coordenador no Centro. | 97 |
| Figura 22 | Taxa de Sucesso - Coordenador no Canto. | 97 |
| Figura 23 | Média de Cooperações realizadas por nodo - Coordenador no Centro. | 99 |
| Figura 24 | Média de Cooperações realizadas por nodo - Coordenador no Canto. | 99 |
| Figura 25 | Percentual de Retransmissões Inúteis - Coordenador no Centro. | 100 |
| Figura 26 | Percentual de Retransmissões Inúteis - Coordenador no Canto. | 100 |
| Figura 27 | Média do Consumo Energético da Rede - Coordenador no Centro. | 101 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 28 Média do Consumo Energético da Rede - Coordenador no Canto..... | 101 |
| Figura 29 Arquivo omnetpp.ini - Configurações generalizadas. | 123 |
| Figura 30 Arquivo omnetpp.ini - Configurações Módulos..... | 124 |
| Figura 31 Arquivo omnetpp.ini - Configurações Módulo MAC..... | 125 |
| Figura 32 Arquivo omnetpp.ini - Configurações Para a Seleção de Cooperantes..... | 126 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 | Canais e taxa de dados do IEEE 802.15.4..... | 34 |
| Tabela 2 | Características das técnicas de seleção de nodos cooperantes. | 48 |
| Tabela 3 | Conjunto de regras fuzzy..... | 60 |
| Tabela 4 | Comparação dos Trabalhos Relacionados..... | 69 |
| Tabela 5 | Características das Técnicas Utilizadas na Avaliação do modelo Proposto..... | 89 |
| Tabela 6 | Características dos Simuladores..... | 92 |
| Tabela 7 | Dados obtidos na busca..... | 119 |
| Tabela 8 | Dados obtidos com a seleção..... | 119 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--------------------------------------------------------|
| ACK | Acknowledgment |
| AF | Amplify-and-Forward |
| ASK | Amplitude Shift-Keying |
| BE | Backoff Exponent |
| BI | Beacon Interval |
| BO | Beacon Order |
| BPSK | Binary Phase Shift Keying |
| CAP | Contention Access Period |
| CCA | Clear Channel Assessment |
| CFP | Contention-Free Period |
| CSI | Channel State Information |
| CSMA-CA | Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance |
| CTS | Clear-to-Send |
| CW | Contention Window |
| D-CSPA | Distributed Cooperation Selection and Power Assignment |
| DF | Decode-and-Forward |
| FBRs | Feedback-Based Relay Selection |
| FER | Frame Error Rate |
| FFD | Full Function Device |
| FSMC | Finite-State Markov Channels |
| GTS | Guaranteed Time Slot |
| ICT | Information and Communication Technology |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| LLDN | Low Latency Deterministic Networks |
| LQI | Link Quality Indication |
| MAC | Medium Access Control |
| MCG | Maximum Outdate Relay-Destination Channel Gain |
| MCS | Modulation and Coding Scheme |
| MIMO | Multiple-Input Multiple-Output |
| MLT | Maximum Lifetime |
| MOP | Outages with Minimum Probability |
| MRC | Maximum Ratio Combining |

| | |
|--------|---------------------------------------------------|
| NACK | Negative Acknowledgment |
| NB | Number of Backoffs |
| NED | Network Description |
| NICTA | National ICT Australia |
| O-CS | Optimal Cooperator Selection |
| O-CSPA | Optimal Cooperator Selection and Power Assignment |
| O-QPSK | Offset Quadrature Phase Shift Keying |
| OORS | Outage-Optimal Relay Selection |
| OPA | Optimal Power Allocation |
| OT-MRS | Output-Threshold Multiple Relay Selection |
| PAN | Personal Area Network |
| PARS | Power-Aware Relay Selection |
| PER | Packet-Error-Rate |
| MILP | Mixed Integer Linear Programming |
| QoS | Quality of Service |
| R-CS | Random Cooperator Selection |
| RFD | Reduced Function Device |
| RSSF | Redes de Sensores Sem Fio |
| RSSI | Received Signal Strength Indicator |
| RTS | Request-to-Send |
| SD | Superframe Duration |
| SNR | Signal-to-noise ratio |
| SO | Superframe Order |
| TDMA | Time Division Multiple Access |
| WPAN | Wireless Personal Area Network |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 27 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 27 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 27 |
| 1.2 | METODOLOGIA | 28 |
| 1.3 | LIMITAÇÃO DO TRABALHO | 28 |
| 1.4 | ORGANIZAÇÃO DO TEXTO | 29 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 31 |
| 2.1 | REDES DE SENSORES SEM FIO | 31 |
| 2.2 | IEEE 802.15.4 | 32 |
| 2.2.1 | Camada Física (PHY) do IEEE 802.15.4 | 33 |
| 2.2.2 | Subcamada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) | 34 |
| 2.2.3 | Topologias | 38 |
| 2.3 | DIVERSIDADE COOPERATIVA | 40 |
| 2.4 | SELEÇÃO DE NODOS COOPERANTES | 41 |
| 2.4.1 | Técnicas de Seleção de Cooperantes: Uma Taxonomia | 42 |
| 2.5 | PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO | 49 |
| 2.5.1 | Problema de Programação Linear | 49 |
| 2.6 | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO | 50 |
| 3 | TRABALHOS RELACIONADOS | 53 |
| 3.1 | SELEÇÃO BASEADA EM ESTIMADORES DE QUALIDADE | 53 |
| 3.2 | SELEÇÃO BASEADA EM ESTIMADORES DE QUALIDADE E FATORES ENERGÉTICOS | 59 |
| 3.3 | SELEÇÃO BASEADA EM ESTIMADORES DE QUALIDADE E VIZINHANÇA | 63 |
| 3.4 | SELEÇÃO BASEADA EM <i>FRAME ERROR RATE</i> | 65 |
| 3.5 | SELEÇÃO BASEADA EM <i>STACKELBERG GAME</i> | 67 |
| 3.6 | COMPARAÇÃO DOS TRABALHOS RELACIONADOS | 68 |
| 3.7 | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO | 69 |
| 4 | PROPOSTA DE UMA TÉCNICA DE SELEÇÃO DE NODOS COOPERANTES | 71 |
| 4.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO | 71 |
| 4.2 | MODELO DO SISTEMA | 72 |
| 4.2.1 | Seleção dos Nodos Cooperantes | 74 |
| 4.2.2 | Funcionamento da Técnica | 81 |
| 4.3 | TÉCNICAS DE SELEÇÃO DE COOPERANTES | 85 |
| 4.3.1 | Seleção Oportunista | 86 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.2 | Seleção Aleatória em Torno do Coordenador | 87 |
| 4.3.3 | Seleção Completamente Aleatória | 88 |
| 4.3.4 | Características das Técnicas de Seleção de Cooperantes ... | 89 |
| 4.4 | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO | 90 |
| 5 | AVALIAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA | 91 |
| 5.1 | SIMULAÇÕES | 91 |
| 5.2 | CENÁRIO DE TESTES E CONFIGURAÇÕES DA SIMULAÇÃO | 93 |
| 5.3 | INDICADORES DE DESEMPENHO | 95 |
| 5.4 | RESULTADOS | 96 |
| 5.5 | CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO | 102 |
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 103 |
| 6.1 | REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS | 103 |
| 6.2 | VISÃO GERAL DO TRABALHO | 103 |
| 6.3 | PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES | 104 |
| 6.4 | ESCOPO DO TRABALHO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS | 105 |
| | REFERÊNCIAS | 107 |
| | APÊNDICE A – PROTOCOLO DE BUSCA E RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA .. | 115 |
| | APÊNDICE B – PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES - OMNeT++ E CASTALIA | 123 |

1 INTRODUÇÃO

No final dos anos 1990, Weiser (1999) escreveu um artigo intitulado ‘*The Computer for the 21st Century*’ em que se referia à computação ubíqua como o futuro para a interação humano-máquina. Nesse documento, ele citou que o objetivo desse tipo de computação é permitir que qualquer usuário possa realizar, em qualquer lugar, acesso a dados computacionais, a qualquer momento.

As primeiras concepções de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) ocorreram nessa mesma época (VALLE, 2014). Poucos anos depois, em 2003, ocorreu o lançamento da primeira versão do padrão de redes de comunicação IEEE 802.15.4 (IEEE Computer, 2011). Como consequência, a viabilização do conceito de computação ubíqua passou a ocorrer exatamente com a consolidação desses dois padrões, através da utilização de sensores acoplados a objetos do dia-a-dia, como etiquetas de roupas, interruptores de luz ou qualquer objeto de forma transparente ao usuário (MELO et al., 2008). Atualmente, o surgimento de outros conceitos igualmente importantes e relacionados com o da computação ubíqua, tais como Internet das coisas, cidades inteligentes (AVELAR et al., 2012), e agricultura de precisão (RABER et al., 2013) vêm impulsionando, ainda mais, a adoção das RSSF.

Basicamente, as RSSF servem como uma infraestrutura de monitoramento que permite a coleta de dados de um ambiente e o envio destes dados para um destinatário final (BURATTI et al., 2011). As especificações do IEEE 802.15.4 foram adotadas como um padrão *de facto* nas RSSF, e especificam as camadas física (PHY) e de enlace em redes sem fio. Esse padrão foi criado com o objetivo de fornecer conectividade sem fio com baixa complexidade, custo reduzido e pouco consumo energético, que são características importantes para RSSF (IEEE Computer, 2011).

As RSSF são compostas de diversos dispositivos (ou nodos) de baixa potência, com sensores acoplados, além de processador, memória, fonte de alimentação (usualmente, por baterias) e rádio (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Estes nodos são dispositivos pequenos, simples e que apresentam limitações nos recursos computacionais e energéticos.

A baixa capacidade energética das baterias e a falta de confiabilidade no envio de pacotes são dois dos principais desafios que precisam ser superados em RFFS. Nem sempre é viável realizar trocas de baterias, já que em determinadas aplicações os nodos podem se encontrar em áreas de difícil acesso; ou ainda, o grande número de nodos de algumas redes tornam economicamente inviável essa substituição. Por isso, é necessário utilizar os nodos sensores de modo a estabelecer períodos de "sono" (*sleep time*), nos quais os

nodos podem desligar seus circuitos, reduzindo o consumo de bateria e dando uma sobrevida à rede como um todo (VALLE, 2014).

Com relação ao problema de comunicação, obstáculos entre os nodos podem atenuar ou refletir o sinal, fazendo com que mensagens não alcancem com sucesso seu destinatário. Ademais, interferências de outras redes, e de equipamentos eletrônicos provocam perdas de mensagem. Toda essa situação é exacerbada pelo fato do padrão IEEE 802.15.4 ser voltado para redes de baixa potência de sinal, fazendo com que as RSSF que adotam esse padrão não sejam confiáveis. Para obter maior taxa de sucesso no envio de mensagens, técnicas que envolvem a cooperação entre os nodos (VALLE, 2014) podem ser usadas para melhorar a diversidade espacial e temporal. Essas técnicas vêm sendo denominadas como técnicas de diversidade cooperativa (WANG; SYUE, 2009).

Técnicas de diversidade cooperativa buscam melhorar o desempenho da rede sem aumentar a complexidade do hardware e ainda promover ganho de diversidade espacial no destino (WANG; SYUE, 2009). Estas técnicas permitem a criação de um sistema MIMO (*multiple-input-multiple-output*) virtual, já que a implantação de múltiplas antenas em RSSF geralmente não é uma opção viável em nodos de baixo custo (WANG; SYUE, 2009).

A retransmissão cooperativa é uma técnica na qual os nodos estão espacialmente distribuídos e cooperam retransmitindo mensagens, promovendo melhoria na comunicação (HIMANSHU; ASHUTOSH; RUPALI, 2015). Desta maneira, um nodo cooperante escuta o meio e obtêm as mensagens que consegue ouvir, armazenando-as e retransmitindo-as para o destinatário. Assim, as mensagens que não conseguiram ser entregues diretamente para o destinatário serão retransmitidas a este por meio da cooperação de outros nodos (VALLE, 2014).

O desempenho da retransmissão cooperativa depende fortemente da eficiência do processo utilizado para selecionar os melhores nodos cooperantes (JAMAL; MENDES, 2010). Utilizar todos os nodos como cooperantes permite obter uma grande diversidade cooperativa, mas gera desperdícios de banda, aumenta o consumo energético e prejudica a sincronização entre os nodos da rede (WANG; SYUE, 2009). Consequentemente, um dos principais desafios na retransmissão cooperativa é selecionar o conjunto adequado de nodos cooperantes e, assim, melhorar a eficiência da transmissão de dados (JAMAL; MENDES, 2010).

O foco deste trabalho está nas técnicas de seleção de nodos cooperantes em RSSF, as quais selecionarão os nodos que irão retransmitir para o destinatário as mensagens dos nodos que não apresentam comunicação direta com este, e assim melhorar o desempenho das transmissões.

A maioria dos artigos relacionados com a seleção de nodos cooperan-

tes utilizam poucos critérios para realizar a seleção (BLETSAS et al., 2006; CHEN et al., 2006; AMARASURIYA; ARDAKANI; TELLAMBURA, 2010; FENG; XIAO; CIMINI, 2013). Os artigos que consideram apenas um critério, usam a condição de canal entre o nodo que deseja realizar a transmissão, o cooperante e o coordenador. Já os artigos que consideram mais de um critério, normalmente, consideram somente a condição do canal e a energia residual. Ademais, muitas dessas soluções não melhoram significativamente o funcionamento da rede.

A partir destas pesquisas, observou-se que não há trabalhos que levem em consideração vários critérios que representam o funcionamento da rede, os quais poderiam ser ponderados para melhorar o desempenho das retransmissões. A partir do exposto acima, este trabalho é fundamentado sobre a seguinte pergunta de pesquisa:

- “É possível contribuir com o estado da arte e propor uma nova técnica de seleção de nodos cooperantes, considerando vários critérios representativos do funcionamento da rede, visando melhorar o desempenho de transmissões de dados em RSSF através da diversidade cooperativa?”

1.1 OBJETIVOS

Considerando que a motivação deste trabalho envolve a escolha adequada de nodos cooperantes em técnicas que envolvem diversidade cooperativa, o objetivo geral e os objetivos específicos são apresentados na sequência.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho possui como objetivo geral demonstrar que uma técnica de seleção de nodos cooperantes, utilizando múltiplos critérios que representam o funcionamento da rede, melhora a confiabilidade das transmissão em redes baseadas no padrão IEEE 802.15.4 organizadas em topologia estrela.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as técnicas de seleção de nodos cooperantes existentes na literatura;
- Propor e implementar uma nova técnica de seleção de nodos cooperantes;

- Modelar, através do simulador OMNeT++, cenários de redes de sensores sem fio para testes da técnica implementada;
- Definir as métricas de desempenho a serem utilizadas e realizar uma avaliação comparativa entre a técnica proposta e técnicas encontradas na literatura;

1.2 METODOLOGIA

O trabalho será realizado através de uma pesquisa exploratória e tecnológica com a implementação de uma nova técnica de seleção de nodos cooperantes em redes IEEE 802.15.4, utilizando a topologia estrela. Para atingir os objetivos, o trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

- Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre as técnicas utilizadas na seleção de nodos cooperantes em redes de sensores sem fio;
- Analisar o resultado obtido na revisão sistemática para ajudar a propor técnica para escolha de nodos cooperantes, definir as métricas de desempenho que serão utilizadas e escolher outras técnicas para fins de comparação;
- Estudar o simulador OMNeT++ e o *framework* Castalia e usá-los para implementar a técnica proposta neste trabalho (Smart) e modelar cenários de RSSF para testar a técnica proposta;
- Comparar a técnica Smart com outras técnicas do estado da arte de divulgar os resultados através da escrita de artigos e desta dissertação.

1.3 LIMITAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é focado na escolha de nodos cooperantes, também chamados de retransmissores. Contudo não se espera tratar todas as questões pertinentes a esse assunto. O ponto de partida do trabalho foi delimitado de forma a tratar questões específicas. Como exemplo, o escopo deste trabalho limita-se a RSSF em topologia estrela. A abordagem de acesso ao meio assumida nos envios de mensagens é baseada em TDMA (*time division multiple access*), ou seja baseada em *slots*, da mesma forma que é prevista no padrão LLDDN do IEEE 802.15.4. Técnicas de fusão ou agregação de dados ou codificação de redes costumam ser empregadas junto com técnicas de diversidade

cooperativa, mas neste trabalho as mensagens são retransmitidas sem o emprego de quaisquer dessas técnicas. Finalmente, não se pretende implementar o Smart com protótipos reais e realizar medições. A análise de desempenho da técnica proposta é feita sobre o uso de um simulador de RSSF, o qual se assume modelar de forma realista o comportamento do rádio, meio físico e bateria dos nodos da rede.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este documento está organizado em seis capítulos. No segundo capítulo é realizada uma revisão da fundamentação teórica das principais áreas de pesquisa relacionadas a este trabalho, tais como, RSSF, diversidade cooperativa, seleção de nodos cooperantes e IEEE 802.15.4. O terceiro capítulo apresenta os trabalhos selecionados na revisão sistemática. No quarto capítulo é realizada a proposta de uma técnica de seleção de nodos cooperantes em redes IEEE 802.15.4, utilizando a topologia estrela. Além disso, são apresentadas as técnicas de seleção de nodos cooperantes escolhidas na literatura para comparar com a técnica proposta, como um método de avaliação. O quinto capítulo apresenta a descrição do cenário na qual as simulações serão realizadas; além das métricas usadas nas comparações e o conjunto de resultados das simulações realizadas. Finalizando, o sexto capítulo apresenta as considerações finais e as propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta conceitos básicos sobre RSSF e padrão IEEE 802.15.4, além de uma revisão bibliográfica sobre diversidade cooperativa, e problemas de otimização, considerando que a proposta deste trabalho utilizará técnicas de otimização para maximizar o uso dos recursos na rede. Desta forma serão descritos de forma sucinta os aspectos mais relevantes para a compreensão deste trabalho.

2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO

As RSSF ganharam destaque nos últimos anos devido ao desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas eletromecânicos e dos microprocessadores, os quais deram origem aos chamados “sensores inteligentes” (*smart sensors*). Este termo é atribuído aos equipamentos de baixa potência que são munidos de um ou vários sensores, fonte de alimentação, memória, processador, rádio (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Uma RSSF é composta por nodos sensores, autônomos, que realizam leitura de dados por meio de sensores. Os sensores podem ser analógicos ou digitais, sendo capazes de monitorar fenômenos variados, tais como temperatura, umidade, luminosidade, pressão etc (VALLE, 2014). Os dados podem sofrer um processamento local nos nodos antes de serem enviados para uma estação base. Dessa forma, durante seus tempos de vida, os nodos são responsáveis por executar três tarefas básicas: sensoriamento, processamento e comunicação (LOUREIRO et al., 2003).

As RSSF são comumente utilizadas para realizar monitoramento de ambientes, podendo estes serem internos (prédios, estruturas, fábricas etc) ou externos (campos, cidades etc). Os ambientes podem ser de pequenas, médias ou grandes dimensões. As redes podem ser densas (com vários nodos próximos entre si) ou podem ser esparsas. Essas redes ganharam espaço e se tornaram atrativas para muitas áreas, como por exemplo no cenário militar, na detecção de desastres naturais, em aplicações biomédicas e em cenários industriais, por apresentarem características vantajosas, tais como implantação rápida e auto-organização (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Um grande desafio das RSSF é reduzir as perdas de mensagens que ocorrem devido a interferências e, simultaneamente, reduzir o consumo energético (WANG; SYUE, 2009). Técnicas de diversidade permitem minimizar os problemas citados e proporcionam um ganho no desempenho do sistema. As técnicas de diversidade visam produzir cópias do sinal transmitido

para que o desvanecimento sofrido pelos sinais seja descorrelacionado (geralmente, no tempo e no espaço).

Exemplos de técnicas de diversidade mais comuns são: diversidade temporal, diversidade de frequência e diversidade espacial. Na técnica de diversidade temporal ocorre a transmissão de réplicas da mensagem em intervalos diferentes de tempo. Na técnica de diversidade por frequência, o sinal é transmitido por portadoras em diferentes canais de rádio (GOMEZ-CUBA; ASOREY-CACHEDA; GONZALEZ-CASTANO, 2011). Na técnica de diversidade espacial, a utilização de múltiplas antenas (MIMO - *multiple-input multiple-output*) permite que o sinal transmitido possa alcançar o destino por diferentes caminhos, atenuando o problema de desvanecimento em comunicações sem fio.

No entanto, os sensores normalmente apresentam tamanho reduzido e restrição energética, assim a utilização da técnica de múltiplas antenas pode ser inviável em RSSF (SOUSA, 2009). Novas formas de diversidade espaço-temporal estão sendo desenvolvidas para superar esta restrição, e bons resultados foram obtidos por meio da diversidade cooperativa (SOUSA, 2009). Cooperação em RSSF significa que os nodos podem colaborar uns com os outros de forma a ter um ganho na diversidade espaço-temporal, cooperando para que as mensagens cheguem até o destino (WANG; SYUE, 2009).

2.2 IEEE 802.15.4

De acordo com IEEE Computer (2011), o padrão IEEE 802.15.4 especifica um protocolo de comunicação via rádio em uma rede de área pessoal (WPAN - *Wireless Personal Area Networks*). Define a camada física (PHY) e a sub-camada de controle de acesso ao meio (MAC) da rede. A definição das outras camadas de rede não é realizada neste protocolo, ficando para outros protocolos. O foco deste protocolo é em transmissões de baixo volume de dados e baixo consumo de energia. Ele foi projetado para operar em faixas de frequências abertas sem licença, diante do potencial de aplicações emergentes, como domótica e sensores sem fio (NETO, 2015). Alguns dos recursos oferecidos pelo padrão IEEE 802.15.4 são:

- Suporte às topologias estrela, ponto-a-ponto e *cluster tree*;
- Endereço estendido de 64 bits ou curto de 16 bits;
- Alocação opcional de compartimentos de tempo (*time slots*) para transmissão sem colisões (GTS – *guaranteed time slots*);
- Mecanismo de acesso ao canal em conformidade com os protocolos

CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) ou ALOHA;

- Uso opcional de mensagens de reconhecimento (ACK – *acknowledgment*) para transferência confiável;
- Baixo consumo de energia;
- Indicador de "qualidade" do enlace de comunicação (LQI – *link quality indicator*) entre o nodo transmissor e receptor, medido no receptor.

Este padrão especifica dois tipos diferentes de dispositivos: de função completa (*Full-Function Device* – FFD) e de função reduzida (*Reduced-Function Device* – RFD). Um dispositivo FFD pode realizar todas as funções da rede, podendo atuar como o coordenador da rede de área pessoal (PAN – *personal area network*) ou ainda como um nodo "comum". O nodo coordenador de uma rede tem como responsabilidade a sincronização da rede, e os nodos "comuns" precisam se associar a ele antes de cumprirem suas funções. Os dispositivos RFD, por sua vez, são mais simples e utilizam poucos recursos. Eles podem atuar apenas como nodo "comum", pois são projetados para realizar funções básicas como sensoriamento, realizar transmissões de dados e se associar com um FFD (IEEE Computer, 2011).

2.2.1 Camada Física (PHY) do IEEE 802.15.4

Na camada Física existem algumas opções de frequências que podem ser utilizadas. Algumas dessas opções não podem ser usadas em determinados países, pois dependem dos órgãos regulatórios locais. A Tabela 1 apresenta as opções disponíveis, dentre estas existem 27 canais que podem ser utilizados.

A camada Física é responsável por algumas funções como:

- Ativar e desativar o transceptor do rádio, o que possibilita a recepção e transmissão de dados, ou que o nodo entre no modo *sleep*, no qual seus dispositivos são desligados com a finalidade de economizar energia.
- Avaliação de canal livre (CCA – *Clear Channel Assessment*), que analisa se o canal está disponível ou ocupado (IEEE Computer, 2011).
- Detecção de energia no canal que pode ser utilizado pelo CCA para informar se o canal está livre ou ocupado, e disponibiliza uma estimativa do nível de sinal recebido dentro da largura de banda do canal.

Tabela 1 – Canais e taxa de dados do IEEE 802.15.4.

| Canais | Frequência (MHz) | Faixa de Frequência (MHz) | Modulação | Taxa de Dados (kbps) |
|--------|------------------|---------------------------|------------------|----------------------|
| 0 | 868 | 868-868,6 | BPSK | 20 |
| | | | ASK(opcional) | 250 |
| | | | O-QPSK(opcional) | 100 |
| 1-10 | 915 | 902-928 | BPSK | 40 |
| | | | ASK(opcional) | 250 |
| | | | O-QPSK(opcional) | 250 |
| 11-26 | 2450 | 2400-2483,5 | O-QPSK | 250 |

Fonte: Adaptado de (VALLE, 2014).

- Indicador de qualidade do *link* que informa a qualidade do sinal recebido no canal.
- E a seleção de um entre os 27 canais (VALLE, 2014).

2.2.2 Subcamada de Controle de Acesso ao Meio (MAC)

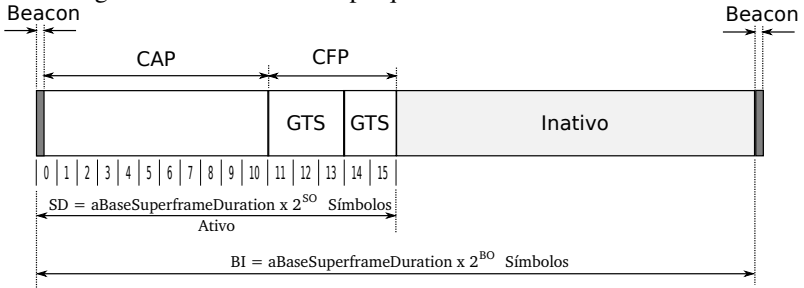
A subcamada MAC (*Medium Access Control*) fornece uma interface entre as camadas superiores e a camada Física (IEEE Computer, 2011), tendo como principal responsabilidade as tarefas:

- Gerar os *beacons* da rede se o dispositivo for um coordenador, além de sincronizar todos os *beacons* da rede;
- Suportar a associação e dissociação de dispositivos na PAN;
- Oferecer mecanismos para segurança dos dispositivos;
- Suportar os mecanismos de acesso ao canal via CSMA-CA e GTS.

Esta camada decide quem pode transmitir e em qual momento, utilizando o mecanismo CSMA-CA. O mecanismo CSMA-CA possibilita que o nodo escute o meio (*carrier sense*) para saber se está livre. Se estiver livre, a transmissão pode ser iniciada. No entanto, mesmo com esse mecanismo, ainda existe o risco de colisão, já que um outro nodo pode iniciar uma transmissão no mesmo momento e existe um tempo mínimo de propagação do sinal no canal (VALLE, 2014).

Na subcamada MAC existem dois modos de operação que podem ser utilizados: com e sem *beacon*. Essa escolha é configurada no coordenador da

Figura 1 – Estrutura do superquadro em redes IEEE 802.15.4.



Fonte: (IEEE Computer, 2011).

rede. Nas PANs em que o *beacon* esteja desabilitado, o mecanismo de acesso ao canal é o CSMA-CA *unslotted*; já em PANs com *beacon* habilitado é utilizado o CSMA-CA *slotted*. Independente do modo de operação, o algoritmo tem como base unidades de tempo denominadas de período de *backoff*, sendo que um período de *backoff* é igual à *aUnitBackoffPeriod*, que equivale a 20 símbolos (cada símbolo corresponde a 4 bits) (IEEE Computer, 2011).

Quando um nó deseja realizar uma transmissão, antes do MAC enviar o quadro (*frame*) para rádio transmitir, é necessário aguardar um tempo aleatório de *backoff*. Se o canal estiver livre, após este tempo de espera, o MAC realiza a transmissão. Caso contrário, ele irá esperar por mais um tempo aleatório de *backoff* (geralmente, maior que o tempo aguardado anteriormente) antes de realizar uma nova tentativa de acesso ao canal. Caso o modo com mensagens de reconhecimento esteja habilitado na rede, existe o envio de um quadro de confirmação de recebimento (ACK) pelo MAC do nó receptor (IEEE Computer, 2011).

Ao utilizar o CSMA-CA *slotted* cada um dos nós deve sincronizar o início de seu período de *backoff* com o início da transmissão de *beacon* do coordenador PAN. A subcamada MAC deve garantir que a camada Física inicie todas as suas transmissões dentro do limite de um período de *backoff*. Ao utilizar o modo de operação *slotted* é criada a estrutura denominada de superquadro. A Figura 1 apresenta um exemplo, ilustrando que a estrutura do superquadro pode ser dividida em duas partes: ativa e inativa (IEEE Computer, 2011).

Conforme visto na Figura 1, a parte ativa do superquadro pode ainda ser dividida em outras duas partes: período de acesso por contenção (CAP) e período livre de contenção (CFP). O tempo correspondente a essas duas partes juntas equivale à duração de 16 *time slots*. O período de tempo correspondente ao CFP pode ser de, no máximo, sete *time slots*. Esses *slots* garantidos,

conforme já citado anteriormente, são denominados GTS. Para a utilização dos GTS, os nodos devem realizar uma solicitação de reserva. Essa reserva é realizada por meio de mensagens enviadas no período CAP ao coordenador PAN. Se houver slots suficientes disponíveis, o coordenador os alocará para o nodo (VALLE, 2014).

O coordenador, ao formar o superquadro, define o período ativo e o período inativo. A definição desses períodos é realizada por meio das equações:

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \quad (2.1)$$

para $0 \leq BO \leq 14$

e

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \quad (2.2)$$

para $0 \leq SO \leq BO \leq 14$

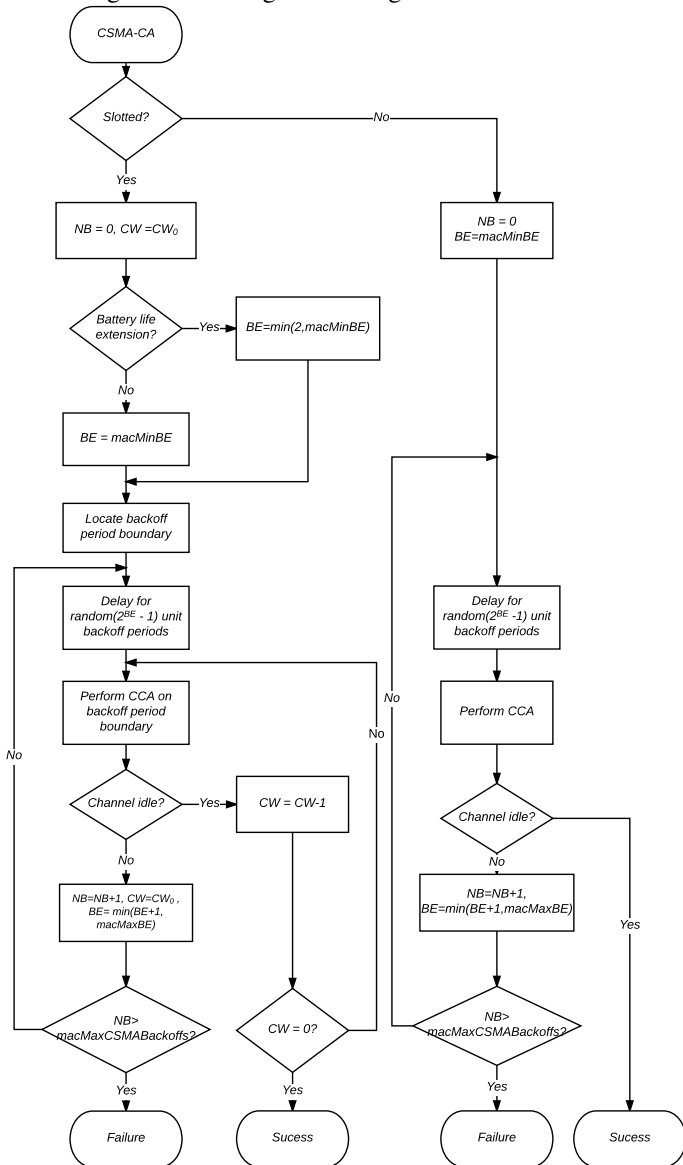
onde o termo BI se refere ao intervalo entre *Beacons* e SD (*Superframe Duration*) se refere a duração do superquadro. O termo BO (*Beacon Order*) descreve o intervalo em que o coordenador transmitirá os (*Beacons*) e o termo SO (*Superframe Order*) descreve a duração da parte ativa do superquadro, que inclui o quadro de *Beacon* (IEEE Computer, 2011).

O fluxo do funcionamento do algoritmo CSMA-CA é apresentado na Figura 2. De acordo com IEEE Computer (2011), o algoritmo apresenta dependência principalmente em três variáveis:

- *Backoff Exponent* (BE) – Esse parâmetro informa quantos períodos de *backoff* o nodo deve esperar antes de realizar o acesso ao canal;
- *Contention Window* (CW) – Esse parâmetro representa o tamanho da janela de contenção, o qual define o número de períodos de *backoff* necessários com o canal livre antes do início da transmissão.
- *Number of Backoff* (NB) – Esse parâmetro define o número de tentativas de acesso ao canal.

Seguindo o fluxo do algoritmo apresentado na Figura 2, NB é inicializado com valor 0 e CW é inicializado com o valor 2. Na sequência, verifica-se se o atributo *macBattLifeExt* está ativo. Caso esteja, BE é inicializado com o mínimo entre o valor 2 e *macMinBE*. Caso contrário, atribui-se *macMinBE* a BE (sendo que pelo padrão o valor de *macMinBE* é 3). Caso seja atribuído o valor 0 à variável *macMinBE*, será desabilitada a prevenção de colisões durante a primeira iteração do algoritmo. Na sequência, o algoritmo procura o

Figura 2 – Fluxograma do algoritmo CSMA-CA.



Fonte: (IEEE Computer, 2011).

limite para o próximo período de *backoff*. No passo seguinte, para evitar colisões, espera-se um tempo aleatório do intervalo entre $[0, 2^{BE} - 1]$ períodos de *backoff* (SEMPREBOM et al., 2014).

Na sequência, por meio do *Clear Channel Assessment* (CCA) é verificado se o canal está ocupado. Caso esteja, as variáveis *NB* e *BE* são incrementadas e *CW* é reiniciado. No entanto, o valor máximo de *BE* é limitado ao valor de *macMaxBE*. Se o valor de *NB* for maior que *macMaxCSMABackoffs*, a execução do algoritmo é finalizada com um erro de acesso ao meio. Caso contrário, será necessário esperar por um tempo aleatório de períodos de *backoff* (SEMPREBOM et al., 2014).

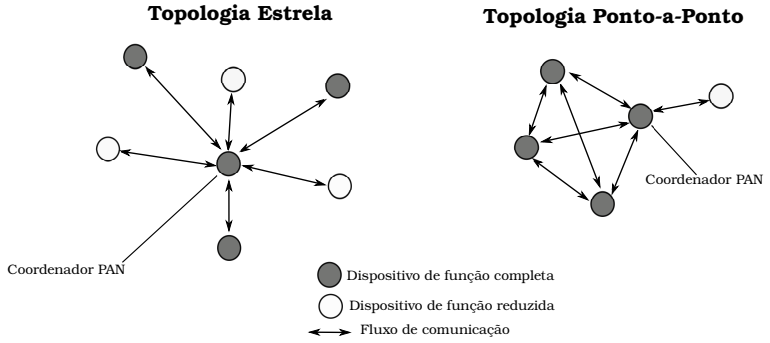
Se o canal se encontrar livre, *CW* será decrementado. Caso *CW* alcance o valor 0 será possível realizar uma transmissão. Caso contrário, será realizada uma nova análise para verificar se o canal está ocupado. A transmissão de um quadro ocorre apenas se o número de *backoffs* disponíveis no *superframe* for suficiente para o quadro e seu ACK, caso contrário a transmissão é adiada para o *superframe* seguinte (SEMPREBOM et al., 2014).

2.2.3 Topologias

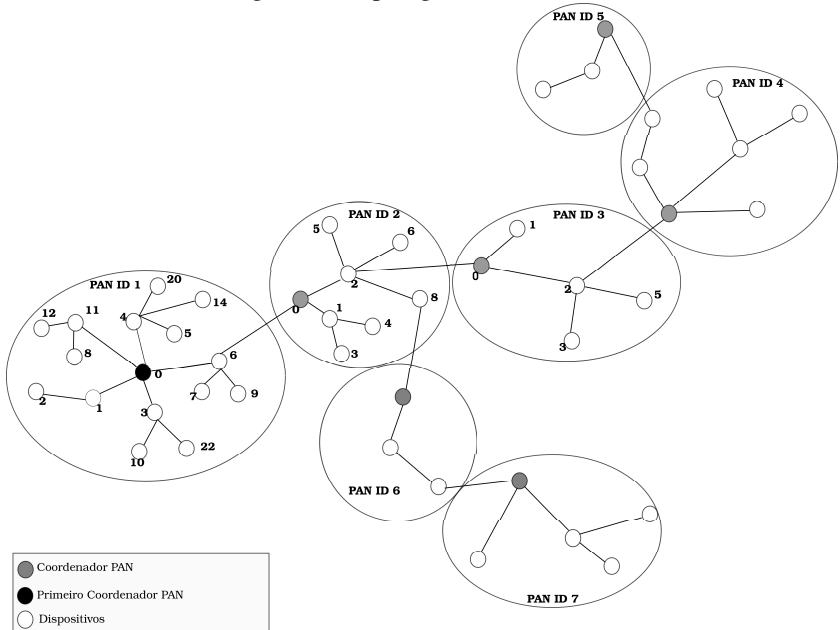
O padrão IEEE 802.15.4 permite a utilização das topologias estrela, ponto-a-ponto e *cluster-tree*. Na topologia estrela (Figura 3), a comunicação ocorre entre os nodos e o coordenador (IEEE Computer, 2011). Nesta topologia, sempre que um nodo desejar comunicar com outro deve encaminhar uma mensagem para o coordenador e esse encaminhará para o nodo destino (VALLE, 2014). Na topologia ponto-a-ponto (Figura 3)), o nodo coordenador também está presente, entretanto, os nodos finais podem se comunicar entre si, sem a necessidade de que a mensagem passe pelo coordenador (IEEE Computer, 2011). Nesta topologia, cada um dos nodos possui igual responsabilidade na manutenção da rede (VALLE, 2014).

A topologia *cluster-tree* (Figura 4) é um caso especial, onde ocorre a junção de redes ponto-a-ponto ou estrela. Nesta topologia ocorre a formação de agrupamentos (*clusters*) entre os nodos na rede. Em cada *cluster* existe um coordenador, denominado *cluster head*. Os nodos *cluster head*, além de serem responsáveis pela coordenação do *cluster*, podem comunicar-se com outros *cluster heads* que estejam no mesmo nível hierárquico, em níveis superiores ou com nodos que pertençam ao seu *cluster* (IEEE Computer, 2011).

Figura 3 – Topologia Estrela e Ponto-a-Ponto.



Fonte: Adaptado de IEEE Computer (2011).

Figura 4 – Topologia *Cluster-Tree*.

Fonte: (IEEE Computer, 2011).

2.3 DIVERSIDADE COOPERATIVA

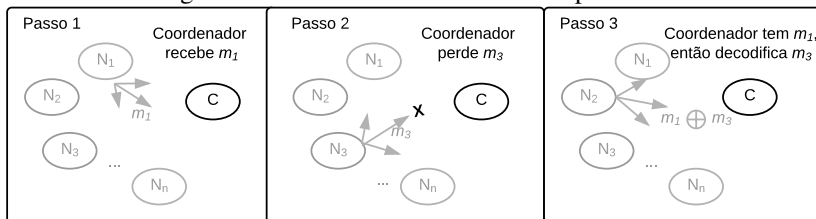
Técnicas que utilizam diversidade cooperativa nas comunicações têm sido propostas nos últimos anos, provendo ganhos de diversidade espacial e temporal em RSSF (LIANG; BALASINGHAM; LEUNG, 2009). Comumente, abordagens de comunicação sem fio são projetadas para que o pacote tenha um endereço de destinatário e a transmissão envolva apenas um transmissor e um receptor. Já na diversidade cooperativa, considera-se a existência de nodos que irão cooperar com o par transmissor-receptor para que o nodo receptor tenha maior probabilidade de receber o pacote enviado (KHAN; KARL, 2014). Este comportamento fornecido pela diversidade cooperativa permite um melhor aproveitamento da própria natureza das transmissões sem fio (LIANG; BALASINGHAM; LEUNG, 2009), já que a difusão do pacote pode ser ouvida por nodos vizinhos caso estes estejam com seus rádios ligados. Entretanto, convencionalmente, os nodos da rede descartam os pacotes que não são destinados a eles (KHAN; KARL, 2014).

A diversidade cooperativa melhora o desempenho do sistema sem que seja necessário aumentar a complexidade do hardware. Em redes que utilizam estas técnicas, os nodos colaboram uns com os outros, retransmitindo os pacotes de dados, e assim, formam múltiplas vias de transmissão. Ou seja, essas redes formam um sistema MIMO-virtual (*multiple-input-multiple-output*) para promover um ganho de diversidade espacial no destino, sem a necessidade de múltiplas antenas (WANG; SYUE, 2009) (LIANG; BALASINGHAM; LEUNG, 2009).

A Figura 5 apresenta um exemplo de comunicação utilizando diversidade cooperativa. Nesta Figura é possível visualizar três passos, os nodos N_1 e N_3 desejam enviar uma mensagem para o nodo coordenador. No passo 1, o nodo N_1 envia uma mensagem m_1 em *broadcast*, que é recebida corretamente pelo nodo coordenador e que também é escutada pelo nodo N_2 . No passo 2, o nodo N_3 envia uma mensagem m_3 em *broadcast*, mas que por interferências não foi recebida corretamente pelo nodo coordenador. Entretanto, foi escutada pelo nodo N_2 . No passo 3, o nodo N_2 , que escutou e armazenou as mensagens m_1 e m_3 , retransmite estas para o coordenador. O coordenador já possui a mensagem m_1 , e por meio de técnicas de codificação de rede pode recuperar a mensagem m_3 (LAURINDO et al., 2016).

Quando se utiliza a diversidade cooperativa, um problema importante a ser tratado é o seleção dos nodos que irão cooperar. Este assunto é abordado na próxima seção.

Figura 5 – Transmissão com nodos cooperantes.



Fonte: (LAURINDO et al., 2016).

2.4 SELEÇÃO DE NODOS COOPERANTES

Em um sistema que utiliza cooperação em sua comunicação, os nodos transmitem seus dados e cooperam transmitindo dados de outros nodos (VALLE, 2014). Contudo, simplesmente inserir um número maior de nodos sensores na rede e deixar que os nodos cooperantes sejam escolhidos arbitrariamente pode até melhorar a diversidade cooperativa, entretanto essa solução apresenta baixa eficiência. Atualmente estudos estão sendo realizados com o objetivo de encontrar a melhor técnica de seleção de nodos cooperantes (WANG; SYUE, 2009).

O desempenho de sistemas que utilizam cooperação pode ser melhorado se os nodos cooperantes forem otimamente selecionados. Este fato proporciona grande investigação científica no desenvolvimento de técnicas de seleção de nodos cooperantes (ETEZADI et al., 2012). Para realizar esta seleção é necessário considerar quais os critérios de seleção que serão utilizados. Exemplo de critérios são: eficiência energética de cada nodo, indicador da potência do sinal recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*) em relação ao coordenador ou entre os próprios nodos, seleção por vizinhança (Topologia), estado do canal (CSI – *Channel State Information*), relação sinal-ruído (SNR – *Signal-to-noise ratio*), erros de comunicação (PER – *Packet-Error-Rate*) ou uma combinação destes parâmetros (LIU et al., 2015).

Engel, Abrão e Hanzo (2013) propuseram a seleção do melhor nodo cooperante utilizando informações de qualidade de canal (SNR) nas comunicações entre os nodos origem e destino, além de informações de energia residual de cada nodo candidato. A escolha é realizada por meio de técnicas de lógica *fuzzy*. O objetivo deste algoritmo é equilibrar o consumo de energia por bit em cada nodo e o tempo de vida da rede como um todo. Resultados obtidos mostraram que ele não consegue atingir uma redução de energia por bit tão elevada, mas consegue melhorar o tempo de vida da rede.

Liang, Balasingham e Leung (2009) propuseram uma seleção de nodos cooperantes adaptativa em uma rede que utiliza comunicação cooperativa. A técnica de seleção de nodos cooperantes é baseada em um algoritmo multi-agente de aprendizado por reforço. Dessa forma, a seleção do melhor nodo é aprendida de forma colaborativa pelos roteadores através de uma série de iterações de tentativa e erro. O tomador de decisão é quem seleciona o nodo que irá participar da comunicação, este tomador de decisão recebe uma recompensa imediata que é enviada pelo ambiente, e que representa a qualidade da comunicação. O tomador de decisão então utiliza a recompensa imediata para atualizar a política de decisão.

Bletsas et al. (2006) propuseram uma seleção de nodos cooperantes oportunista. Os nodos cooperantes monitoram sua condição de canal (CSI) com a origem e com o destino, e definem um temporizador que funciona como um *back-off*. O nodo com melhores condições de canal terá seu temporizador com menor tempo e irá expirar primeiro. Esse nodo irá transmitir uma mensagem informando aos outros que é o cooperante, assim os outros nodos que escutam essa mensagem recuam.

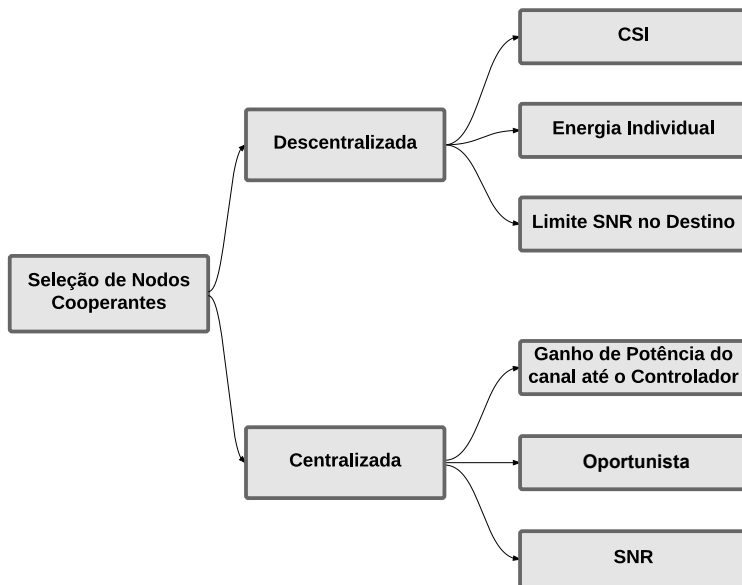
Hwang e Ko (2007) propuseram uma técnica de seleção de nodos cooperantes modificando a técnica oportunista de (BLETSAS et al., 2006). Na técnica proposta, é definido um limite predeterminado para a qualidade do sinal (SNR) tanto do nodo origem quanto do nodo destino e a seleção só ocorre se os cooperantes satisfizerem este limite.

2.4.1 Técnicas de Seleção de Cooperantes: Uma Taxonomia

Após realizar um estudo da literatura, este trabalho propõe uma taxonomia que divide os algoritmos de seleção de nodos cooperantes em duas categorias, centralizados e descentralizados, conforme ilustrado na Figura 6. Em cada uma das categorias apresenta-se os principais critérios de seleção de acordo com o que a literatura aborda, considerando um exemplo para cada critério (BLETSAS et al., 2006), (CHEN et al., 2006), (AMARASURIYA; ARDAKANI; TELLAMBURA, 2010), (FENG; XIAO; CIMINI, 2013), (VALLE et al., 2016) e (LUO et al., 2005).

As técnicas centralizadas fornecem um bom desempenho, mas não são recomendadas para redes de larga escala, pois o algoritmo de seleção será executado em um único nodo, devendo o nodo obter todos os parâmetros dos outros nodos da rede. Entretanto, para receber esses parâmetros, o nodo utilizará o meio de transmissão, o que comprometerá o monitoramento dos sensores gerando sobrecarga. Já nas técnicas descentralizadas cada nodo toma individualmente a decisão se será ou não cooperante, sem gerar sobre-

Figura 6 – Taxonomia seleção de nodos cooperantes



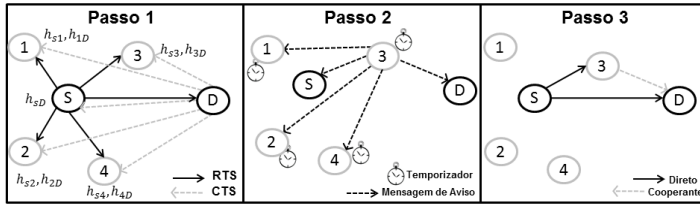
Fonte: Própria.

carga na rede, entretanto diminui o desempenho da rede, pois nessas técnicas as seleções de nodos cooperantes podem falhar se ocorrer um processo de seleção mal sucedido (FENG; XIAO; CIMINI, 2013).

Em cada um dos grupos foram selecionados critérios de seleção. Na categoria de seleção descentralizada os seguintes grupos foram listados:

1. **CSI (*Channel State Information*)**: De modo geral, nessas abordagens assume-se que os potenciais nodos cooperantes podem ouvir a sequência de mensagens de *Handshaking Request-to-Send* (RTC) e *Clear-to-Send* (CTS) (Figura 7a)) entre o transmissor e o receptor, indicando o início de uma transmissão. Na sequência, cada potencial nodo cooperante estima a condição do canal (CSI) do nodo transmissor até o nodo cooperante ($h_{s,i}$) e do nodo cooperante até o destino ($h_{i,d}$). A estimativa do CSI é baseada na variação da intensidade dos sinais de recebimento dos *frames* RTS/CTS. Após estimar o CSI, cada nodo cooperante define um limite de tempo com um valor inverso ao do valor estimado no CSI. Este valor funciona como um *back-off*, assim, o nodo com menor

Figura 7 – Etapas para estimar a condição do canal



Fonte: adaptado de (CHEN et al., 2006).

tempo de espera torna-se o nodo cooperante. Os outros nodos ainda estão em modo de escuta, assim o nodo selecionado como cooperante enviará uma mensagem informando os outros nodos que o cooperante já foi selecionado (Figura 7b)). Para evitar casos onde nodos podem estar fora do alcance, os nodos transmissor e receptor podem anunciar que o nodo cooperante foi selecionado, e então o nodo selecionado pode cooperar na transmissão (Figura 7c)) (BLETSAS et al., 2006).

2. **Energia individual:** A economia de energia é um fator importante quando se lida com nodos sensores de RSSF. Chen et al. (2006) propuseram uma seleção de nodos cooperantes *power-aware* (PARS) utilizando como base o modelo oportunista de (BLETSAS et al., 2006), com o objetivo de maximizar o tempo de vida da rede. A proposta desses autores é dividida em duas etapas. A primeira é a alocação ótima de energia (OPA) e a segunda é a seleção de nodos cooperantes, como é explicado abaixo:

Etapa 1 - Alocação ótima de energia (OPA): Todos os potenciais nodos cooperantes executam o algoritmo OPA utilizando como base as medições do canal obtidas por meio das mensagens RTS/CTS, com o objetivo de diminuir o consumo total de energia da transmissão, dada uma determinada taxa de transmissão. Como resultado do algoritmo, cada nodo cooperante obtém a energia de transmissão ótima tanto para o transmissor quanto para cada nodo cooperante i . A solução obtida usando método de multiplicadores de Lagrange¹ é aplicada nos esquemas *Amplify-and-Forward* (AF) e *Decode-and-Forward* (DF).

¹O método dos multiplicadores de Lagrange permite encontrar extremos (máximos e mínimos) de uma função de uma ou mais variáveis suscetíveis a uma ou mais restrições.

Etapa 2 - Seleção de nodos cooperantes: A técnica PARS realiza a seleção dos nodos utilizando como base a ideia de temporizadores proposta na seleção oportunista de (BLETSAS et al., 2006). Entretanto, PARS não utiliza diretamente as medições do canal para estabelecer o limite do temporizador, mas sim o resultado do OPA, que é o consumo mínimo de energia necessário para a transmissão do par, nodo transmissor e nodo cooperante, e também o nível de energia residual do nodo transmissor e de cada nodo cooperante. Além desses, os autores propuseram três critérios, onde cada um dos critérios corresponde a um conjunto de valores iniciais para o temporizador do nodo origem e para o temporizador de cada potencial nodo cooperante.

O critério I tem como foco minimizar a energia total da transmissão e necessita apenas dos resultados do OPA. Os critérios II e III tentam maximizar a energia residual de cada nodo, ou seja, tentam manter de maneira aproximada a energia residual em cada nodo. E assim como no método oportunista, o nodo com o temporizador que expirar primeiro será selecionado como cooperante. No entanto, nesta abordagem, o nodo origem também possui um temporizador e caso este expire primeiro significa que não há necessidade de cooperantes. Quando um nodo é selecionado como cooperante, este notifica os outros nodos da rede por meio de uma mensagem informando que um nodo cooperante foi selecionado.

3. **Limite de SNR no destino:** Amarasuriya, Ardakani e Tellambura (2010) propuseram o esquema de seleção OT-MRS (*Output-Threshold Multiple Relay Selection*). Este esquema permite selecionar mais de um nodo cooperante se necessário. Considera-se uma rede com $L + 2$ nodos, na qual um nodo é origem, um nodo é destino e L nodos são cooperantes. O esquema seleciona os n primeiros L_c (o número de cooperantes é determinado com a normalização do limite SNR) nodos cooperantes não ordenados ($1 \leq L_c \leq L$), onde combina o SNR das retransmissões com o SNR da transmissão do link direto para verificar se excede o limite SNR predefinido. Este limite de SNR pode ser escolhido para ser o mínimo SNR requerido para decodificar com sucesso um dado esquema de modulação. Este esquema é dividido em duas fases:

1ª fase: o destino D recebe o sinal transmitido pela origem durante a fase de *broadcast*.

2ª fase: o primeiro *relay* retransmite a versão amplificada da mensagem para o destino D no primeiro *time slot* da fase de retransmissão

(este esquema utiliza alocação de canal por divisão de tempo com *Lc time slots*). Na sequência, *D* combina este sinal com o sinal recebido direto da origem (link direto) por meio do método de MRC (Maximum-Ratio Combining). Se o SNR de saída do combinador for superior ao limite, não é necessário que os outros nodos cooperantes retransmitam. Caso contrário, os nodos cooperantes restantes serão selecionados nos *time slots* seguintes até que a saída cumulativa do SNR seja superior ao limite.

Na categoria de seleção centralizada os seguintes grupos foram listados:

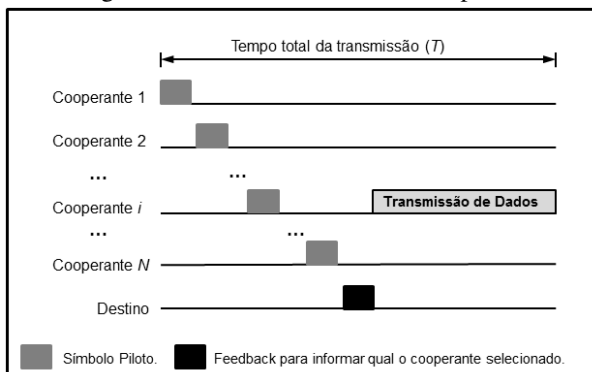
1. **Ganho de potência do canal com o nodo Controlador:** Feng, Xiao e Cimini (2013) propuseram um método centralizado chamado *Centralized Feedback-Based Relay Selection* (FBRs). Neste método, o nodo origem faz um *broadcast* para que todos os nodos possam ouvir. Os nodos que conseguirem ouvir a mensagem enviam um símbolo piloto para o nodo destino (Figura 8), pois este método utiliza o nodo destino como um controlador central que realiza a seleção do nodo cooperante. Este controlador faz a escolha do nodo cooperante, o nodo que apresentar o maior ganho de canal.

O controlador obtém a informação global dos canais, por meio dos símbolos piloto enviados por cada nodo candidato a cooperante. Os símbolos piloto são conhecidos por todos os nodos da rede, e, o nodo destino pode obter as estimativas dos canais. Por meio dos símbolos piloto, o destino obtém conhecimento sobre o perfeito ganho de potência do canal. Então, o nodo destino seleciona o nodo cooperante que apresente o melhor ganho e o notifica. Assim, o nodo cooperante retransmite a mensagem que a origem enviou.

2. **Histórico de sucesso das transmissões e no LQI:** Valle et al. (2016), propôs uma seleção de nodos cooperantes baseada no histórico de sucesso das transmissões e no LQI (*Link quality indicator*) entre cada nodo e o coordenador, valor este medido no coordenador. Para descobrir quais os melhores nodos cooperantes dentre os candidatos, o autor propôs a seguinte equação: $CN_i = \frac{SR_i + LQI_i}{2}$, onde, para cada nodo i , SR_i é o índice histórico da taxa de sucesso nas transmissões recentes e o LQI_i é o indicador de qualidade do enlace entre o nodo e o coordenador.

Os nodos que apresentarem os maiores CN_i serão selecionados como cooperantes. O número de cooperantes é determinado dinamicamente de acordo com o percentual de perdas de mensagens na rede. O coordenador notifica os nodos cooperantes por meio de uma mensagem

Figura 8 – Transmissão do símbolo piloto.



Fonte: (FENG; XIAO; CIMINI, 2013).

especial chamada de *Blocop*. Os nodos selecionados como cooperantes armazenam todas as mensagens que são enviadas por todos os nodos durante cada um dos T compartimentos (onde T é o número total de compartimentos no período de transmissão). Após o término dos T compartimentos, os nodos cooperantes codificam as mensagens que estão em seus *buffers* e aguardam até o seu compartimento para realizar a retransmissão da mensagem.

3. **SNR (Signal-to-Noise Ratio):** Luo et al. (2005) propuseram um esquema de seleção de nodo cooperante baseado na média do SNR do link do nodo candidato a cooperante até o nodo destino. Os autores consideram que os nodos que receberam a mensagem do nodo origem e conseguiram decodificá-las fazem parte do grupo decodificadores, que seria o grupo de candidatos a nodos cooperantes. Para cada transmissão realizada pelo nodo origem, os nodos pertencentes ao grupo de decodificadores devem enviar para o nodo origem o seu SNR médio até o destino, assim o nodo origem irá selecionar o nodo com o maior SNR médio e irá informar todos os nodos do grupo por meio de uma mensagem *broadcast* que o nodo cooperante foi selecionado. Então, o nodo cooperante irá retransmitir a mensagem para o nodo destino.

Uma abordagem de seleção de nodos cooperantes adequada permite atingir um melhor ganho de diversidade cooperativa, melhorando o desempenho da transmissão (ABDULHADI; JASEEMUDDIN; ANPALAGAN, 2012). Para a escolha adequada da abordagem a ser utilizada é necessário analisar qual será a aplicação da rede, e assim tomar a primeira decisão: usar técni-

cas centralizadas ou descentralizadas. Se o número de nodos é pequeno ou a rede for estática, o efeito de sobrecarga para sistemas centralizados torna-se insignificante (FENG; XIAO; CIMINI, 2013), e assim técnicas centralizadas podem ser utilizadas. Por outro lado, se há muitos nodos na rede ou a rede for dinâmica, as técnicas descentralizadas são abordagens mais recomendadas do que as centralizadas, devido a menor quantidade de sobrecarga gerada. Nesse sentido, a taxonomia proposta tem o objetivo de auxiliar os projetistas de sistemas a encontrar a técnica ou as técnicas mais adequadas para o seu caso.

Tabela 2 – Características das técnicas de seleção de nodos cooperantes.

| Técnicas | Baixo Overhead | Seleção de Múltiplos Nodos | Maximização da Vida Útil da Rede | Redução de Falhas nas Transmissões |
|------------------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| CSI | ✓ | | | ✓ |
| Energia Individual | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Limite de SNR no Destino | ✓ | ✓ | | ✓ |
| Ganho de Potência com o nodo Controlador | | | | ✓ |
| Seleção Oportunista | ✓ | ✓ | | ✓ |
| SNR | | | | ✓ |

Fonte: Própria.

Baseado nessa proposta de taxonomia foram selecionadas algumas características das técnicas apresentadas, as quais podem ser vistas na Tabela 2. Nessa tabela é possível verificar que as técnicas CSI, Energia Individual e Limite de SNR no Destino apresentam a vantagem de reduzir as falhas nas transmissões sem gerar um *overhead* elevado na rede. As técnicas Limite de SNR no Destino e Seleção Oportunista permitem que mais de um nodo cooperante seja selecionado, sendo que as demais selecionam apenas um cooperante. A técnica Energia Individual proporciona a maximização da vida útil da rede e as técnicas Seleção Oportunista e SNR também proporcionam redução nas falhas nas transmissões.

2.5 PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Problemas de otimização são problemas que buscam maximizar ou minimizar o valor que uma função pode assumir em um determinado domínio, buscando encontrar a melhor solução (BASTOS, 2004). De acordo com Bastos (2004) alguns dos componentes de um problema de otimização são:

- **Função Objetivo:** É a função de uma ou mais variáveis de decisão que se deseja otimizar, maximizando-a ou minimizando-a;
- **Restrições:** São funções de igualdade ou desigualdade sobre as variáveis de decisão, que representam os limites estabelecidos ao sistema.

De maneira genérica um problema de otimização pode ser definido matematicamente da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \text{minimizar } f(\mathbf{x}) \\ & \text{Sujeito a:} \\ & \quad g(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & \quad h(\mathbf{x}) = 0 \\ & \quad \mathbf{x} \in \mathcal{X} \end{aligned}$$

onde:

$f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é a função objetivo ou benefício; $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$ e $h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^q$ são restrições (de igualdade ou desigualdade) que limitam o espaço de soluções factíveis; e $\mathbf{x}: (x_1, x_2, \dots, x_n)$ é o vetor com as variáveis de decisão. Diz-se que o vetor \mathbf{x}^* é ótimo para o problema se obedece todas as restrições, ou seja, se está no conjunto \mathcal{X} , e para qualquer outro vetor \mathbf{z} que satisfaça as restrições tem-se $f(\mathbf{z}) \geq f(\mathbf{x}^*)$ ou $f(\mathbf{z}) \leq f(\mathbf{x}^*)$ (BOYD; VANDENBERGHE, 2004). A função $f(\mathbf{x})$ é muito importante para o problema de otimização, pois é ela que determina o quanto um valor do vetor \mathbf{x} é bom para o sistema.

2.5.1 Problema de Programação Linear

Um problema de programação linear inteira é um caso particular do problema apresentado anteriormente, onde a função objetivo e restrições são todas lineares e as soluções factíveis do problema apresentam valores inteiros (WOLSEY, 1998).

Podendo ser representado da seguinte forma:

$$\text{minimizar } c^T x$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} Ax &\leq a \\ Bx &= b \\ x &\in \mathbb{Z}_+^n \end{aligned}$$

onde: c , a e b são vetores e A e B são matrizes com dimensões apropriadas.

Problema de Programação Inteira Binário (PIB) – Este tipo de problema trata de uma versão particular do problema de programação linear inteira, na qual as variáveis só podem assumir os valores 0 ou 1 (WOLSEY, 1998). Portanto:

$$\text{minimizar } c^T x$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} Ax &\leq a \\ Bx &= b \\ x &\in \{0, 1\} \end{aligned}$$

2.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Muitas RSSF adotam o padrão IEEE 802.15.4, considerando que este foi criado com o objetivo de fornecer conectividade sem fio com baixa complexidade, custo reduzido e pouco consumo energético, que são características importantes para RSSF (IEEE Computer, 2011). No entanto, com as desvantagens de ter baixas taxas de transmissão e altas taxas de erro na comunicação devido a interferências, desvanecimento de comunicação, reflexões, etc. Desta maneira as RSSF apresentam como desafio reduzir as perdas de mensagens.

Técnicas de diversidade permitem minimizar o problema citado e proporcionam um ganho no desempenho do sistema. As técnicas de diversidade visam produzir cópias do sinal transmitido para que o desvanecimento sofrido pelos sinais seja decorrelacionado (geralmente, no tempo e no espaço). A técnica de diversidade cooperativa pode ser uma abordagem adequada para aumentar a confiabilidade da comunicação em ambientes altamente poluídos. Esse tipo de técnica explora a natureza de transmissão do meio sem fio, onde os nodos que atuam como cooperantes podem criar um tipo de sistema MIMO-virtual (múltipla entrada-múltipla saída).

Redes que utilizam diversidade cooperativa em sua comunicação, os nodos transmitem seus dados e cooperam transmitindo dados de outros nodos (VALLE, 2014). Contudo, simplesmente inserir um número maior de nodos sensores na rede e deixar que os nodos cooperantes sejam escolhidos arbitrariamente pode até melhorar a diversidade cooperativa, entretanto essa solução apresenta baixa eficiência. Por isso atualmente estudos estão sendo

realizados com o objetivo de encontrar a melhor técnica de seleção de nodos cooperantes.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo discute alguns trabalhos relacionados ao tema de pesquisa desta dissertação de mestrado, focando nas técnicas de seleção de nodos cooperantes em RSSF. Estas técnicas realizam a seleção dos nodos que serão responsáveis por retransmitir as mensagens dos nodos que não conseguem sucesso na comunicação direta com o destinatário da mensagem.

Os trabalhos apresentados realizam a seleção dos nodos cooperantes com métodos e critérios distintos, e sendo que em cada um destes trabalhos objetiva alguma melhoria na RSSF, que pode estar relacionado com tempo de vida da rede, taxa de entrega ou probabilidade de falha na entrega das mensagens.

Para apresentação dos trabalhos optou-se por agrupá-los de acordo com os parâmetros utilizados para realizar a seleção dos cooperantes. Deste modo serão apresentados com uma descrição e, ao final do capítulo é realizada uma comparação entre algumas características dos trabalhos.

A seleção dos trabalhos citados foi realizada com base em uma revisão sistemática da literatura, na qual foram utilizadas seis bases de buscas para localizar trabalhos publicados entre 2003 e 2016. Esta revisão sistemática da literatura seguiu o protocolo de busca que pode ser consultado no Apêndice A.

A maior parte dos trabalhos resultantes desta revisão utiliza pelo menos um tipo de estimador de qualidade de canal como parâmetro para a seleção de cooperantes. Os trabalhos propostos por Marchenko et al. (2014), Sun et al. (2009), Ikki e Ahmed (2009), Li et al. (2011) e Wang et al. (2010) utilizam os estimadores de qualidade, enquanto os trabalhos propostos por Brante et al. (2013), YANG et al. (2009), Wei, Yu e Song (2010) e Etezadi et al. (2012) utilizam uma combinação com mais algum parâmetro representativo do funcionamento da rede. Já os trabalhos propostos por Gokturk e Gurbuz (2014) e Wang, Han e Liu (2009) apresentam abordagens diferentes. O primeiro define como parâmetro de seleção o FER (*Frame Error Rate*) e o segundo aplica *Stackelberg Game* para realizar a seleção.

3.1 SELEÇÃO BASEADA EM ESTIMADORES DE QUALIDADE

Três abordagens de seleção de nodos cooperantes foram propostas por Marchenko et al. (2014), considerando como parâmetro de seleção, o LQI do canal a partir do nodo origem até os potenciais nodos cooperantes e a partir destes nodos até o destino. Essas abordagens, denominadas periódica, adap-

tativa e reativa, assumem um cenário industrial que utiliza os mecanismos de comunicação do padrão IEEE 802.15.4.

Na abordagem periódica, a seleção do nodo cooperante ocorre de maneira independente do desempenho do nodo cooperante atual. O funcionamento ocorre da seguinte forma, o nodo origem S transmite uma mensagem de requisição de um nodo cooperante, que também inclui o ID do nodo destino D . Todos os nodos que escutarem a mensagem iniciam um temporizador aleatório $T_c = \text{rand}(0, W)$ para uma transmissão com janela de contenção com duração W . Quando o temporizador expirar, o nodo envia uma mensagem para D se candidatando a cooperante. Esta mensagem inclui o valor do LQI medido na mensagem de requisição de nodo cooperante que foi recebida do nodo S e o valor de $W - T_c$. Assim, o nodo D pode identificar o fim da janela de contenção mesmo sem ter recebido a requisição de nodo cooperante. Os nodos cuja a mensagem para candidatar-se a cooperante for recebida pelo nodo D formam um grupo de candidatos a nodo cooperante R .

Quando a contenção termina, D avalia o link fim-a-fim para cada nodo candidato R_i considerando o menor valor de LQI dos dois links: $Q_i = \min(Q_{SR_i}, Q_{R_iD})$, onde Q_{SR_i} e Q_{R_iD} são os valores de LQI do S para o R_i e do R_i para o D . O destino D envia uma mensagem de notificação para o nodo selecionado R_i para informar que este foi selecionado. Depois de receber esta mensagem, o nodo envia uma mensagem de notificação para a origem S , confirmando o sucesso da seleção.

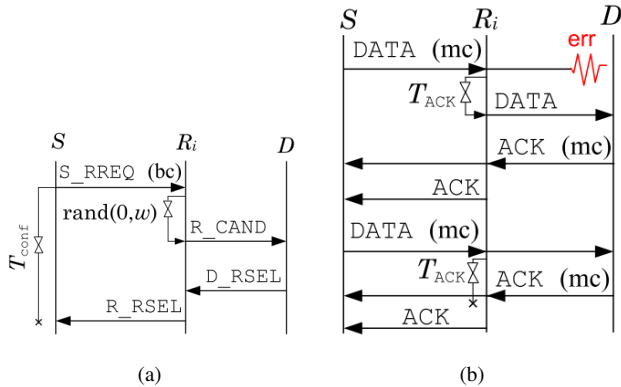
Sempre que o nodo selecionado receber o pacote de dados de S , este inicializa um temporizador T_{ack} . Se não receber um ACK de D dentro deste tempo, retransmite uma cópia dos dados para D . Se D receber com sucesso responde para R_i e para S com um ACK. Independente se o nodo retransmitiu ou não, sempre que receber um ACK de D encaminha para S . Caso nodo S não receba uma mensagem de notificação informando que um nodo foi selecionado como cooperante dentro de um certo intervalo de tempo T_{conf} , ele assume que a seleção falhou e realiza a transmissão dos dados sem ajuda de um nodo cooperante.

Para uma melhor compreensão das trocas de mensagem, a Figura 9 apresenta o fluxo de mensagem gerado durante a seleção de cooperante.

Na abordagem adaptativa proposta por Marchenko et al. (2014), a seleção de nodo cooperante é ativada de acordo com o desempenho da taxa de entrega sobre o link cooperativo. O funcionamento ocorre do seguinte modo, o nodo origem S mantém o controle de reconhecimentos para pacotes de dados transmitidos. Se o ACK para o pacote de dados está faltando, assume-se que nem S nem o nodo cooperante atual R_i pode entregar os dados.

Apenas os pacotes mais recentes W_a (janela de contenção) são levados em consideração. Se a taxa de ACKs perdidos para W_a for maior ou igual a ϵ_a

Figura 9 – Fluxo de mensagem para seleção periódica e adaptativa (a) e operações dos nodos depois da seleção (retransmissão) (b)



Fonte: adaptado de (MARCHENKO et al., 2014).

(limite de pacotes perdidos na janela), uma nova seleção é iniciada, e é criado um novo contador de ACKs perdidos. A seleção de nodo cooperante adaptativa considera a mudança nos canais, com o objetivo de minimizar o número de seleções de cooperantes. O restante do funcionamento desta abordagem opera da mesma forma que ocorre com seleção na abordagem periódica.

A última abordagem proposta pelos autores é a reativa. Nela, a seleção do nodo cooperante ocorre após uma transmissão direta entre os nodos origem e destino falhar. A proposta é ativar uma seleção reativa de S caso nenhum ACK seja recebido de D dentro de um tempo (T_{ack}). Nesse contexto, a seleção reativa pode ser utilizada em transmissões não periódicas, em que a entrega de ACKs é assegurada.

O funcionamento ocorre da seguinte forma, o nodo origem S envia uma mensagem de requisição de nodo cooperante S_RREQ cada vez que não receber um ACK para a sua transmissão direta de dados até D . Esta mensagem inclui o ID de D e o ID do pacote de dados correspondente. Apenas nodos que receberam a requisição de dados e a S_RREQ disputam a seleção.

Caso ocorra perda de ACKs, existem duas formas utilizadas pelos autores para tratar. A primeira, é quando o dado não é entregue para o nodo D . Este caso é parecido com o procedimento de contenção das seleções periódica e adaptativa, onde cada um dos nodos candidatos inicia um temporizador aleatório $T_w = \text{rand}(0, w)$. Quando este expirar, o nodo envia uma mensagem se candidatando como cooperante R_CAND para o nodo D . O nodo D seleciona um cooperante baseado na equação $Q_i = \min(Q_{SR_i}, Q_{R_iD})$. Depois que o

cooperante selecionado recebe a mensagem D_RSEL do nodo destino notificando que foi selecionado, este inicia a transmissão dos dados para o nodo D . Se o nodo D não receber nenhum R_CAND mas receber S_RREQ da origem, envia uma mensagem D_RSEL para a origem S , e S retransmite os dados. Depois da retransmissão, o nodo cooperante selecionado R_i aguarda por um ACK de D . Após receber este ACK, R_i o reencaminha para S .

A segunda forma ocorre quando o dado enviado por S foi entregue em D , mas o ACK correspondente não foi recebido por S . Como resultado, depois de um tempo T_{ack} , S envia S_RREQ para a seleção do nodo cooperante. No entanto, o ACK foi transmitido, este pode ter sido recebido por alguns nodos. Os nodos que receberam ambos, S_RRQ do nodo S e o correspondente ACK do nodo D iniciam um temporizador aleatório $T_w = \text{rand}(0, w)$. Eles transmitem o ACK para o nodo S depois que o temporizador expirar. Alguns nodos que receberam S_RREQ e a requisição de dados, mas não receberam o ACK correspondente, enviam para D uma mensagem R_CAND , mas D ignora tal mensagem baseado no ID do pacote requisitado. Neste caso, o ACK pode ser entregue para S , sem uma retransmissão desnecessária dos dados.

Nas três abordagens citadas, o objetivo dos autores foi analisar a taxa de entrega dos pacotes no nodo destino e o número de tentativas de seleção de nodos cooperantes mostrando o sobretrabalho (*overhead*) da seleção. A abordagem reativa é a que apresentou maior sobretrabalho de atualizações, já que a seleção é ativada a cada mensagem de ACK que falhar. No entanto, esta abordagem é a que apresenta a maior taxa de entrega, uma vez que o melhor nodo retransmissor é selecionado a cada transmissão direta que falha.

Sun et al. (2009) desenvolveram uma técnica de seleção de nodos cooperantes chamada *Outage-Optimal Relay Selection* (OORS). Esta utiliza o *feedback* do nodo destino para saber se é necessário utilizar cooperação. Se for necessário, o nodo destino notifica e cada nodo candidato avalia de forma independente a sua elegibilidade para a cooperação. Todos os nodos elegíveis formam um conjunto cooperativo, a partir do qual o destino seleciona o nodo que pode fornecer a máxima informação mútua instantânea como nodo cooperante. O nodo selecionado encaminhará a mensagem do nodo origem com o protocolo AF (*Amplify-and-Forward*) ou DF (*Decode-and-Forward*), dependendo se ele decodificou a mensagem corretamente. Se o conjunto de cooperantes é nulo, o nodo origem será selecionado para a retransmissão.

No funcionamento dessa técnica, para cada transmissão, o nodo origem primeiro envia uma mensagem para o nodo destino. Se este conseguir decodificar a mensagem corretamente, é enviado um ACK para todos os nodos e para o nodo origem, e uma nova transmissão inicia. Caso contrário, o destino envia um NACK para informar que a decodificação falhou. Cada nodo que recebe um NACK supõe que ele foi selecionado como cooperante.

Na sequência, ele calcula a informação mútua instantânea que o sistema pode alcançar, e compara o resultado com o da transmissão direta sem cooperante. De maneira distribuída o conjunto de cooperantes S_c é formado.

Todos os nodos em S_c enviam uma *flag* para o destino para indicar seu ganho de informação mútua instantânea comparado com o *link* direto. Então, o nodo destino seleciona o nodo com o maior ganho como nodo cooperante. Caso S_c seja um conjunto vazio, o nodo origem faz a transmissão.

Através de simulações, os autores mostram que a técnica de seleção proposta obtém um bom desempenho. A utilização dos *feedbacks* faz a retransmissão por cooperantes ocorrer somente se necessário, melhorando, assim, a eficiência espectral.

Ikki e Ahmed (2009) propõem uma técnica de seleção de nodos cooperantes que utiliza o melhor cooperante para ajudar na transmissão. É assumido multiplexação por divisão de tempo, onde no primeiro *time slot* o nodo origem S transmite seu sinal para o nodo destino D e para o conjunto de M nodos. É definido um conjunto C que é composto pelos nodos que conseguem decodificar as mensagens oriundas da origem. No segundo *time slot*, é ativado apenas o nodo que apresenta o melhor SNR (*signal-to-noise ratio*) instantâneo do canal do nodo para o destino entre os nodos que pertencem ao grupo C .

Então o destino combina o sinal da transmissão direta com o da transmissão indireta utilizando a técnica *Maximum Ratio Combining* (MRC). Nas simulações foi comparado a probabilidade de erro e capacidade média do canal, onde se mostrou melhor em relação a uma transmissão sem cooperante.

Li et al. (2011) propuseram três esquemas de seleção de nodos cooperantes em que utilizam o protocolo *decode-and-forward*. O critério utilizado para realizar a seleção é o CSI (*Channel State Information*) ultrapassado. Os autores afirmam que os esquemas propostos podem ser realizados tanto em abordagem centralizada quanto em abordagem descentralizada.

Na abordagem centralizada, a escolha ocorre no nodo destino. Na abordagem descentralizada, os nodos estimam seus ganhos de canal por meio das mensagens de *handshake* (RTS/CTS) e ativam temporizadores com valores inversamente proporcional ao ganho. Dessa forma, o que expirar primeiro é selecionado como cooperante.

No primeiro esquema, denominado *Maximum Outdated Relay - Destination Channel Gain* (MCG), a seleção ocorre apenas com a escolha do nodo que apresente o maior ganho de canal ultrapassado. No segundo esquema – *Outages with Minimum Probability* (MOP) –, os parâmetros utilizados são CSI ultrapassado e um expoente de correlação com o CSI atual, onde são realizados cálculos para descobrir a probabilidade de falha, sendo que o nodo selecionado é aquele que apresenta a menor probabilidade de falha.

No terceiro esquema, os autores tentam melhorar o esquema anterior, que apresenta grande complexidade computacional impedindo que dispositivos simples como os nodos sensores o utilizem. O novo esquema foi chamado de *Sub-Optimized Scheme Outages with Minimum Probability* (MOP), e a melhoria proposta foi a realização dos cálculos da seleção por meio de uma operação linear, onde a complexidade computacional é significativamente reduzida.

Os autores citam que o esquema MCG apresenta os mesmos resultados em probabilidade de falha que os esquemas MOP e sub-MOP em redes simétricas. No entanto, quando as redes são assimétricas, com a finalidade de alcançar menor probabilidade de falha e redução das cargas computacionais, o esquema de Sub-MOP é uma escolha melhor.

A técnica de seleção proposta por Wang et al. (2010) apresenta uma abordagem diferente dos trabalhos citados até o momento. A ideia básica é a de selecionar um mesmo nodo cooperante para vários nodos origens, os autores consideram vários nodos origens e vários nodos destinos. Junto com a seleção é proposto um algoritmo de alocação de potência para que os nodos cooperantes utilizem a potência mínima necessária durante a transmissão.

O processo de escolha do melhor nodo é realizado de maneira distribuída, utilizando um mecanismo de *feedback* (ACK, NACK). Utiliza como parâmetro o ganho do canal, o nodo que apresentar o melhor ganho é selecionado.

O funcionamento da técnica decorre da seguinte forma, todos os nodos origem transmitem mensagens para seus respectivos destinos usando a potência máxima em canais ortogonais. Cada nodo destino decodifica a mensagem de seu nodo de origem, enquanto cada nodo origem decodifica as mensagens de outros $m - 1$ nodos de origem. Cada nodo destino que decodificar a mensagem corretamente, transmite uma mensagem de reconhecimento (ACK). Caso contrário, transmite um NACK. Cada nodo origem (possível cooperante) que decodificar a mensagem enviada por outro nodo origem e que também escutar o NACK do nodo destino desta mensagem torna-se um membro do conjunto de decodificação para este nodo. No final deste passo, o conjunto de decodificadores $D(S_i)$ é formado para cada nodo origem S_i que falhar na transmissão direta.

Para cada nodo origem S_i que receber um NACK de seu destino, os nodos em seu conjunto de decodificação $D(s_i)$ começam a competir uns com os outros em uma janela de tempo. O nodo com o melhor canal cooperante-destino vai ganhar e se tornar o melhor meio de S_i . O melhor nodo que pertencer a apenas um nodo origem, retransmite a mensagem com potência máxima. O melhor nodo que pertencer a vários nodos origens, irá dividir a potência entre as retransmissões para auxiliar esses nodos origens.

O interesse dos autores foi analisar a probabilidade de falha, a simulação foi realizada entre o protocolo proposto e um outro protocolo de seleção de cooperantes sem *feedback*, sendo que os dois realizam a seleção do cooperante baseado no ganho do canal. O resultado apresentado mostrou que o protocolo proposto supera o outro protocolo significativamente. Isso é atribuído ao uso do mecanismo de *feedback*.

Cada um dos trabalhos citados realizam a seleção do melhor cooperante ou dos melhores cooperantes levando em consideração apenas estimadores de qualidade, ou seja, não tratam a questão da eficiência energética, o que é um grande desafio para as RSSF. Ao considerarem como parâmetro de seleção apenas estimadores de qualidade geram riscos de obterem dados imprecisos, pois, de acordo com Baccour et al. (2010), estimadores de qualidade baseados em hardware como LQI, RSSI e SNR são medidos com base na amostra dos primeiros 8 símbolos de um pacote recebido e não todo o pacote. Além disso, esses estimadores são medidos apenas usando pacotes recebidos com êxito. Portanto, quando um *link* de rádio sofre perdas de pacotes, podem superestimar a qualidade do *link* por não considerar a informação de pacotes perdidos. Por conseguinte, apesar do fato das métricas de hardware poderem fornecer uma maneira rápida para classificar *links* como bons ou maus, eles são incapazes de fornecer uma estimativa precisa de suas qualidades. Por isso não devem ser consideradas de maneira isolada, mas sim combinando-as com outras métricas.

3.2 SELEÇÃO BASEADA EM ESTIMADORES DE QUALIDADE E FATORES ENERGÉTICOS

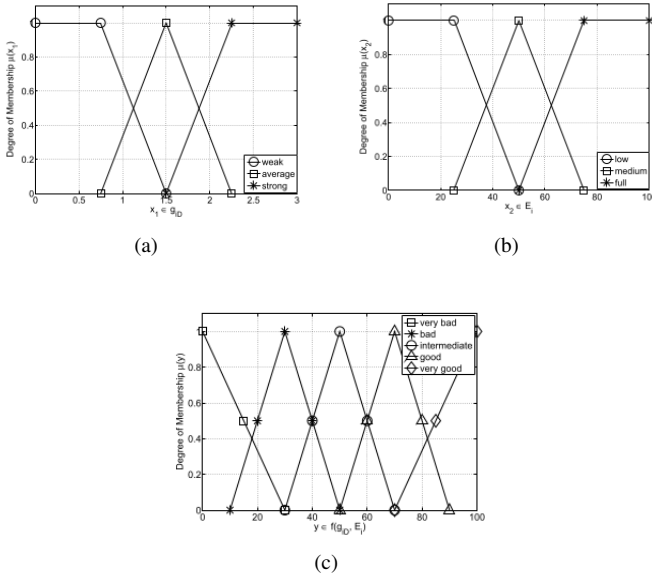
Brante et al. (2013) propõem uma técnica de seleção de nodos cooperantes descentralizada, utilizando lógica *fuzzy*. O objetivo dos autores está na maximização da vida útil da rede e na taxa de transferência fim-a-fim. Como tempo de vida da rede foi considerado o tempo até o primeiro nodo ficar sem energia.

O funcionamento da técnica proposta ocorre do seguinte modo, o nodos que escutarem a mensagem do nodo origem e conseguirem decodificar farão parte do grupo que irá concorrer a cooperante. Para realizar a seleção dois parâmetros foram considerados, a informação do estado do canal em relação ao destino (g_{iD}) e a energia residual de cada nodo (E_i). Assim, em cada nodo é atribuído um grau de relevância para atuar como nodo cooperante, que é a função de g_{iD} e E_i . Quanto maior for a $f(g_{iD}, E_i)$, maior é a qualidade do nodo cooperante.

Os parâmetros g_{iD} e E_i foram mapeados em dois conjuntos $X_1 = \{\text{fraco},$

médio, forte} e $X_2 = \{\text{baixa, média, completa}\}$. Utilizando lógica *fuzzy* foi obtido o conjunto *fuzzy* Y que mapeia o grau de relevância da função $f(g_{iD}, E_i)$ considerando $Y = \{\text{Muito Ruim, Ruim, Intermediário, Bom, Muito Bom}\}$. Para um melhor entendimento, os conjuntos X_1 , X_2 e Y podem ser visualizados na Figura 10.

Figura 10 – Conjuntos X_1 (a), X_2 (b) e Y (c)



Fonte: adaptado de Brante et al. (2013).

A Tabela 3 apresenta o conjunto de regras fuzzy.

Tabela 3 – Conjunto de regras fuzzy.

| $E_i \setminus g_i$ | Fraco | Médio | Forte |
|---------------------|---------------|---------------|--------------|
| Baixa | Muito Ruim | Ruim | Ruim |
| Média | Ruim | Intermediário | Bom |
| Completa | Intermediário | Bom | Muito Bom |

Fonte: adaptado de Brante et al. (2013).

As regras fuzzy foram utilizadas no formato “se X_1 é A e X_2 é B então Y é C ”, simbolicamente representado por “ $A \& B \rightarrow C$ ”. As regras utilizadas foram:

- Regra 1: fraco & baixa \longrightarrow Muito Ruim
 Regra 2: fraco & média \longrightarrow Ruim
 Regra 3: fraco & completa \longrightarrow Intermediário
 Regra 4: médio & baixa \longrightarrow Ruim
 Regra 5: médio & média \longrightarrow Intermediário
 Regra 6: médio & completa \longrightarrow Bom
 Regra 7: forte & baixa \longrightarrow Ruim
 Regra 8: forte & média \longrightarrow Bom
 Regra 9: forte & completa \longrightarrow Muito Bom

Por meio destas regras, quando o nível de bateria for baixo, independentemente da condição do canal, o grau de relevância dos nodos é forçado a ser ruim ou muito ruim. Assim consegue-se evitar que estes nodos sejam selecionados como cooperantes, visando aumentar a vida útil da rede.

Considera-se que cada nodo é capaz de obter o nível de sua própria bateria (E_i) e estimar o estado do seu canal (g_{iD}) utilizando a mensagem de *NACK* enviada pelo nodo destino. Assim, quando o nodo obtém seu grau de relevância, este espera um intervalo de tempo T_i para evitar colisões, caso mais de um nodo apresente o mesmo grau de relevância. Em seguida, coloca-se como cooperante e retransmite a mensagem para o nodo destino.

A técnica proposta se mostrou satisfatória nas comparações citadas pelos autores. Apresentou melhor tempo de vida do que a seleção oportunista e do que a seleção aleatória, mas na taxa fim a fim, a diferença entre a técnica proposta e a seleção oportunista é muito pequena.

YANG et al. (2009) propõem um esquema de seleção de nodos cooperantes e alocação de potência chamado de *Maximum Lifetime (MLT)*. O objetivo dos autores é a maximização da vida útil da rede. Os autores consideram como tempo de vida da rede, o período em que é respeitado um número máximo de falhas toleráveis. Caso esse número seja superado, considera-se o fim do tempo de vida da rede.

A técnica de seleção de nodos cooperantes proposta é centralizada e utiliza a informação de estado de canal (CSI) como parâmetro para a seleção. O funcionamento da técnica ocorre da seguinte forma. Assume-se que existam duas fases para a comunicação. A primeira é quando o nodo origem realiza a transmissão *broadcast*, onde o conjunto de cooperantes é determinado. Uma premissa assumida é que a potência de transmissão do nodo origem seja forte o suficiente para assegurar que todos os N nodos da rede possam decodificar com sucesso a mensagem original do nodo origem (exceto o nodo destino).

Na fase inicial, a energia, o limite de potência e limites relacionados de cada nodo são inicializados. O esquema de seleção de nodos cooperantes

e atribuição de potência incide sobre o segundo salto. Em cada transmissão, os ganhos de potência do canal são gerados, e o SNR recebido é calculado a partir dos ganhos de potência de canal instantâneos. Uma vez que todos os nodos podem decodificar a mensagem da fonte, cada um deles pode ser adicionado ao conjunto de cooperantes para ajudar a encaminhar a mensagem do nodo origem.

Na segunda fase, ocorre a alocação de potência. A informação de energia residual é considerada nesta etapa, os autores utilizam esta informação para determinar a potência de transmissão, para manter o equilíbrio do consumo de energia da rede. Ao realizar a retransmissão é verificado no destino se o SNR é superior ao limite pré-definido. Caso não seja, o nodo é excluído do conjunto de cooperantes, pois considera-se que o nodo não possui energia suficiente para prover a potência necessária para que a mensagem chegue no destino. Assume-se que, quando o SNR é menor que o valor limite, ocorre uma falha.

Nos resultados, os autores mostraram que o esquema proposto consegue aumentar a vida útil da rede de maneira simples, sem gerar sobrecarga de sinal extras na rede.

Wei, Yu e Song (2010) utilizam cadeias de Markov de estado finito (*Finite-State Markov Channels - FSMC*) para resolver o problema de seleção de nodos cooperantes, além disso, consideram também como parâmetros a energia residual dos nodos e SNR (considerado como qualidade do canal). O objetivo dos autores é aumentar a eficiência espectral, diminuir a propagação de erros e maximizar o tempo de vida da rede. Os autores assumem que o nodo origem e os nodos candidatos a cooperantes podem utilizar MCS (*Modulation and Coding Scheme*) diferentes.

O funcionamento da técnica proposta ocorre da seguinte forma. O nodo origem inicia a transmissão enviando um pacote RTS (*Request To Send*) para o nodo destino. O nodo destino e todos os nodos vizinhos ao nodo origem que recebem esse pacote estimam o ganho de canal do nodo origem até eles. O nodo destino decide o MCS do link origem-destino (*S2D*) da próxima qualidade de canal e responde para a origem com um pacote CTS (*Clear to Send*), contendo a informação do MCS escolhido para o link *S2D* e o ganho de canal da origem até o destino. O nodo origem e todos os nodos vizinhos receberão estas estimativas. Então, o nodo origem irá ajustar o MCS para o escolhido para o próximo *time slot*. Os nodos vizinhos também aprendem qual MCS deve ser adotado para ouvir o pacote de dados a partir do nodo origem e obter a informação do canal. Assim, eles podem estimar o ganho do canal a partir deles até o nodo destino por meio do pacote de CTS e decidir o MCS do link cooperante-destino (*R2D*) de acordo com a previsão da próxima qualidade de canal. Os vizinhos comuns do par origem-destino que podem

decodificar os dois, RTS e CTS, formam o conjunto de potenciais cooperantes.

Após esta troca de mensagens de *handshake*, os nodos potenciais já possuem a informação do estado do canal e também a informação de seu estado de energia. Tanto a informação de estado de canal quanto a de estado de energia são classificadas em L níveis, e cada nível está associado com um estado de uma cadeia de Markov. O canal varia ao longo desses estados em cada *time slot* de acordo com um conjunto de probabilidade de transição de Markov.

De acordo com as informações de estado de canal e estado de energia, cada nodo calcula seu índice e transmite um pacote de índice candidato. Quando outros nodos candidatos recebem este pacote, comparam o índice recebido com o seu próprio índice e só transmitem o seu próprio pacote se seu índice for menor que o índice recebido. Caso contrário, permanecem em silêncio e param de ouvir a transmissão do nodo origem, o que é energeticamente eficiente para a rede.

Os autores definem um temporizador no nodo destino e no nodo origem para determinar o momento de pararem de receber os pacotes de índice candidato. Após o temporizador expirar, o nodo origem recebe todos os pacotes e seleciona o nodo com o menor índice para ser o cooperante. E o nodo destino utiliza a informação de MCS do nodo de menor índice para receber a retransmissão deste.

Os resultados apresentados pelos autores mostraram que o esquema proposto se comportou melhor do que os esquemas que foram comparados (*memoryless* e seleção aleatória), apresentou um tempo de vida da rede superior, maior eficiência espectral e também um desempenho melhor.

3.3 SELEÇÃO BASEADA EM ESTIMADORES DE QUALIDADE E VIZINHANÇA

Etezadi et al. (2012) propõem três esquemas de seleção de nodos retransmissores. O primeiro é chamado de seleção ótima, onde os nodos cooperantes são os que maximizam a relação sinal-ruído (SNR) no destino. O segundo é baseado na geometria, seleciona os nodos mais próximos do nodo origem. O terceiro é a seleção aleatória, em que os nodos são selecionados aleatoriamente a partir de certa vizinhança da origem. Em todos os esquemas, todos os nodos operam no modo *amplify-and-forward* e cada nodo só tem acesso a seu canal de links anteriores (*backward*) e localização.

Seleção ótima: o conjunto de retransmissores é formado pelos nodos que

apresentam os maiores SNR. O nodo destino envia uma mensagem CTS, e assume-se que todos os nodos recebem esta mensagem simultaneamente. Ao receberem a mensagem, os nodos disparam um temporizador, o que expirar primeiro é o do nodo que apresenta o maior SNR.

Ao expirar o temporizador, o nodo altera para o modo de transmissão e atua como o primeiro cooperante, enviando o sinal para o nodo destino. Assim que o sinal retransmitido é ouvido por outros nodos, eles pausam seus contadores até que o canal fique livre. No final do primeiro período de transmissão, o nodo cooperante altera para o modo de escuta e define seu temporizador para o valor inicial novamente, enquanto todos os outros nodos retornam seus temporizadores até que o próximo temporizador expire.

O processo continua até que o número total dos sinais retransmitidos atinja um limite de SNR em que o nodo destino consiga ler a mensagem. Em seguida, cada nodo que não adquiriu o *status* de retransmissor redefine seu temporizador para o valor inicial e espera no modo de escuta para outra rodada de transmissão do nodo origem e de competição para escolha do cooperante. As pausas do temporizador são necessárias para evitar uma colisão entre os sinais transmitidos pelos nodo cooperantes, caso contrário, é possível que alguns nodos expirem seus contadores e retransmitam os sinais de transmissão durante a transmissão de um cooperante.

No canal, o SNR pode variar com frequência. Dessa forma, o conjunto de nodos com os maiores SNR pode mudar entre uma transmissão e outra. Este fato sugere que, nesse esquema, todos os nodos são possíveis candidatos a cooperantes, e, portanto, devem sempre alternar entre a escuta e o modo de transmissão sem ter o privilégio de sair para o modo de dormir e preservar energia.

Seleção de cooperantes baseado na geometria: Para minimizar o problema de energia da primeira proposta de seleção, os autores propõem uma modificação. Assume-se que a topologia da rede sofre alterações lentamente. Dessa forma, quando os nodos recebem a mensagem de CTS enviada pelo nodo destino, o funcionamento é semelhante ao da primeira proposta. Esses nodos inicializam seus temporizadores e o que expirar primeiro é o cooperante. A única diferença é que, logo que a transmissão dos cooperantes termina, todos os nodos que não adquiriram o *status* de retransmissor alteram para o modo *sleep* por T segundos. O valor de T depende do conhecimento prévio sobre a taxa esperada de mudanças na topologia da rede e pode ser escolhida na ordem do tempo necessário para a transmissão de várias centenas de quadros de dados. Depois dos T segundos todos os nodos que estavam no modo *sleep* alteram para o modo de escuta, configuram seus temporizadores novamente, e participam da nova rodada da competição para adquirir o *status* de coope-

rante.

Se a topologia da rede muda muito lentamente, o conjunto dos nodos mais próximos ao nodo origem raramente sofre atualizações. Portanto, esses nodos continuam a alternar entre a escuta e o modo de transmissão, levando a um esgotamento precoce das suas baterias, enquanto todos os outros nodos continuam no modo de *sleep* e economizam energia.

Seleção Aleatória de Cooperantes: Para melhorar a deficiência do esquema anterior, onde alguns nodos tinham suas baterias esgotadas mais rapidamente, os autores propuseram este novo esquema. Essa seleção busca reduzir a disparidade de carga restante da bateria dos nodos, renovando periodicamente um grupo de nodos selecionados aleatoriamente de um raio R em torno do nodo origem $O(S,R)$. Isso é feito deixando cada nodo em um disco de raio R centrado no nodo origem, e cada nodo definindo seu temporizador inicial para um valor gerado aleatoriamente.

Quando a mensagem CTS é recebida, todos os nodos no $O(S,R)$ iniciam seu temporizador e o procedimento de retransmissão (igual ao da duas técnicas descritas anteriormente) segue até que o nodo k -ésimo encaminhe o seu sinal. No fim da fase de retransmissão, todos os nodos que não tiveram sucesso para retransmitir seus sinais alteram para o modo *sleep* por um determinado período de T segundos. Depois dos T segundos, todos os nodos em modo *sleep* retornam para o modo de escuta, e, junto com o restante do conjunto dos nodos, inicializam seus temporizadores com novos valores gerados aleatoriamente. A adoção desse esquema de seleção faz com que todos os nodos no $O(S,R)$ tenham a mesma probabilidade de adquirir o estado de retransmissor, reduzindo o risco de se selecionar sempre os mesmos nodos.

Os autores realizaram as comparações entre os esquemas propostos e obtiveram como resultados que o terceiro esquema consegue reduzir o consumo energético por nodo. Contudo, foi observado que o consumo de energia total na rede se mostrou maior no terceiro esquema do que no segundo, o que foi justificado pelo fato que, no esquema de seleção aleatória, mais nodos permanecem no modo de escuta para competir com o direito de adquirir o status de cooperante.

3.4 SELEÇÃO BASEADA EM *FRAME ERROR RATE*

Gokturk e Gurbuz (2014) propõem dois algoritmos de seleção de nodos cooperantes – um centralizado (*Optimal Cooperator Selection and Power Assignment* - O-CSPA) e um descentralizado (*Distributed Cooperator Selection and Power Assignment* - D-CSPA) –, os quais visam a redução do con-

sumo energético utilizando FER (*Frame Error Rate*). Neste modelo, os autores levam em consideração não somente os consumos energéticos de transmissão dos nodos, mas também os consumos dos circuitos receptores de todos os nodos que participam da transmissão cooperativa.

O objetivo dos autores ao proporem os algoritmos de seleção de nodos cooperantes foi encontrar o melhor conjunto de nodos cooperantes de forma a minimizar o total de energia consumida por bit e garantir o nível de confiança desejado para a comunicação. Um *link* (direto ou cooperativo) é definido como confiável se o FER observado estiver abaixo de um valor predeterminado.

Na abordagem centralizada existe um nodo central, o nodo origem, que irá selecionar os nodos do conjunto de cooperantes de modo incremental. O número de cooperantes no conjunto é incrementado até que o conjunto satisfaça o FER alvo e que o conjunto apresente um consumo mínimo de energia. Os nodos considerados para fazerem parte do conjunto de cooperantes são os nodos que conseguiram decodificar com sucesso a mensagem oriunda do nodo origem.

Nesta abordagem, assume-se que o nodo central possua disponível toda a informação do canal. Dessa forma, este nodo calcula os vetores de atribuição de potência e consumo de energia para o conjunto de cooperantes até encontrar o conjunto que minimize o consumo energético.

Na abordagem descentralizada, cada nodo toma a decisão se será cooperante ou não e calcula o próprio nível de potência ideal. Cada nodo que conseguiu decodificar a mensagem oriunda do nodo origem calcula a alocação de potência necessária para satisfazer o FER alvo na transmissão. Se um nodo deduz que a sua inclusão no conjunto de cooperação pode ajudar a alcançar o FER necessário, anuncia sua intenção para a cooperação.

Cada vez que um nodo anuncia a sua disponibilidade para cooperação, os outros nodos calculam a atribuição ideal de potência e o custo da energia para o conjunto e compara-o com o custo energético do conjunto antes de sua inserção. O algoritmo continua até que o custo de energia por bit não possa diminuir mais. Caso não existam nodos disponíveis para a cooperação ou a exigência do FER não possa ser satisfeita com a cooperação dos nodos disponíveis, a cooperação é abortada.

Para obter os resultados, os autores compararam as abordagens propostas com duas técnicas de seleção de cooperantes, Seleção aleatória de cooperantes (R-CS) e a seleção ótima (O-CS). As técnicas propostas se mostram superiores, pois em todas as comparações apresentaram maior redução no consumo energético. Comparando as duas técnicas propostas, a descentralizada apresentou resultados tão bons quanto a centralizada, com a vantagem de redução de *overhead*.

3.5 SELEÇÃO BASEADA EM *STACKELBERG GAME*

Wang, Han e Liu (2009) propõem a seleção de nodos cooperantes e alocação de potência utilizando *Stackelberg game*. Os autores utilizaram o protocolo de cooperação *Amplify-and-Forward (AF)*. A ideia básica da proposta é realizar a seleção dos nodos cooperantes sem utilizar uma abordagem centralizada, que utilize uma informação precisa de CSI (*Channel State Information*). Dessa forma, propõem uma abordagem descentralizada visando reduzir o *overhead* e mensagens de sinalização sobre as condições do canal.

Utilizando *Stackelberg game*, o nodo origem é modelado como comprador, e busca alcançar o melhor desempenho com a ajuda dos nodos cooperantes pagando um valor mínimo para estes. Cada nodo cooperante é modelado como vendedor, onde buscam obter o pagamento não apenas para seu custo de encaminhamento, mas também para que ganhem lucro extra.

Cada nodo cooperante se encontra em um lugar distinto e cobra um preço diferente para ajudar o nodo origem. Dessa forma, o nodo origem precisa selecionar os melhores nodos cooperantes, já que alguns nodos apresentam condições de canal ruins e pedem um preço elevado. O objetivo do nodo origem é maximizar a utilidade U_s através da compra de uma quantidade ideal de potência P_{r_i} , onde a utilidade é definida como $U_s = aR_{s,r,d} - M$. Nessa fórmula, $R_{s,r,d}$ representa a taxa alcançável com a ajuda dos nodos cooperantes, a indica o ganho unitário de taxa de saída do MRC e M representa o pagamento total que foi pago pelo nodo origem para os nodos cooperantes.

Por se tratar de uma aplicação distribuída, cada nodo cooperante não conhece os preços dos outros nodos cooperantes. Desta forma, ao iniciar, o preço p_i é inicializado com o custo da potência de retransmissão de dados c_i . O critério de rejeição de nodos cooperantes permite que o nodo origem exclua os nodos menos benéficos no início: se $c_i \geq \left(a \frac{\partial R_{s,r,d}}{\partial P_{r_i}} \right)$ o nodo é excluído. Onde a indica o ganho unitário de taxa de saída do MRC, $R_{s,r,d}$ indica a taxa alcançável com a ajuda do cooperante e P_{r_i} indica o quanto de potência o nodo origem irá comprar a partir do cooperante r_i . Por meio do critério de rejeição, a sobrecarga de sinalização é reduzida, porque o nodo origem e os nodos rejeitados não precisam trocar suas informações sobre a compra de potência e os preços.

A escolha do preço ótimo p_i é afetado não só pelas próprias condições do canal de cada nodo para o nodo origem e para o nodo destino, mas também pelos preços dos outros nodos. Isso ocorre porque os nodos candidatos a cooperantes competem para serem selecionados pelo nodo origem.

Se um determinado nodo r_j cobra um preço tão alto que faz com que seja menos benéfico do que os outros nodos para o nodo origem, o nodo ori-

gem passará a comprar menos do nodo r_j ou mesmo descartá-lo. Por outro lado, se o preço é muito baixo, o lucro obtido será desnecessariamente baixo. De acordo com os autores, há um *trade-off* para definir o preço. Se com o preço ideal, denotado por p_i^* , a utilidade resultante do nodo r_i é negativa, ou seja, $U_{r_i}^* \leq 0$, então o nodo r_i sairá do jogo do nível vendedor, uma vez que não pode cobrir o custo básico com a venda de potência para o nodo origem. Os autores mostraram que, comparando uma abordagem centralizada, a taxa de transmissão das duas se igualam, considerando o mesmo consumo de potência nas duas abordagens.

3.6 COMPARAÇÃO DOS TRABALHOS RELACIONADOS

A Tabela 4 apresenta um comparativo dos trabalhos descritos neste capítulo, com relação aos parâmetros utilizados para a seleção dos nodos cooperantes: estimadores de qualidade (LQI, SNR, CSI e RSSI), energia residual, vizinhança e taxa de sucesso das transmissões recentes. A tabela também apresenta as métricas utilizadas, em cada um dos trabalhos, para avaliar as técnicas de seleção de nodos cooperantes.

A partir do estudo realizado é possível observar que a maioria dos trabalhos encontrados na literatura consideram poucos parâmetros para realizar a seleção dos nodos cooperantes, ou consideram apenas estimadores de qualidade. Ao considerarem apenas os estimadores de qualidade de maneira individual, existe o risco de realizar uma seleção errônea, pois os dados podem ser imprecisos. Como já foi citado, estes estimadores consideram apenas os pacotes recebidos, se ocorrer muitas perdas, pode ocorrer sobrestimação da qualidade do link por não considerarem a informação dos pacotes perdidos.

Para melhorar a seleção dos nodos cooperantes, a abordagem proposta neste trabalho considera outros parâmetros além dos estimadores de qualidade, tal como a energia residual. Além disso, considerar a vizinhança dos nodos é importante, assim é possível saber quantos nodos o cooperante poderá ajudar. Como a taxa de sucesso das transmissões recentes informa se o cooperante apresenta uma boa comunicação com o destino, objetiva-se realizar a seleção de nodos cooperantes de uma maneira completa, considerando fatores importantes da RSSF.

Desta maneira, a Tabela 4 apresenta um posicionamento da técnica proposta nesta dissertação em relação aos trabalhos encontrados na revisão sistemática da literatura relacionados a seleção de nodos cooperantes em RSSF.

Tabela 4 – Comparação dos Trabalhos Relacionados.

| Artigos | Parâmetros de Seleção de Cooperantes | | | | Métricas Avaliadas |
|-------------------------|--------------------------------------|------------------|------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Estimadores de Qualidade | Energia Residual | Vizinhança | Taxa de Sucesso | |
| Marchenko et al. (2014) | ✓ | | | | - Taxa de sucesso; - Nº de tentativas de seleção de cooperantes. |
| Brante et al. (2013) | ✓ | ✓ | | | - Taxa de sucesso; - Consumo energético. |
| YANG et al. (2009) | ✓ | | | | - Consumo energético. |
| Sun et al. (2009) | ✓ | | | | - Probabilidade de falha. |
| Ikki e Ahmed (2009) | ✓ | | | | - Probabilidade de falha; - Capacidade média do canal. |
| Wei, Yu e Song (2010) | ✓ | ✓ | | | - Consumo energético; - Taxa de erro por bit; - Eficiência espectral. |
| Etezadi et al. (2012) | ✓ | | ✓ | | - Consumo energético. |
| Li et al. (2011) | ✓ | | | | - Probabilidade de falha. |
| Wang et al. (2010) | ✓ | | | | - Probabilidade de falha. |
| Gokturk e Gurbuz (2014) | | | | | - Custo médio de energia por bit. |
| Wang, Han e Liu (2009) | | | | | - Taxa de transmissão. |
| Proposta | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | - Taxa de Sucesso; - Percentual de mensagens retransmitidas inutilmente; - Média de Cooperações realizadas por nodo; - Consumo energético. |

Fonte: Própria.

3.7 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Existem diversos trabalhos a respeito da seleção de nodos cooperantes na literatura. A maioria destes realizam a seleção dos nodos cooperantes com a preocupação em apenas selecionar nodos cooperantes que apresentem boa comunicação com o nodo destino e/ou que o nodo tenha energia residual. Considerar somente estes parâmetros não garante uma seleção adequada, pois realizar a seleção baseada em estimadores de qualidade (entre o link do possível cooperante até o nodo destino) não garante que a seleção esteja considerando informações precisas, estes estimadores consideram apenas os pacotes recebidos, se ocorrer muitas perdas, pode ocorrer sobrestimação da qualidade do link por não considerarem a informação dos pacotes perdidos. Desta forma, outros fatores são importantes para garantir que a seleção dos melhores nodos cooperantes ocorra. Por isso este tema de pesquisa ainda é desafiador.

4 PROPOSTA DE UMA TÉCNICA DE SELEÇÃO DE NODOS COOPERANTES

Este capítulo apresenta a proposta de uma técnica, denominada Smart, que realiza a seleção de nodos cooperantes em RSSF, considerando critérios relevantes para um bom funcionamento da rede. O objetivo desta técnica é promover a seleção do menor número de nodos cooperantes e, ao mesmo tempo, assegurar que todos os nodos tenham pelo menos um nodo como cooperante, aumentando a probabilidade que suas mensagens cheguem com sucesso ao destino.

O capítulo inicia com uma contextualização referente a comunicação em RSSF. Na sequência é apresentado o modelo do sistema. Por fim, são apresentadas e discutidas algumas técnicas de seleção de nodos cooperantes existentes na literatura, que também buscam melhorar a confiabilidade na entrega das mensagens. Essas soluções são comparadas, com o método de seleção de nodos cooperantes proposto nesta dissertação.

A proposta da técnica Smart, apresentada neste capítulo, foi publicada em Laurindo et al. (2017).

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Algumas aplicações das RSSF, como por exemplo as industriais, apresentam exigências como a confiabilidade na comunicação e requisitos temporais, que são fundamentais para o funcionamento da rede (VALLE, 2014). A confiabilidade ainda é um grande problema na comunicação. Obstáculos entre os nodos da rede, interferências de equipamentos ou de outras redes, fazem com que as mensagens não alcancem o destino com sucesso. Uma forma de reduzir este problema é utilizar mecanismos de retransmissão por cooperação, mas para realizar a retransmissão é necessário que ocorra a seleção dos nodos que estão aptos a cooperar.

Os trabalhos na literatura dessa área possuem como preocupações principais a redução das falhas das comunicações e do *overhead*, além de maximizar a vida útil da rede (BLETSAS et al., 2006; CHEN et al., 2006; AMARASURIYA; ARDAKANI; TELLAMBURA, 2010; FENG; XIAO; CIMINI, 2013; LUO et al., 2015). Desta forma, a técnica de seleção de nodos cooperantes em RSSF proposta nesta dissertação leva em conta essas preocupações, propondo uma solução, que modela o problema utilizando técnicas de otimização, as quais buscam maximizar o uso de um ou mais recursos, de acordo com as restrições impostas pelas RSSFs.

4.2 MODELO DO SISTEMA

O modelo de sistema assume uma rede organizada em topologia estrela, com até 100 nodos, além de um nodo coordenador, em um ambiente sujeito a interferências. Neste ambiente, considera-se que a interferência é intermitente devido, por exemplo, a inicialização de novos nodos ou ao esgotamento da bateria de um ou mais nodos. A seleção dos cooperantes ocorre de maneira centralizada, ou seja, considerando a existência de um nodo coordenador que selecionará os melhores nodos cooperantes. Assume-se ainda que o sistema apresenta as seguintes características:

- **Padrão IEEE 802.15.4:** O mecanismo de comunicação está baseado no padrão IEEE 802.15.4, já que este foi projetado para redes de baixas taxas de transmissão e de baixo consumo energético. Entretanto, foram feitas alterações no modo de funcionamento para que se adequasse ao modelo proposto.
- **Acesso ao meio por TDMA:** Será utilizado o acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA), assim tenta-se aumentar a confiabilidade da entrega das mensagens, pois permite o acesso ao meio sem contenção. É importante mencionar que este é um esquema de comunicação similar ao LLDN (*Low Latency Deterministic Networks*) que foi recentemente incluído no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE Computer, 2015).

A restrição na quantidade de nodos deve-se ao fato que uma rede com mais de 100 nodos em topologia estrela não é prático, para redes com grande quantidade de nodos recomenda-se a utilização de topologias *mesh* ou *cluster tree* (LEÃO et al., 2017). Como o acesso ao meio é realizado por TDMA, é reservado um número suficiente de *slots* para que todos os nodos possam transmitir suas mensagens, e também para que todos os cooperantes possam retransmitir suas mensagens em cada período da rede. Como não faz sentido estabelecer uma rede onde todos os nodos são cooperantes, a técnica Smart supõe que há um número limitado de nodos que podem cooperar. Como o valor máximo de nodos na rede é 100, a Smart assume que até 40 % desses nodos podem ser cooperantes.

O mecanismo de comunicação está baseado no padrão IEEE 802.15.4 com *beacon*, com tempo compartimentado. As alterações realizadas no modo de funcionamento do padrão IEEE 802.15.4 foram no valor do parâmetro *aNumSuperframeSlots*, no número de *slots* do GTS e no número de *slots* CAP, que foram realizadas devido a facilidade de implementação sobre um código já existente no padrão IEEE 802.15.4.

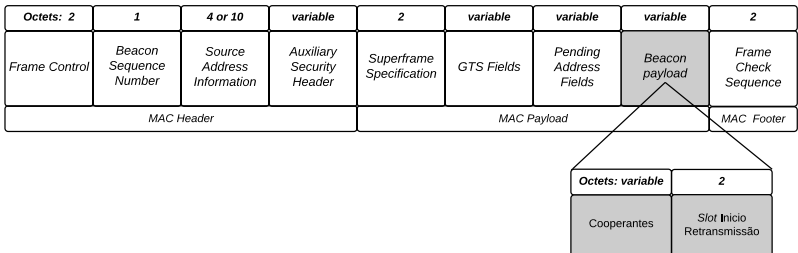
O parâmetro *aNumSuperframeSlots* determina o número de *slots* da porção ativa do *superframe*. O valor deste parâmetro no padrão é 16. Uma vez que o GTS é opcional, o tamanho do CAP corresponde ao maior tamanho possível, equivalente a 16 *slots*, descontando o tempo reservado para o envio do beacon pelo coordenador. Quando GTS é utilizado, o tamanho equivalente ao seu número de *slots* alocados é descontado do tamanho CAP.

Neste modelo de sistema proposto, um total de 140 *slots* GTS são reservados para transmissão e retransmissão de mensagens. O CAP ainda é usado para a associação e desassociação dos nodos na rede, conforme definido pelo padrão IEEE 802.15.4. Assim, o *superframe* foi modificado de modo que o tempo correspondente a 5 *time slots* seja reservado no CAP para os nodos utilizarem durante a associação, na etapa de formação da rede.

Desta forma, o valor do parâmetro *aNumSuperframeSlots* corresponde a 145 *slots*, este valor define os valores utilizados para outros dois parâmetros, *Beacon Interval* (BI) e *Superframe Duration* (SD). Os valores de BI e SD, por sua vez, definem o ciclo de serviço da rede, ou seja, sua periodicidade e seu período de inatividade.

O campo *payload* do *frame* do *beacon* foi utilizado para enviar dois parâmetros, “Cooperantes”, que se trata dos nodos que o coordenador selecionou como cooperantes e “Slot Início Retransmissão”, que irá sinalizar qual o *slot* em que iniciará as retransmissões. Por meio de testes experimentais realizados no simulador, ficou definido que o número máximo de cooperantes é 40, os testes mostraram que mais cooperantes geraria *overhead* no tamanho do *frame* de *beacon*. A Figura 11 apresenta como ficou o *frame* do *beacon*.

Figura 11 – Frame Beacon.

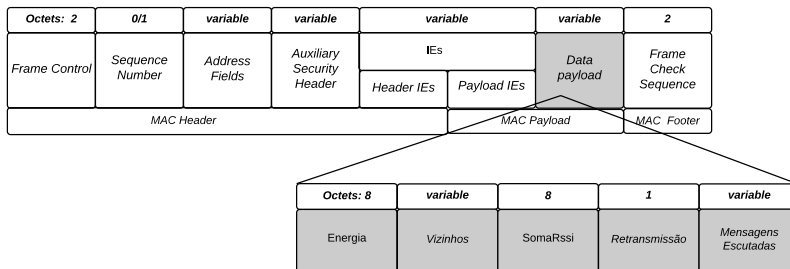


Fonte: Própria.

O campo *payload* do *frame* de mensagem de dados foi utilizado para enviar além dos dados, alguns parâmetros como “Energia”, “Vizinhos”, “SomarSSI” e “Retransmissão”. Os três primeiros parâmetros são infor-

mações que o coordenador utiliza para realizar a seleção de cooperantes. O campo “Energia” possui a informação da energia restante do nodo que enviou a mensagem, o campo “Vizinhos” informa os vizinhos do nodo que enviou a mensagem, o campo “SomaRSSI” representa a soma dos RSSI’s normalizados entre 0 e 1, dos *link’s* de comunicação com todos os nodos vizinhos. O parâmetro “Retransmissão” é do tipo *boolean* e quando a mensagem é uma retransmissão este campo apresenta o valor *true*, caso contrário o valor do campo será *false*. A Figura 12 apresenta como ficou o *frame* da mensagem de dados.

Figura 12 – Frame Mensagem de Dados.



Fonte: Própria.

Na mensagem de retransmissão, o *payload* foi utilizado para enviar o parâmetro “Mensagens Escutadas” que é a lista de mensagens que o nodo escutou e está retransmitindo para o coordenador. Esta lista apresenta o *id* do nodo que transmitiu a mensagem e o *id* da mensagem transmitida. Como o foco desta dissertação é a seleção dos cooperantes, não foi aplicada qualquer técnica de codificação de mensagem para o envio do conjunto de mensagens escutadas.

4.2.1 Seleção dos Nodos Cooperantes

O processo de seleção de nodos cooperantes será modelado como um problema de programação inteira binário. Então, apresenta-se a seguir a formulação geral do problema, onde em uma rede com topologia estrela, pretende-se escolher um conjunto mínimo de nodos cooperantes, mas que possibilite que todos os nodos possam ter pelo menos um cooperante.

Cada nodo poderá ser classificado como cooperante ou não. A determinação do conjunto de cooperantes será baseada no ganho (G_i) provido por um nodo identificado como $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ até o seu conjunto de vizinhos

($j = 1, 2, \dots, v_i$), onde n é a quantidade total de nodos da rede e o nodo x_1 é o coordenador. Um nodo x_i considera um nodo x_j como vizinho, quando este consegue ouvir uma mensagem enviada pelo nodo x_j com o valor de RSSI $\geq -87\text{dBm}$, conforme definido por Srinivasan e Levis (2006) como o valor mínimo para uma boa comunicação em RSSFs.

No ganho é considerada a energia do nodo, o número de vizinhos que cada nodo consegue ouvir e pode cooperar, a qualidade de comunicação entre o nodo origem e o nodo candidato a cooperante, assim como o histórico de transmissões com sucesso do nodo x_i . A Equação 4.1 apresenta esse cálculo:

$$G_i \doteq \left(\frac{\beta^v}{v_i} + \frac{\beta^e}{e_i} + \frac{\beta^s}{s_i} + \frac{\beta^{SR}}{SR_i} \right) \quad (4.1)$$

onde:

- G_i é o benefício do nodo x_i ;
- v_i é o número total de nodos que são vizinhos do nodo x_i ;
- $e_i = \frac{ER}{EI}$, onde ER é a energia restante do nodo x_i e EI é a energia inicial. Ou seja, o valor de e_i é a energia restante no nodo x_i em um valor normalizado entre 0 e 1;
- $s_i = \frac{1}{\text{Limited_RSSI}} \sum_{j=1}^{v_i} \text{RSSI}_j$, onde RSSI_j é o valor de RSSI entre o nodo x_i e o seu vizinho nodo x_j , e a constante Limited_RSSI é o valor mínimo de RSSI para uma comunicação adequada (-87dBm (SRINIVASAN; LEVIS, 2006)).
- $SR_i = (1 - \alpha) \times SR_i + \alpha \times \text{SampleSR}_i$, isto é, o índice histórico da taxa de sucesso nas transmissões recentes do nodo x_i , que é ajustado a cada BI. O valor da variável α é ajustado de acordo com cada caso, definido entre $0 < \alpha < 1$; a variável SampleSR_i é igual a 1 no caso de sucesso da transmissão do nodo x_i ou 0 caso contrário.
- $\beta^v, \beta^e, \beta^s, \beta^{SR}$ - São pesos que indicam a importância de cada um dos parâmetros da equação.

O modelo matemático para o problema é definido como:

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^n G_i y_i \quad (4.2a)$$

$$s.a : \quad Ay \geq b \quad (4.2b)$$

$$Cy = d \quad (4.2c)$$

$$y_i \in \{0, 1\}$$

Utiliza-se G_i , calculado através da Equação 4.1, como o benefício do nodo x_i no problema de minimização. O objetivo é selecionar os nodos com características boas, ou seja, aqueles que apresentem os menores valores para a função objetivo (Equação 4.2a) e que respeitem as restrições (Equações 4.2b e 4.2c).

Na restrição apresentada na Equação 4.2b temos que A é uma matriz de adjacência de ordem $n \times n$, tal que $a_{i,j} = 1$ se o nodo x_i é o vizinho do nodo x_j e $a_{i,j} = 0$, caso contrário. A matriz A é montada no coordenador com base na lista de vizinhos enviada por cada nodo da rede. Portanto, sempre que a lista de vizinhos de um nodo x_j não é recebida pelo coordenador, todos os elementos da linha j da matriz A serão iguais a zero. Destaca-se que y é um vetor de ordem $n \times 1$, onde y_i será igual a 1 quando o nodo x_i for selecionado como cooperante e 0, caso contrário e; b é um vetor, cujo o valor de b_i foi definido como 1, representando a quantidade mínima de nodos cooperantes de cada nodo x_i .

Na restrição apresentada na Equação 4.2c que é determinada pelo nodo coordenador, a matriz C representa o conjunto de nodos que não estão com uma boa qualidade de comunicação com o coordenador (não foi recebida a lista de vizinhos destes nodos) juntamente com a lista de nodos que escutam esses nodos. Ou seja, cada linha da matriz representa um nodo x_i que não se comunica diretamente com o coordenador e cada coluna representa um nodo que escuta este nodo. Neste caso, o valor de d deverá ser igual a 1, garantindo que um nodo que escute o nodo x_i que não tem uma boa comunicação com o coordenador seja cooperante.

A Figura 13 ilustra o funcionamento destas restrições, os nodos somente são considerados vizinhos se o RSSI for maior ou igual a -87dBm . Neste caso, o coordenador x_1 recebeu a lista de vizinhos dos nodos x_2 , x_3 e x_5 . Logo, a matriz A será igual a:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Como o nodo coordenador não recebeu a lista de vizinhos dos nodos x_4 e x_6 os elementos das linhas 4 e 6 da matriz A são iguais a zero. A restrição 4.2b é montada da seguinte forma:

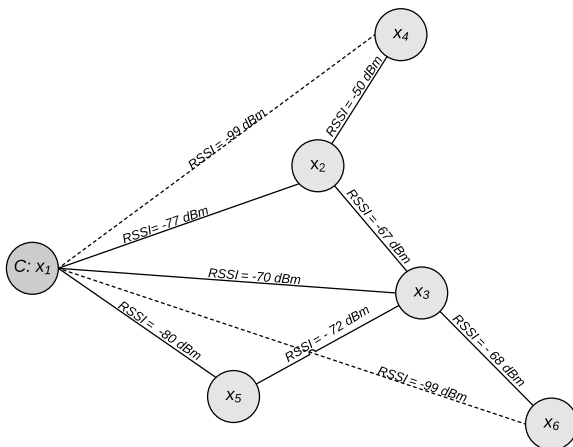
$$X_2: y_2 + y_3 + y_4 \geq 1$$

$$X_3: y_2 + y_3 + y_5 + y_6 \geq 1$$

$$X_5: y_3 + y_5 \geq 1$$

onde, cada linha X_i da restrição é composta pela vizinhança do nodo x_i , essa vizinhança é representada pela variável binária y_i de cada nodo vizinho. Essa restrição garante que cada nodo terá ao menos um cooperante entre seus vizinhos, ou seja, uma ou mais variáveis binárias y_i terá que ser igual a um ($y_i = 1$).

Figura 13 – Rede ilustrando a vizinhança de cada nodo.



Fonte: Própria.

A restrição 4.2c é formada pelos nodos que o coordenador não recebeu a lista de vizinhos, ou seja, x_4 e x_6 . Para cada nodo x_i que não se comunica com o coordenador é montada uma linha de restrição com as variáveis binárias dos nodos x_j que escutam o nodo x_i , e um destes nodos deve ser cooperante, ou seja, a variável binária deste nodo deve ser igual a um ($y_i = 1$). Neste caso, a lista de nodos que escutam o nodo x_4 é formada apenas pelo nodo x_2 e a lista de nodos que escutam o nodo x_6 é formada apenas pelo nodo x_3 , definindo a restrição da seguinte forma:

$$X_4: y_2 = 1$$

$$X_6: y_3 = 1$$

Neste exemplo, caso a lista de nodos que escutam x_4 fosse formada pelos nodos x_2 e x_5 , a restrição seria definida da seguinte forma:

$$X_4: y_2 + y_5 = 1$$

O próximo passo consiste em o coordenador resolver o problema de minimização, onde a função de benefício priorizará a escolha de nodos que tiverem menores valores para a função benefício e que respeite as restrições. O modelo apresentado é classificado como PIB (Programação Linear Inteira Binária), devido a natureza do problema, que visa decidir se um nodo x_i será cooperante (1) ou não (0). A importância dos parâmetros da função benefício pode ser alterada a qualquer momento, de acordo com os valores atribuídos as variáveis: $\beta^v, \beta^e, \beta^s$ e β^{SR} .

Problemas PIB são NP-Hard e normalmente são resolvidos por algoritmos *Branch and Bound*, que consistem em dividir o problema em problemas menores (mais simples) em uma estrutura de árvore. Para encontrar a solução para o problema principal é importante saber quais são as condições em que uma solução candidata pode ter sua qualidade estimada em relação à solução ótima, ainda que sem conhecer a solução ótima. No entanto, essa estimação normalmente é alcançada por meio da solução ótima de problemas mais simples, em um espaço de soluções mais abrangente do que o espaço do problema em questão. Estes problemas mais simples são denominados de relaxações, que podem ser alcançados através da desconsideração de algumas restrições e da simplificação do problema (WOLSEY, 1998).

Para exemplificar o funcionamento das relaxações, seja $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ um vetor com todas as variáveis do problema P e seja $\mathcal{P} = \{\mathbf{x} : \mathbf{x} \text{ satisfaz as equações 4.2b até 4.2d}\}$ o espaço de soluções factíveis. P é representado por $f^* = \min\{f(x) : x \in \mathcal{P}\}$. Um problema R , definido por $r^* = \min\{r(x) : x \in \mathcal{R}\}$, é uma relaxação do problema P se (WOLSEY, 1998):

- i) O espaço de soluções factíveis $\mathcal{P} \subseteq \mathcal{R}$;
- ii) $r(x) \geq f(x)$ para todo $x \in \mathcal{P}$.

Quando um problema de programação inteira é relaxado, este poderá apresentar variáveis com valores reais até que a solução ótima seja encontrada. Para determinar qual é a solução ótima é necessário que o algoritmo saiba qual a condição de otimalidade como condição de parada. Um método utilizado para determinar condições de parada para o algoritmo é encontrar um limite inferior $\underline{z} \leq z$ e um limite superior $\bar{z} \geq z$ e quando $\underline{z} = \bar{z}$, então z é a solução ótima (WOLSEY, 1998).

Um problema relaxado pode ser facilmente resolvido até atingir sua solução ótima, obtendo r^* , para que o limite superior do valor ótimo do problema P possa ser induzido. Relaxações são importantes para se obter certificados de qualidade para uma solução factível¹, além disso, são cruciais para

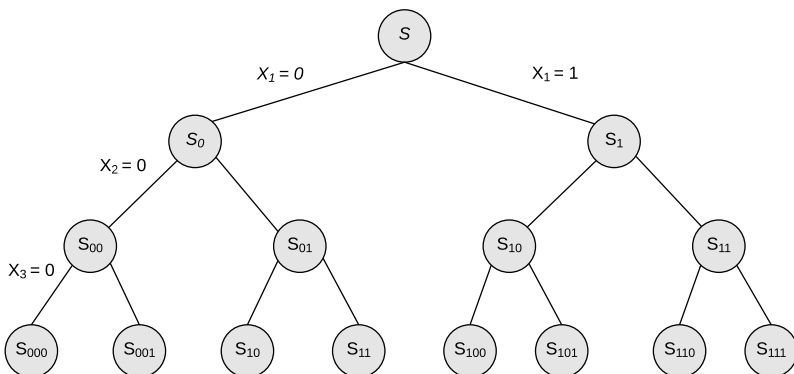
¹ \mathbf{x} é uma solução factível para P se $\mathbf{x} \in \mathcal{P}$

algoritmos que dependem dos limites obtidos por relaxações (NASSIFFE, 2015).

Algoritmo Branch and Bound – O algoritmo do *branch and bound* foi criado para resolver problemas de otimização, por meio da estratégia de dividir para conquistar. Ele consiste em dividir um problema em problemas menores e mais fáceis de serem resolvidos, depois por meio da solução dos problemas menores resolver o problema inicial (WOLSEY, 1998).

Uma abordagem para representar um algoritmo de divisão e conquista num problema de otimização binário seria uma árvore de enumeração explícita, onde seriam fixados todos os possíveis valores para todas as variáveis binárias. Tal estratégia torna inviável a medida que o problema cresce, pois o número de possibilidades de combinações crescerá de forma exponencial ao número de variáveis binárias existentes no problema como mostra a Figura 14 (WOLSEY, 1998).

Figura 14 – Enumeração Explícita.

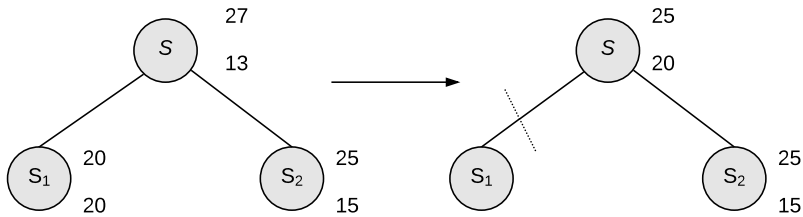


Fonte: Adaptada de (WOLSEY, 1998).

Como a utilização de uma árvore de numeração explícita é muito custosa e totalmente inviável em muitos problemas, uma forma mais inteligente foi utilizada para no *branch and bound*, a enumeração implícita. Nessa forma de enumerar as soluções para cada subproblema do BIP é resolvida uma relaxação linear, para encontrar o limite superior e inferior. Através dos valores dos limites é possível decidir se é válido enumerar soluções para um certo valor da variável de decisão. O algoritmo de *branch and bound* leva em consideração três casos que serão apresentados a seguir (WOLSEY, 1998).

O primeiro caso está representado na Figura 15, um problema S é divi-

Figura 15 – corte por Otimilidade.

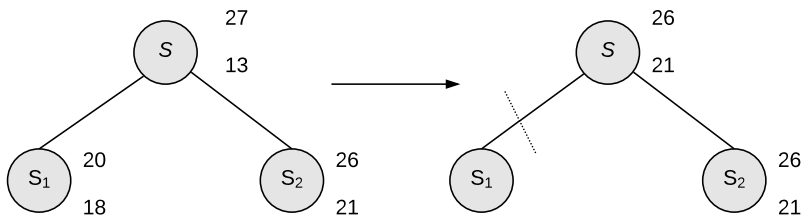


Fonte: Adaptada de (WOLSEY, 1998).

dido em S_1 e S_2 . A Figura 15 mostra um caso onde o limite superior e inferior em S_1 são iguais e S_2 tem um limite inferior e superior diferente, sendo o limite superior maior que o de S_1 . Pode-se observar que na Figura 15 os limites superior e inferior de S_1 são iguais, isso implica que a resposta ótima desse ramo foi encontrada. Agora resta verificar qual será a resposta ótima do outro ramo (WOLSEY, 1998).

O segundo caso é apresentado na Figura 16, pode-se observar que S_1 e S_2 tem respectivamente os limites superior e inferior iguais a $S_1 = (20, 18)$ e $S_2 = (26, 21)$. Isso implica que a solução ótima de S_2 no mínimo terá um valor de 21 que é mais alto que 20 o limite superior de S_1 . Sendo assim, novamente não é necessário verificar as outras soluções de S_1 (WOLSEY, 1998).

Figura 16 – corte por Limite.

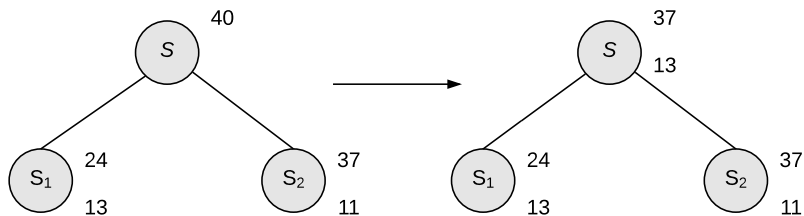


Fonte: Adaptada de (WOLSEY, 1998).

O último caso ocorre quando não é possível pelos valores dos limites das relaxações chegar a alguma conclusão de que um dos ramos terá um valor maior da função benefício.

Na Figura 17 é possível verificar que a solução ótima para o subproblema S_1 é algo entre 24 e 13, enquanto para S_2 é algo entre 37 e 11. Com esse resultado é necessário continuar avaliando as ramificações dos dois subproblemas (WOLSEY, 1998).

Figura 17 – Sem Possibilidade de Corte.



Fonte: Adaptada de (WOLSEY, 1998).

Nesta Dissertação foi utilizado o solver *Ip_solver* para resolver o problema de seleção de nodos cooperantes, considerando que este solver já possui o algoritmo *Branch and Bound* implementado.

4.2.2 Funcionamento da Técnica

A técnica *Smart*, proposta para RSSF compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4, integra um processo de seleção de nodos cooperantes modelado como um problema PIB, cuja solução é determinada pelo nodo coordenador da rede. Os nodos sensores da rede colaboram enviando suas informações de vizinhança e de carga de suas baterias para o nodo coordenador. Além disso, nodos sensores que são escolhidos como cooperantes, retransmitem mensagens de seus vizinhos, aumentando a confiabilidade da rede. Os algoritmos executados nos nodos sensores e no coordenador são apresentados e discutidos a seguir.

O Algoritmo 1 apresenta o modo de funcionamento de um nodo sensor x_i . Quando este nodo se associa à rede, ele precisa sincronizar-se através da mensagem de *beacon* que é enviada no início de cada *beacon interval* (BI). A cada BI (linha 4), todos os nodos fazem uma tentativa de transmissão durante seu respectivo *slot* de tempo (linha 11). No primeiro BI, a rede ainda não terá cooperantes, pois ao iniciar a rede há um período para associação de nodos, seguido por um período de configuração, onde os nodos identificam seus vizinhos e enviam essa informação para o nodo coordenador.

Algoritmo 1: Algoritmo dos nodos sensores.

```

1 v ← {}
2 s ← {}
3 e ← energiaResidualDasBaterias()
4 para cada BI, no Período Ativo da Rede faça
5   recebe(Beacon)
6   listaCooperantes ← extraiListaDeCooperantes()
7   dados ← leDadosDosSensores()
8   pacote ← criaPacote(dados, e, s, v)
9   enquanto não terminar último slot de transmissão faça
10    se for meu slot de transmissão então
11      transmite(pacote)
12    senão
13      se sou Cooperante(listaCooperantes) então
14        dadosRetransmissao ← escutaVizinhos()
15        v ← escutaVizinhos()
16        s ← somaRSSILinksVizinhos()
17      senão
18        v ← escutaVizinhos()
19        s ← somaRSSILinksVizinhos()
20    fim
21  fim
22 fim
23 se sou Cooperante(listaCooperantes) então
24   se for meu slot de retransmissao então
25     pacote ← criaPacote(dadosRetransmissao)
26     transmite(pacote)
27   fim
28 fim
29 e ← energiaResidualDasBaterias()
30 dormeAtéPróximoBeacon()
31 fim

```

Nos BIs seguintes, os nodos já conhecem seus vizinhos pois escutam as mensagens enviadas por estes (linhas 15 e 18). Essa informação de vizinhança é inserida no pacote (linha 8) e transmitida para o coordenador (linha 11), juntamente com os dados adquiridos pelo sensor (linha 7), da carga atual de suas baterias (linha 29) e com a soma dos RSSI's dos links de comunicação com todos os vizinhos do nodo (linhas 16 e 19).

No caso do nodo estar na lista de cooperantes enviadas pelo coordenador (inserida no *beacon* linha 5), além de escutar as mensagens para iden-

tificar seus vizinhos, esse nodo cooperante também armazena os dados das mensagens dos vizinhos (linha 14). Esses dados serão usados pelo nodo cooperante para enviar mensagem de retransmissão para o coordenador em seu *slot* de retransmissão (linhas 25 e 26).

Importante observar que esse algoritmo executado nos nodos sensores é passível de várias melhorias buscando reduzir o consumo energético dos nodos. Como exemplo, a carga das baterias não precisaria ser lida a cada BI (linha 29), pois essa carga é reduzida gradualmente com o passar do tempo. Da mesma forma, em uma rede que a topologia não muda muito frequentemente, um nodo que não seja cooperante não precisaria obter a informação de sua vizinhança a cada BI (linha 18). Essa última melhoria permitiria que, na maior parte do tempo, após transmitir seu pacote (linha 11), esse nodo entrasse imediatamente em modo de sono (linha 30). Contudo, para esse trabalho de dissertação essas melhorias não foram implementadas.

Algoritmo 2: Algoritmo do nodo coordenador.

```

1 listaCooperantes ← {}
2 para cada BI, no Período Ativo da Rede faça
3   enviar(Beacon)
4   para cada  $i$  de 1 até  $n$  faça
5     | recebe(pacote)
6   fim
7   para cada  $j$  de 1 até  $m$  faça
8     | recebe(pacote)
9   fim
10  processa(dados) // questão não tratada nessa dissertação
11  se BI for um período de seleção então
12    | listaCooperantes ← Smart(e,s,v,SR)
13  fim
14 fim

```

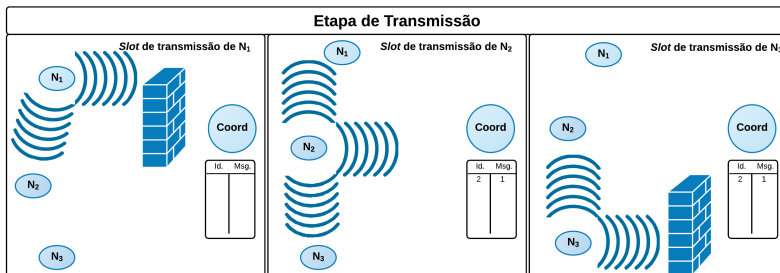
O Algoritmo 2 apresenta o modo de funcionamento do nodo coordenador. A cada BI, o coordenador envia a mensagem de *beacon*, onde está inserida a lista de cooperantes (linha 3). Posteriormente, o coordenador entrará em modo de escuta para receber os pacotes de transmissão (linhas 4 a 6), ou seja, os pacotes transmitidos com sucesso nos n *slots* de transmissão. Na sequência, o coordenador receberá os pacotes de retransmissão (linhas 7 a 9), ou seja, os pacotes transmitidos pelos nodos cooperantes nos m *slots* de retransmissão. Esses pacotes que foram enviados pelos nodos sensores e

recebidos pelo coordenador são usados no cálculo da função benefício, conforme Equação 4.2a, que determinará uma nova lista de cooperantes sempre que o BI for um período de seleção (linhas 11 e 13). O nodo coordenador pode utilizar os dados recebidos pelos nodos para executar outras funções, tais como fusão de dados, tomadas de decisão etc. Contudo, essas funções extras estão fora do escopo dessa dissertação (linha 10).

No Algoritmo 1, os nodos que foram selecionados como cooperantes executarão suas comunicações em duas etapas: transmissão e retransmissão. Com a finalidade de ilustrar o funcionamento dessas etapas, as Figuras 18 e 19 são apresentadas e discutidas a seguir.

Na primeira etapa (Figura 18), cada nodo realiza a sua transmissão. Os nodos vizinhos que escutarem a mensagem irão inserir o nodo remetente como vizinho. Os nodos que forem cooperantes irão armazenar o identificador (*id*) do remetente e o *id* da mensagem que escutaram, para que, na etapa de retransmissão, estes possam encaminhá-las para o coordenador. Se o nodo não for cooperante, este espera até que a etapa de transmissão termine e entra em modo *sleep*, representados pelos nodos N_1 e N_3 na Figura 18. Os nodos se mantêm na escuta até o fim da etapa de transmissão, porque precisam escutar os nodos que estão próximos e assim atualizar a lista de vizinhos para enviar ao coordenador.

Figura 18 – Etapa de transmissão.



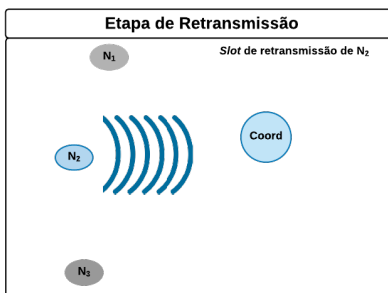
Fonte: Própria.

Na segunda etapa (Figura 19), cada um dos nodos cooperantes irá retransmitir, no seu slot de retransmissão uma mensagem contendo os *id*'s dos remetentes e os *id*'s das mensagens que escutaram. Na prática é necessário que a mensagem escutada seja retransmitida e não apenas os *id*'s. O coordenador, ao receber esta informação, verifica se já havia escutado as mensagens retransmitidas. Na Figura 19 este passo é apresentado em forma de uma tabela abaixo do nodo coordenador, que recebeu a mensagem de cooperação do

nodo N_2 , com as mensagens escutadas do nodos N_1 e N_3 . Se este já possui as mensagens ignora-as, caso contrário armazena a mensagem recebida. Após a retransmissão, o cooperante irá entrar no modo *sleep*. Caso o modo de funcionamento da rede seja sem cooperação, cada um dos nodos entra no modo *sleep* logo após transmitir, já que não há necessidade de escutarem os outros nodos.

Em uma aplicação prática, a retransmissão das mensagens poderia ser realizada por meio de técnicas de codificação, como a técnica proposta por Valle et al. (2016). Neste caso, o nodo cooperante criará uma nova mensagem utilizando uma combinação linear das mensagens que escutou e a enviará para o coordenador, juntamente com os identificadores das mensagens. O coordenador, ao receber as mensagens, monta um sistema linear com todas as mensagens recebidas, codificadas ou não, e então as mensagens que foram codificadas são recuperadas por meio da resolução do sistema linear.

Figura 19 – Etapa de retransmissão.



Fonte: Própria.

4.3 TÉCNICAS DE SELEÇÃO DE COOPERANTES

Há na literatura a proposta de muitas técnicas de seleção de cooperantes, dentre elas foram selecionadas para comparação com a técnica proposta: a apresentada por Valle et al. (2016), por Etezadi et al. (2012) com algumas modificações e a técnica proposta por Zarifi et al. (2009). Estas técnicas são utilizadas para reduzir as perdas de mensagens durante a comunicação em uma RSSF. São técnicas simples, entretanto efetivas. O objetivo desta seção é apresentar essas técnicas que servirão como base de comparação com a proposta desta dissertação.

As premissas utilizadas por cada uma das técnicas são as mesmas utilizadas pela técnica Smart, ou seja, para a estrutura e funcionamento da rede considera-se as mesmas características, conforme descrito na seção 4.2. Exceto o fato de que após realizar a transmissão os nodos que não forem cooperantes entram em modo *sleep*, já que não há necessidade de que se mantenham no modo de escuta para determinar sua vizinhança, como na técnica Smart. Esta característica resulta em economia de energia.

4.3.1 Seleção Oportunista

Esta técnica foi proposta por Valle et al. (2016), como já citado na Seção 2.4.1 no item “Oportunista”. Nesta técnica os autores determinam o número de cooperantes de acordo com o histórico de perdas da rede. É realizada uma média exponencialmente ponderada, cujo objetivo é manter uma ponderação entre o histórico das perdas assim como a quantidade de perda atual. A ponderação entre o histórico das perdas e a perda atual é obtida por meio da alteração dos parâmetros α e β . Quanto menor for os valores, maior é o peso dado a perda atual da rede e quanto maior for os valores, maior é o peso dado ao histórico das perdas (VALLE et al., 2016).

O cálculo para obter a quantidade de cooperantes é realizado a cada seleção. O cálculo se faz pelo produto da média exponencialmente ponderada e um ganho. Considera-se a estimativa de perdas (*EstLoss*) e seu desvio padrão (*DevLoss*), como segue:

$$NCoop = \lceil G \times EstLoss + DevLoss \rceil \quad (4.3)$$

onde:

- G é o ganho da função, a qual foi definida por Valle et al. (2016) com o valor $G = 2$.
- $EstLoss$ é a estimativa de mensagens perdidas. Definida como $(1 - \alpha) \times EstLoss + \alpha \times SamLoss$, onde $SamLoss$ é a atual amostra de perdas, ou seja, é a diferença entre o número total de mensagens esperadas e o número de mensagens efetivamente recebida.
- $DevLoss$ é o desvio padrão da estimativa de mensagens perdidas. Definida como $(1 - \beta) \times DevLoss + \beta \times |SamLoss - EstLoss|$.
- α e β são constantes que inserem maior ou menor peso no cálculo da média exponencialmente ponderada. O valor que utilizado por Valle et al. (2016) para ambas foi $\alpha = \beta = 0,2$.

Para a seleção dos nodos que devem cooperar, os autores consideraram o histórico de sucesso nas transmissões juntamente com o LQI que determina a qualidade do *link* entre o nodo e o coordenador:

$$CN_i = \frac{SR_i + LQI_i}{2} \quad (4.4)$$

onde:

- i representa cada nodo na rede, $1 \leq i \leq n$;
- SR é o índice histórico da taxa de sucesso nas transmissões recentes e;
- LQI é o indicador de qualidade do *link* entre o nodo e o coordenador.

Os nodos que obterem os maiores valores para a equação 4.4 serão selecionados como cooperantes, respeitando o número de cooperantes necessário estabelecido pela Equação 4.3.

4.3.2 Seleção Aleatória em Torno do Coordenador

A técnica de seleção aleatória é um método de seleção de cooperantes simples, já conhecida na literatura (ETEZADI et al., 2012). Entretanto, neste trabalho foram feitas algumas adaptações. Como possíveis cooperantes foi considerado apenas os nodos que apresentarem um RSSI superior a -87 dBm com o nodo coordenador, pois, como sugerido por Srinivasan e Levis (2006) este valor indica a existência de uma boa comunicação entre os nodos. A cada seleção, o número máximo de cooperantes (C) que poderá ser selecionado é determinado por meio da Equação 4.5:

$$C = \min(\min(n_{cl}, n_{ncl}), n_{cm}) \quad (4.5)$$

onde:

- n_{cl} é o número do nodos que o coordenador escuta, respeitando o RSSI citado acima;
- n_{ncl} é o número de nodos que o coordenador não escuta e;
- n_{cm} é o número máximo de cooperantes que podem ser selecionados, o limite foi definido como 40, como já citado na Seção 4.2.

O resultado da Equação 4.5 irá determinar o número máximo de cooperantes, o qual será usado como limite superior da função *random()*. O

objetivo de que o menor valor entre n_{cl} e n_{ncl} seja o número máximo de cooperantes é evitar que um número excessivo de cooperantes seja selecionado. Por exemplo, ao considerar uma rede em que quase todos os nodos escutam o coordenador, se todos os nodos que escutam o coordenador fosse o limite, existiria o risco de que esse valor limite se tornasse o número selecionado de cooperantes. Essa escolha seria inadequada, já que, nesse caso, muitos nodos não necessitariam de cooperação. Considerando outro cenário em uma rede que o número de nodos que não escutam o coordenador seja muito alto, se esse valor numérico fosse o limite e se tornasse o número de cooperantes, haveria um risco de que não existir nodos cooperantes suficientes, considerando que, para ser cooperante, é necessário apresentar boa comunicação com o coordenador.

A segunda parte da Equação 4.5 garante que, se as duas variáveis citadas forem maiores que o número máximo de cooperantes definido na Seção 4.2, então que este seja o valor limite para o número máximo de cooperantes. Desta forma, o número de cooperantes é determinado por meio da Equação 4.6, a qual obriga que o número de cooperantes esteja em um intervalo de valores entre 1 e C .

$$numCoop = random[1, C] \quad (4.6)$$

Para determinar quais nodos serão os cooperantes é utilizada a Equação 4.7:

$$coop_i = random[1, numNodos] \quad (4.7)$$

onde, $numNodos$ se refere ao número de nodos da rede. Entretanto, $coop_i$ sempre será um nodo que apresente boa comunicação com o coordenador, onde $i = 1, \dots, numCoop$.

4.3.3 Seleção Completamente Aleatória

Nesta técnica, a seleção foi considerada totalmente aleatória. Diferente da técnica citada acima, esta não considera a qualidade da comunicação com o coordenador.

Para determinar a quantidade de nodos que devem ser cooperantes, foi verificado quantos nodos estão associados na rede. Se o número máximo de cooperantes permitido na rede, determinado na Seção 4.2, for maior que o número de nodos associados, então o número máximo de cooperantes passa a ser o número de nodos associados. Assim é selecionado um valor aleatório entre 1 e o número máximo de cooperantes. Como apresenta a Equação 4.6.

Os cooperantes são selecionados de maneira aleatória similar a apresentada na Equação 4.7 realizando a seleção respeitando o número de cooperantes que deve ser selecionado.

4.3.4 Características das Técnicas de Seleção de Cooperantes

A Tabela 5 apresenta um resumo das características das técnicas de seleção de nodos cooperantes utilizadas na avaliação da técnica proposta. As técnicas foram selecionadas considerando critérios como: selecionar mais de um cooperante; e implementação factível. Além disso, foram consideradas as técnicas que a maioria dos trabalhos na literatura citam em suas avaliações.

Tabela 5 – Características das Técnicas Utilizadas na Avaliação do modelo Proposto.

| Técnica | Parâmetro de Seleção | Características |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oportunista | - Histórico de Perdas; - LQI. | - O número de cooperantes é determinado de acordo com o histórico de perdas; - Maximiza taxa de sucesso; |
| Seleção Aleatória em Torno do Coordenador | - RSSI em relação ao coordenador. | - O número de cooperantes é determinado aleatoriamente; - Maximiza taxa de sucesso; |
| Completamente Aleatória | - Não há critério. | - O número de cooperantes é determinado aleatoriamente; - Maximiza taxa de sucesso; |

Tanto a Seleção Oportunista quanto a Seleção Aleatória são muito citadas na literatura. De acordo com Willig e Uhlemann (2012), selecionar vários cooperantes de maneira aleatória se mostra mais eficiente do que selecionar apenas um cooperante ótimo para a rede toda. Desta forma, foram selecionadas duas técnicas que realizam seleção de cooperante de maneira aleatória, para comparar com a técnica proposta. Uma delas é completamente aleatória, considerando todos os nodos da rede e a outra realiza a seleção aleatória com base em um conjunto de nodos que apresenta uma boa comunicação com o nodo coordenador como já citado nas seções 4.3.2 e 4.3.3.

De acordo com Valle et al. (2016), na seleção oportunista só serão selecionados os cooperantes se existir necessidade e se existir cooperantes que consigam retransmitir com boa probabilidade de sucesso. Por se mostrar uma técnica com características vantajosas, esta foi utilizada para avaliar a técnica Smart.

4.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a proposta de uma nova técnica, denominada Smart, para a seleção de nodos cooperantes em RSSF de acordo com critérios considerados relevantes para o funcionamento adequado da rede. A seleção é realizada utilizando técnicas de otimização, que visa a seleção do menor número de nodos cooperantes, mas, ao mesmo tempo, assegurando que todos os nodos apresentem, pelo menos, um nodo cooperante como vizinho. Dessa forma, essa técnica permite que as mensagens dos nodos que não apresentam uma comunicação adequada com o nodo destino usem mecanismos de cooperação e alcancem seus destinos com sucesso.

5 AVALIAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma avaliação da técnica proposta. Ele inicia com uma contextualização referente aos simuladores utilizados nesta dissertação. Na sequência é apresentada uma descrição dos cenários utilizados para as simulações, e apresenta-se quais foram os indicadores de desempenho utilizados para avaliar a técnica Smart. Por fim, são mostrados e discutidos os resultados obtidos.

Parte dos resultados, apresentados neste capítulo, foi publicado em Laurindo et al. (2017).

5.1 SIMULAÇÕES

A simulação é um método amplamente utilizado pela comunidade científica para a validação de estudos em redes sem fio pois, dentre outras vantagens, permite analisar e testar cenários com mobilidade e maior número de nodos (KHAN et al., 2011). Existem diversos simuladores voltados para a área de RSSF. Na literatura é possível encontrar alguns estudos que realizam comparações entre os simuladores mais utilizados, discutindo algumas características de cada um, os quais são brevemente discutidos a seguir.

O estudo realizado por Khan et al. (2011) apresenta uma comparação entre os simuladores NS-2, OMNeT++, TOSSIM, OPNET, SENSE, GTS-Nets e GloMoSim. Os critérios considerados na comparação foram *interface* gráfica do usuário, acessibilidade, extensibilidade, escalabilidade e disponibilidade de módulos para RSSF. Os autores concluíram que não há um simulador “tudo em um” disponível para RSSF, e que a sua escolha deve ser realizada respeitando os requisitos e a natureza da aplicação projetada.

Korkalainen et al. (2009) realizam um estudo com os simuladores NS-2, OMNeT++/Castalia, Prowler, TOSSIM e OPNET. Os critérios comparados foram: modelagem de tempo real, modelos de energia, suporte a sensor móvel, modelos de rádio, escalabilidade, tipo de licença, dentre outros. Esse trabalho ressaltou o fato que a maioria dos simuladores é desenvolvida com enfoque em alguns modelos específicos, mas que, felizmente, todos os simuladores avaliados permitiam que fossem escritas extensões personalizadas.

Para o desenvolvimento desta dissertação, buscou-se simuladores que apresentassem suporte para o padrão IEEE 802.15.4, e que possuísem uma interface de programação de fácil entendimento e utilização. Nesse sentido, através dos estudos dos autores Khan et al. (2011) e Korkalainen et al. (2009) foi possível construir a Tabela 6, que resume as características dos simula-

res considerados mais relevantes. Para avaliar a técnica de seleção proposta, optou-se por utilizar o simulador OMNeT++/Castalia. Os principais motivos são que este apresenta características que atendem às necessidades da técnica proposta, além de ser um simulador muito utilizado pela comunidade acadêmica, tendo seus modelos de rádio, de propagação do meio, de energia etc, devidamente aceitos e testados em trabalhos científicos.

Tabela 6 – Características dos Simuladores.

| Critério \ Simulador | NS-2 | GloMoSim | OPNET | SENSE | TOSSIM | OMNeT++ | Castalia |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GUI | Limitada | Limitada | Boa | Boa | Boa | Boa | Boa |
| Suporte ao Usuário | Bom | Limitado | Bom | Limitado | Bom | Bom | Bom |
| Disponibilidade de Módulos para RSSF | Modelo de Energia, de Bateria e Mobilidade; | MAC específico para redes de sensores e protocolos de rede e Modelo de mobilidade; | Modelo de Energia, Modelo de Bateria, protocolo de roteamento, modelo de mobilidade e modelo de falhas de nodos; | Modelo de Energia, Modelo de bateria, Mobilidade e modelagem de ambiente físico; | Modelo de Energia e Modelo de rádio nível de bit; | Modelo de Energia, modelo de bateria, canal sem fio preciso e modelo de rádio; | Modelo de canal sem fio, Modelo de Rádio, Modelo de aplicação, Modelo de mobilidade, Modelo de roteamento, MAC específico para redes de sensores e recursos para gerenciamento de energia; |
| Extensibilidade | Excelente | Boa | Excelente | Excelente | Boa | Excelente | Excelente |
| Escalabilidade (número de nodos) | Limitado | Larga Escala | Moderado | Larga Escala | Larga Escala | Larga Escala | Excelente |
| Suporte para o Padrão IEEE 802.15.4 | sim | Não especificado | sim | Não | CSMA Básico | Sim | Sim |
| Licença | GPL | Open Source | Academica, comercial | Open Source | Open Source | Academica, comercial | Open Source |
| Simulação de Rede móvel | sim | sim | sim | sim | não | sim | sim |

O OMNeT++¹ é um framework para simulação de eventos discretos, desenvolvido principalmente para simulação de redes de comunicação. Ele proporciona uma infraestrutura para construção de ambientes de simulação baseada em módulos que são desenvolvidos em C++, o que proporciona uma abordagem modular e orientada a objetos (COMMUNITY, 2011).

O OMNeT++ fornece escalonamento de eventos, mecanismo de passagem de mensagens para seus componentes e uma linguagem para escrever e modelar simulações (NED – *Network Description Language*). Como características que se destacam, esse simulador apresenta uma ótima interface gráfica e permite depurar, facilitando a detecção de possíveis erros durante o desenvolvimento. Existem alguns *frameworks* de simulação de RSSF para o OMNeT++. Neste trabalho de dissertação é utilizado o Castalia que é específico para redes de sensores sem fio (COMMUNITY, 2011).

O Castalia² foi desenvolvido na *National ICT Australia* (NICTA) para

¹ Simulador OMNeT++: <https://omnetpp.org/>

² Framework Castalia: <https://github.com/boulis/Castalia>

simular RSSF. Esse *framework* possui um modelo de canal sem fio detalhado e modelos de rádio baseados em *hardwares* reais para comunicação de baixa potência. Ele também oferece suportes para PANs e BANs em conformidade com IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6, respectivamente, assim como para alguns MACs de rede de sensores sem fio (FEENEY, 2012).

Na implementação do código de otimização que é usado na escolha dos nodos cooperantes, este trabalho utiliza a biblioteca *lp_solve*³, cujo objetivo é resolver problemas de programação Linear Inteira Mista (PLIM). Essa biblioteca oferece um conjunto de rotinas que podem ser invocadas por várias linguagens de programação, inclusive C++ que é utilizada neste trabalho.

5.2 CENÁRIO DE TESTES E CONFIGURAÇÕES DA SIMULAÇÃO

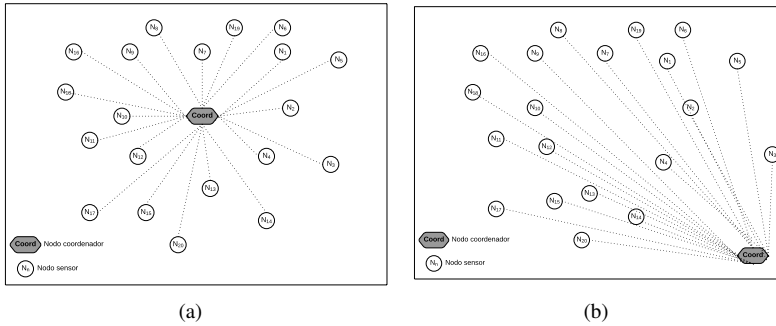
No Castalia, os parâmetros de configuração da rede e da simulação são definidos no arquivo de configuração de parâmetro *omnetpp.ini*. O Apêndice B traz os dados do arquivo *omnetpp.ini* utilizado. A área de monitoramento da rede foi fixada em $50 \times 50 \text{ m}^2$ (parâmetros *field_x* e *field_y*). O parâmetro *numNodes* é obrigatório para o funcionamento da simulação e é utilizado para determinar a quantidade de nodos da rede. Nas simulações foram assumidos cenários com 21, 41, 61, 81 e 101 nodos, sendo que, destes, um nodo sempre cumpre o papel o coordenador.

Para avaliar a técnica Smart, foram realizados dois conjuntos de simulações. No primeiro, o nodo coordenador foi posicionado no centro da área monitorada (Figura 20a) e o restante dos nodos foram distribuídos aleatoriamente em torno deste (parâmetro *SN.deployment* = "[0]->center; [1..100]->uniform"). No segundo conjunto de simulações, o coordenador foi posicionado na borda da área monitorada (Figura 20b) e o restante dos nodos foi distribuído aleatoriamente na área de simulação (parâmetro *SN.deployment* = "[1..100]->uniform" e *SN.node[0].xCoor* = 45; *SN.node[0].yCoor* = 45). A razão desse posicionamento diferenciado para o nodo coordenador foi para verificar como as técnicas de seleção de cooperantes se comportam, devido ao fato que, quando o coordenador não está no centro da rede, ocorre uma assimetria na rede, onde alguns nodos estarão mais próximos do coordenador, não necessitando de técnicas de cooperação, enquanto um maior número de nodos estará mais distante, provocando mais erros de comunicação.

O tempo de simulação utilizado em todas as execuções foi de 450 segundos. Durante esse tempo, o coordenador envia 50 *beacons*, gerando tráfego suficiente na rede para a técnica de cooperação atuar. Por meio de experimentos realizados no simulador, ficou estabelecido que o intervalo entre

³Biblioteca *lp_solve*: <http://lpsolve.sourceforge.net/>

Figura 20 – Cenário com o Coordenador no Centro (a) e Cenário com o Coordenador em um Canto (b).



Fonte: Própria.

cada nova seleção de cooperantes será de 4 *beacons*. Verificou-se que realizar a seleção a cada intervalo de *beacon* era desnecessário, devido ao comportamento estático da rede. No entanto, realizar a seleção em intervalos grandes também não se mostrou eficiente, já que se novos nodos se associarem ou se algum nodo ficar sem bateria, uma nova seleção é necessária, evitando que algum nodo que necessite de cooperação fique sem cooperante.

O modelo de rádio utilizado para todos os nodos foi o do CC2420, que é um rádio compatível com o IEEE 802.15.4 e muito utilizado em nodos comerciais. Os pesos utilizados na função benefício foram: β^v igual a 1.0, β^e igual a 0.5, β^s igual a 1.5 e β^{SR} igual a 1.5. Estes valores foram obtidos por meio de experimentos realizados no simulador, onde foi testado valores em uma faixa variando de 0.5 até 5 para cada um dos parâmetros.

Para determinar o número de repetições que a simulação deve ser executada a fim de obter dados confiáveis, foi utilizada a Equação 5.1, conforme sugerido por Filho (2008). Para utilizar essa equação é necessário realizar um teste preliminar, para obter o valor da média da variável de controle e o desvio padrão.

$$n = \left(\frac{100 \times Z \times S}{r \times \bar{x}} \right)^2 \quad (5.1)$$

onde,

- n é o número de repetições;
- Z é o valor da variável normal padronizada para o nível de confiança desejado. Neste trabalho o nível de confiança utilizado foi de 95%,

sendo o valor de $Z = 1,96$;

- S é o valor do desvio padrão do teste preliminar;
- r é o valor de erro desejado;
- \bar{x} é a média da variável de controle.

Para este trabalho foi obtido $n = 60$, considerando que o valor utilizado para r foi de 5%.

5.3 INDICADORES DE DESEMPENHO

A taxa de sucesso é assumida como o principal indicador de desempenho para avaliar as técnicas de escolha de nodos cooperantes. Além dela, também são assumidas como métricas: o valor médio do número de cooperações por nodo, o percentual de mensagens retransmitidas inutilmente e o consumo energético.

Taxa de Sucesso

A taxa de sucesso é uma métrica que determina a porcentagem de mensagem enviadas que chegam corretamente ao destino.

$$TaxaS\text{ucesso} = \frac{PacotesRecebidos}{PacotesEnviados} \quad (5.2)$$

Média do Número de Cooperações por Nodo

A média do número de cooperações por nodo representa o número médio de vezes que cada nodo realizou a cooperação. Essa métrica associada à taxa de sucesso permite verificar quantas cooperações por nodo foram necessárias para atingir a taxa de sucesso obtida.

Percentual de Retransmissões Inúteis

Quando um nodo cooperante encaminha uma mensagem de retransmissão para o coordenador, é necessário enviar uma lista com os *id's* das mensagens que escutou e os *id's* dos remetentes destas mensagens. Uma mensagem de retransmissão é considerada inútil quando todas as mensagens que estão nesta lista já foram escutadas pelo nodo coordenador. Ou seja, nenhuma das mensagens desta cooperação foi aproveitada pelo nodo coordenador.

Quando o percentual de retransmissões inúteis é alto, é possível notar que alguns cooperantes não estão sendo úteis na rede, ou seja, a seleção dos

cooperantes não foi eficiente.

Consumo Energético

Por ser um parâmetro importante para as RSSF, o consumo energético da rede, como um todo, é mensurado neste trabalho. Contudo, a análise dessa métrica precisa ser feita de forma cuidadosa neste trabalho porque, apesar da técnica Smart levar em consideração a carga das baterias dos nodos nas escolhas dos melhores nodos cooperantes, não houve um refinamento da técnica no sentido de buscar a redução do consumo energético da rede. Como exemplo, conforme explicado na Seção 4.2.2, todos os nodos sensores que não cumprem o papel de cooperantes precisam enviar ao coordenador suas informações de vizinhança e, por isso, precisam ficar ativos durante a transmissão dos outros nodos sensores. Uma melhoria dessa técnica, no sentido de reduzir o consumo energético, seria fazer isso apenas de tempos em tempos, pois dificilmente a rede mudaria sua topologia a cada intervalo de *beacon*. Essa melhoria permitiria com que esses nodos dormissem imediatamente após suas transmissões, reduzindo o consumo energético. Como esse (e outros refinamentos) não foram feitos no código dos nodos sensores, é esperado que o consumo energético da técnica Smart seja elevada.

Um outro motivo para se analisar essa métrica com certo cuidado é o fato que, em nenhuma das técnicas, as mensagens efetivamente estão sendo retransmitidas em nossa implementação no OMNeT++ (apenas os *ids* dos nodos), conforme já citado na Seção 4.2.

5.4 RESULTADOS

Para avaliar a técnica Smart, realizou-se uma comparação com outros três métodos de seleção: seleção oportunista, seleção aleatória em torno do coordenador e seleção completamente aleatória. Esses métodos foram descritos na Seção 4.3. Os critérios analisados foram: taxa de sucesso, percentual de retransmissões inúteis, média do número de cooperações realizadas por nodo e o consumo energético.

Nas figuras 21 e 22 é possível verificar que a utilização de qualquer uma das técnicas de seleção de cooperantes gera uma melhora significativa na taxa de sucesso da rede. A Figura 21 considera o nodo coordenador no centro da rede e a figura 22 considera o nodo coordenador posicionado em um canto da rede. Em ambas as simulações a técnica Smart obteve a maior probabilidade de transmissão bem sucedida seguida pela técnica Oportunista, a qual também obteve um bom desempenho em cenários com um grande número de nós.

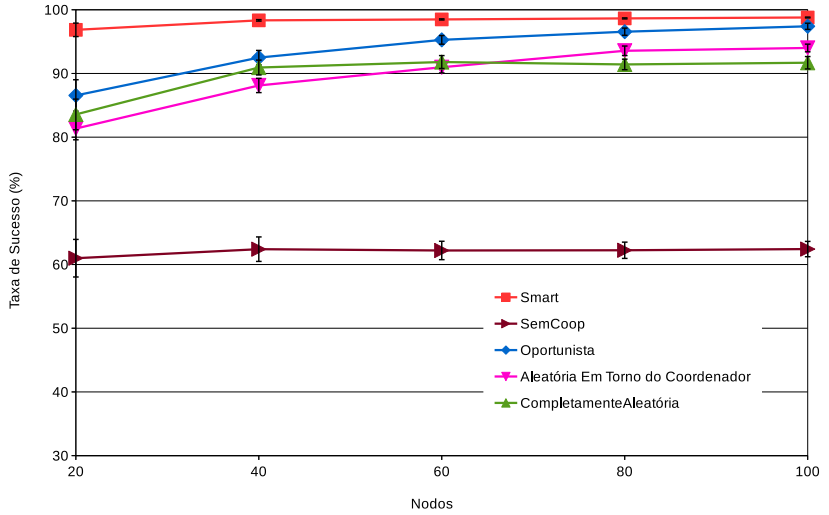


Figura 21 – Taxa de Sucesso - Coordenador no Centro.

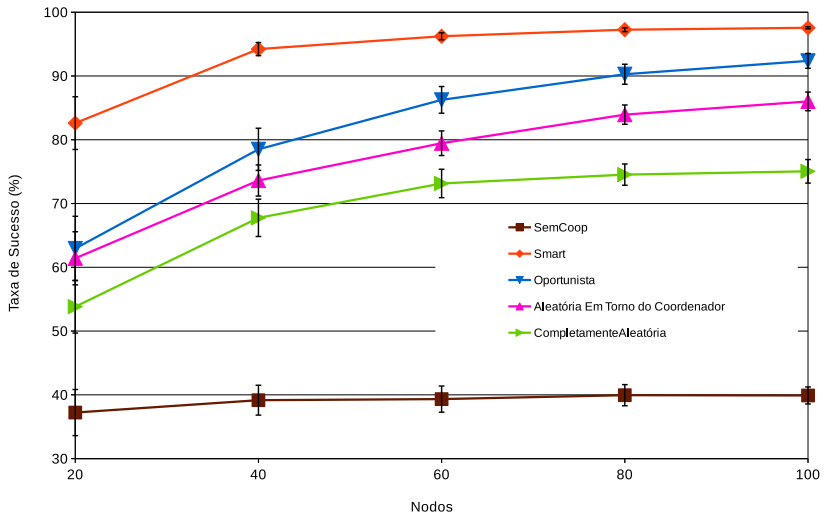


Figura 22 – Taxa de Sucesso - Coordenador no Canto.

As figuras 23 e 24 ilustram o número médio de vezes em que cada nodo cooperou, considerando cenários com 20, 40, 60, 80 e 100 nodos. Como esperado, a técnica Smart tem o menor número de cooperação tanto no cenário em que o coordenador se encontra no centro da rede (Figura 23) quanto no cenário em que o coordenador está no canto (Figura 24). Isso ocorre principalmente porque um número menor de cooperantes é selecionado através da aplicação da técnica de otimização, que visa aumentar o desempenho da rede, mas ao mesmo tempo, selecionar o menor número de cooperantes possível, como mencionado anteriormente na seção 4.2.1.

Já a técnica Oportunista aumenta o número de cooperações por nodo quando a rede apresenta mais nodos, isso é justificável pela natureza da técnica. De acordo com Valle et al. (2016), se a rede estiver com muitas perdas, um número maior de cooperantes será requisitado e com mais nodos disponíveis, uma quantidade maior será selecionada. Entretanto, precisam respeitar os requisitos de seleção da Equação 4.4, fazendo que os nodos com bons resultados sejam selecionados várias vezes. Na seleção aleatória em torno do coordenador, os nodos selecionados necessitam apresentar boa comunicação com o coordenador, desta forma a aleatoriedade passa a ser sobre uma quantidade menor de nodos. Na completamente aleatória, a quantidade de cooperantes não obedece a nenhum critério. Assim, quanto maior a rede menor é a probabilidade de que um mesmo nodo seja selecionado várias vezes para cooperar.

As figuras 25 e 26 apresentam o percentual de retransmissões inúteis. Esta métrica foi obtida calculando a percentagem de mensagens de retransmissões recebidas pelo coordenador que não foram utilizadas. No cenário de simulação com 100 nodos, considerando tanto o cenário em que o coordenador está no centro quanto o cenário em que o coordenador está no canto, a percentagem de mensagens de retransmissões inúteis enviadas por cooperantes que operam de acordo com a técnica Smart é quase zero. Ou seja, nesse cenário, quase todas as mensagens retransmitidas não foram previamente recebidas na tentativa de transmissão. A abordagem Completamente Aleatória obteve a maior porcentagem de mensagens inúteis, considerando os dois conjuntos de simulações realizados. Isso é decorrente do fato que, nessa técnica, não há critérios para a seleção dos nodos cooperantes.

Por fim, as figuras 27 e 28 apresentam a análise da média do consumo energético da rede. Em uma primeira análise é possível observar que, ao utilizar qualquer técnica de cooperação, o consumo energético aumenta. Isso ocorre porque os nodos cooperantes precisarão ficar mais tempo ativos para poderem realizar a retransmissão. Nos dois conjuntos de simulações (coordenador no centro e coordenador no canto), a técnica Smart apresenta o maior consumo de energia, pois os esquemas de comunicação com maior confiabi-

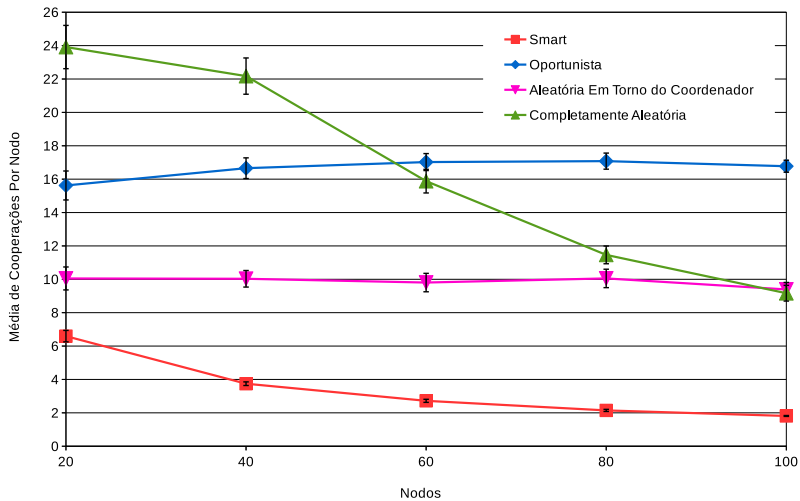


Figura 23 – Média de Cooperações realizadas por nodo - Coordenador no Centro.

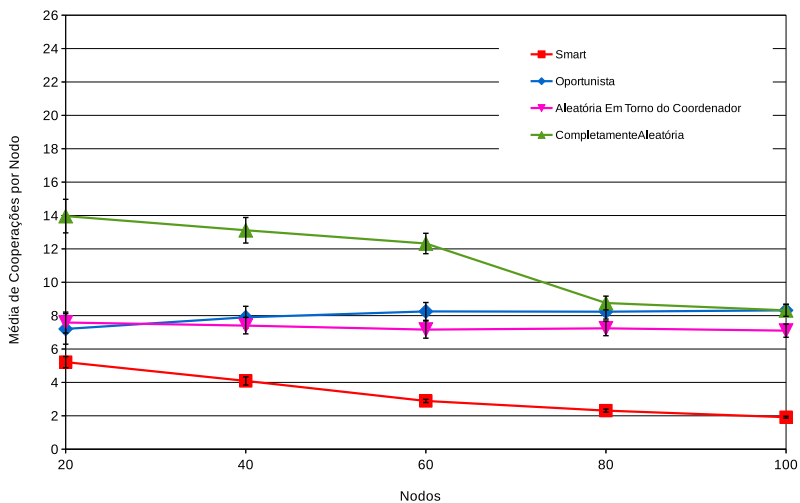


Figura 24 – Média de Cooperações realizadas por nodo - Coordenador no Canto.

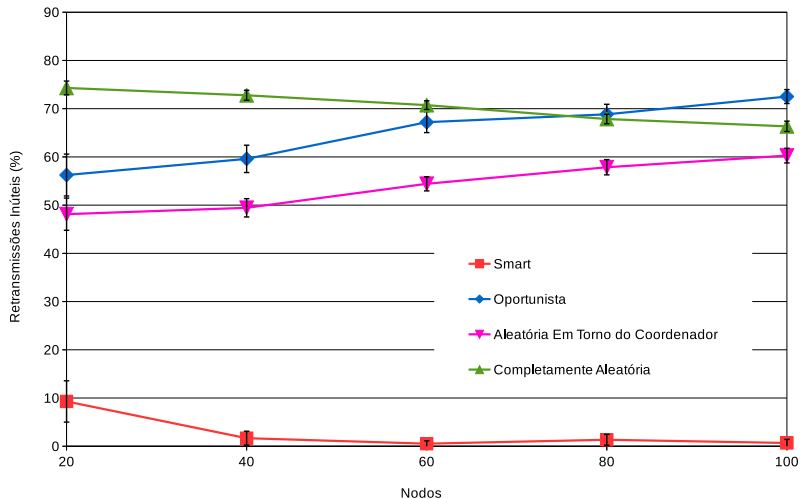


Figura 25 – Percentual de Retransmissões Inúteis - Coordenador no Centro.

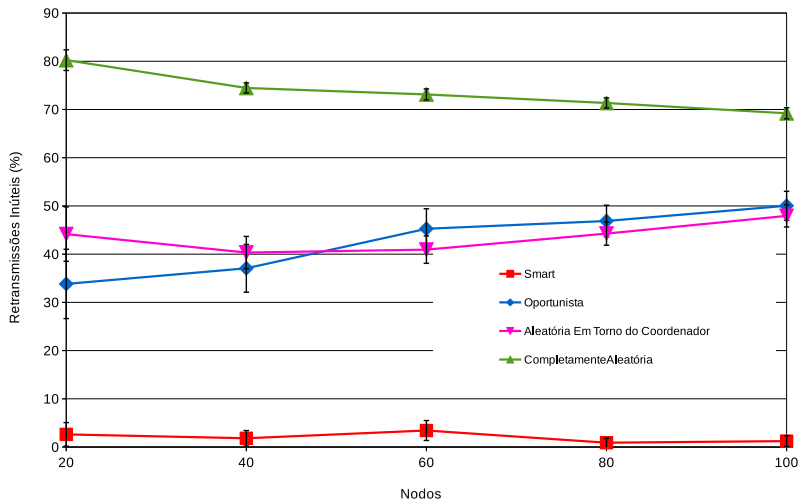


Figura 26 – Percentual de Retransmissões Inúteis - Coordenador no Canto.

lidade possuem níveis de consumo de energia ligeiramente mais elevados, o que também é um resultado esperado. É justificado porque todos os nodos

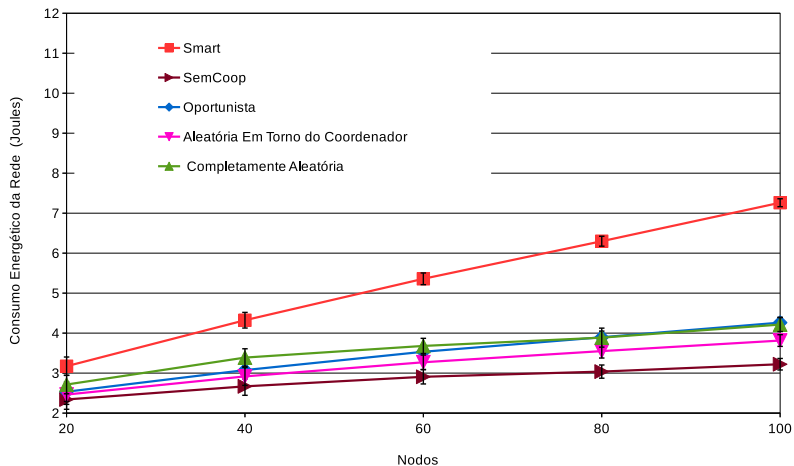


Figura 27 – Média do Consumo Energético da Rede - Coordenador no Centro.

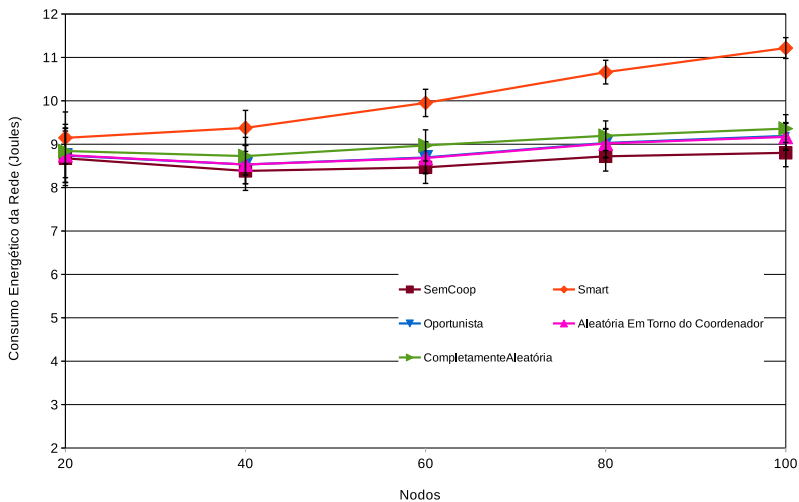


Figura 28 – Média do Consumo Energético da Rede - Coordenador no Canto.

da rede ficam ativos durante todo o período de transmissão, pois necessitam escutar seus vizinhos para enviar essa informação para o coordenador, como

explicado na Seção 4.2.2. O consumo de energia das técnicas Oportunista, seleção Aleatória em Torno do Coordenador e Seleção Completamente Aleatória apresentam resultados semelhantes. No conjunto de simulações em que o coordenador está posicionado no canto da rede o consumo energético já inicia elevado (no cenário com 20 nodos). Isso é justificado pela forma como os nodos estão distribuídos. Como muitos nodos estão distantes do coordenador, alguns não conseguem associar-se a rede, o que faz com que os seus consumos energéticos sejam elevados, pois eles se mantêm ativos todo o tempo tentando efetuar a associação.

Considerando todos os resultados obtidos por estas avaliações, pode-se afirmar que a técnica Smart é a que garante maior confiabilidade às comunicações, com um número médio menor de cooperação por nodo e uma porcentagem muito baixa de mensagens inúteis.

5.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Uma seleção adequada dos nodo cooperantes é um passo importante para melhorar o desempenho das comunicações em RSSF. A técnica de seleção Smart foi comparada e avaliada em relação a outras técnicas. Considerando os resultados obtidos, a técnica Smart supera as outras soluções por meio do aumento da taxa de sucesso e da menor porcentagem de mensagens de retransmissões inúteis. Os seja, com a técnica de seleção proposta, os nodos cooperantes são selecionados de forma eficiente.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são revistas as principais motivações e objetivos deste trabalho, apresentando uma visão geral do que foi implementado e são discutidas as principais conclusões do trabalho de pesquisa proposto nesta dissertação. Por fim, algumas melhorias da proposta atual são sugeridas para trabalhos futuros.

6.1 REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS

A transmissão de dados em RSSF é um tópico que gera muitas pesquisas devido à existência de desafios na confiabilidade, que decorrem da interferência e perda de dados, entre outros aspectos. Como forma de minimizar esses desafios, técnicas de diversidade cooperativa têm sido empregadas e a seleção de nodos cooperantes é um ponto importante quando se trata de maximizar o ganho de diversidade cooperativa em RSSF.

Esta dissertação se inclui neste contexto, fazendo uso dos conceitos da técnica de diversidade cooperativa e propondo uma nova técnica de seleção de nodos cooperantes em RSSF. As contribuições geradas por esta dissertação buscaram responder a pergunta realizada na introdução:

- É possível contribuir com o estado da arte e propor uma nova técnica de seleção de nodos cooperantes, considerando vários critérios representativos do funcionamento da rede, visando melhorar o desempenho de transmissões de dados em RSSF através da diversidade cooperativa?

6.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Este trabalho foi iniciado com um amplo estudo a respeito de técnicas de seleção de nodos cooperantes. Foram apresentados e analisados alguns trabalhos que abordam técnicas de seleção de cooperantes em RSSF. Esses trabalhos foram selecionados através de uma revisão sistemática da literatura.

Um dos resultados dessa análise em nosso trabalho foi a efetivação de uma proposta de taxonomia para a seleção de nodos cooperantes, onde as técnicas de seleção de cooperantes foram divididas em duas abordagens: centralizadas e descentralizadas. Além disso, algumas recomendações foram descritas, as quais permitem auxiliar na decisão de qual abordagem utilizar.

Também baseando-se nos estudos efetuados, foi proposta e desenvolvida uma técnica de seleção de nodos cooperantes: a técnica Smart. Essa

técnica, ao selecionar os nodos cooperantes, leva em consideração múltiplos critérios que são importantes no funcionamento de uma RSSF (carga das baterias, vizinhança, qualidade do sinal-RSSI, taxa de sucesso). Além disso, o problema foi modelado utilizando técnicas de otimização para realizar a seleção do menor número de nodos cooperantes, assegurando que todos os nodos tenham ao menos um vizinho como cooperante, possibilitando uma alta probabilidade de sucesso na entrega de mensagens ao destino.

A técnica Smart foi comparada e avaliada em relação a outras três técnicas (Oportunista, Aleatória em Torno do Coordenador e Completamente Aleatória) por meio de simulações realizadas no OMNeT++. Os resultados obtidos mostraram que a técnica Smart supera as outras soluções por meio do aumento da taxa de sucesso, demonstrando maior probabilidade de transmissão realizadas com sucesso. Além de uma menor percentagem de mensagens de retransmissões inúteis, que em alguns cenários se aproxima a zero, ou seja, os nodos cooperantes são selecionados de forma eficiente.

Desta forma uma técnica de seleção de nodos cooperantes utilizando múltiplas métricas, que representam o estado de funcionamento da rede, é adequada para a seleção de nodos cooperantes em redes baseadas no padrão IEEE 802.15.4 organizadas em topologia estrela.

6.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

A modelagem do problema de seleção de nodos cooperantes na forma de um problema de otimização (PIB - Programação Linear Inteira Binária) é uma das principais contribuições deste trabalho. Essa contribuição ainda não foi submetida para publicações em periódicos científicos. Contudo, duas partes deste trabalho de mestrado resultaram em publicações. Os estudos efetuados através de técnica de revisão sistemática gerou um *survey* sobre o assunto e foi publicado no seguinte evento:

- S. Laurindo, C. Montez, O.T. Valle, R. Moraes, "Um Survey de Seleção de Nodos Cooperantes em Abordagens de Comunicação Cooperativa em Redes de Sensores Sem Fio", WoCCES' 2016, IV Workshop de Comunicação em Sistemas Embarcados Críticos, Maio de 2016.

A implementação da técnica Smart na ferramenta OMNeT++ /Castalia gerou a seguinte publicação:

- S. Laurindo, R. Nassiffe, R. Moraes, C. Montez, G. Araujo, O. Valle, "Smart: Adequate Selection of Relay Nodes to Support Cooperative Communication in WSNs", a ser publicado no WFCS' 2017, 13th IEEE

International Workshop on Factory Communication Systems, Maio de 2017.

6.4 ESCOPO DO TRABALHO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Com relação ao escopo do trabalho, por uma questão de limitação de tempo, algumas ideias não puderam ser implementadas. Diversas melhorias no algoritmo poderiam ser efetuadas para reduzir o consumo energético como, por exemplo: (i) estabelecer um período maior de tempo ou um período que se adapte dinamicamente às condições da rede para que os nodos sensores obtenham informação de suas vizinhanças (atualmente, isso é feito à cada BI); (ii) estabelecer um período de tempo maior para que os nodos obtenham as informações de carga de suas baterias (atualmente isso é feito a cada BI), (iii) efetuar processamentos locais nos nodos, implementando uma seleção de nodos cooperantes descentralizada, reduzindo a quantidade de mensagens na rede.

Outra questão que não foi tratada refere-se a uma melhoria na implementação no funcionamento do simulador. Na implementação atual, a retransmissão de mensagens não faz qualquer agregação, fusão ou implementação técnica de codificação de rede. Na realidade, os dados lidos pelos sensores dos nodos e enviados em suas mensagens não são efetivamente retransmitidos pelos nodos cooperantes na simulação feita. As mensagens retransmitidas contêm apenas os *ids* (identificadores) dos nodos cujas mensagens estão sendo retransmitidas.

Finalmente, como trabalhos futuros, sugere-se a implementação de duas novas abordagens para seleção de nodos cooperantes. As ideias básicas dessas novas abordagens já foram delineadas anteriormente (descentralização e adaptatividade na periodicidade da escolha) e são descritas a seguir:

- **Seleção Descentralizada:** atualmente a seleção dos cooperantes ocorre de forma centralizada, o nodo coordenador é quem realiza a seleção dos melhores cooperantes. Entretanto, cada um dos nodos na rede poderia calcular o seu valor de benefício, que aliado com o conhecimento sobre sua vizinhança permitiria gerar um valor de ganho. Este ganho poderia ser entendido como o valor para um temporizador, na qual o nodo deve esperar até que seu temporizador expire para se candidatar como cooperante. O temporizador do nodo (ou dos nodos) que expirar primeiro o tornaria cooperante.
- **Seleção Adaptativa:** Em vez de realizar a seleção a cada *y* BIs, periodi-

camente, a seleção poderia ser realizada de acordo com a necessidade, de forma adaptativa. Por exemplo, se um nodo origem não receber o ACK, ele solicita cooperantes que escutaram a mensagem e que conseguem comunicação com o destino. Por meio da técnica de otimização utilizada, esse nodo seleciona os cooperantes dentre os que responderam a solicitação.

REFERÊNCIAS

ABDULHADI, S.; JASEEMUDDIN, M.; ANPALAGAN, A. A Survey of Distributed Relay Selection Schemes in Cooperative Wireless Ad hoc Networks. **Wireless Personal Communications**, v. 63, n. 4, p. 917–935, apr 2012. ISSN 0929-6212.

AMARASURIYA, G.; ARDAKANI, M.; TELLAMBURA, C. Output-threshold multiple-relay-selection scheme for cooperative wireless networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 59, n. 6, p. 3091–3097, 2010. ISSN 00189545.

AVELAR, E. A. M. et al. Arquitetura de comunicação para cidades inteligentes: Uma proposta heterogênea, extensível e de baixo custo. In: **XXXII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, Curitiba, Brasil**. [S.l.: s.n.], 2012.

BACCOUR, N. et al. F-LQE: A Fuzzy Link Quality Estimator for Wireless Sensor Networks. In: MARRÓN, P. J.; WHITEHOUSE, K. (Ed.). **Wireless Sensor Networks: 8th European Conference**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 240–255.

BASTOS, E. A. **Otimização De Seções Retangulares De Concreto Armado Submetidas à Flexo-Compressão Oblíqua Utilizando Algoritmos Genéticos**. 168 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

BLETSAS, A. et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 24, n. 3, p. 659–672, 2006. ISSN 07338716.

BOULIS, A. **Castalia: A Simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks user’s manual version 3.2**. [S.l.]: NICTA, 2011. 120 p.

BOYD, S.; VANDENBERGHE, L. **Convex Optimization**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 2004. 487 p. ISSN 10556788. ISBN 9780521833783.

BRANTE, G. et al. Distributed Fuzzy Logic-Based Relay Selection Algorithm for Cooperative Wireless Sensor Networks. **IEEE Sensors Journal**, v. 13, n. 11, p. 4375–4386, 2013.

BURATTI, C. et al. **Sensor Networks with IEEE 802.15.4 Systems**. 1. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. (Signals and Communication Technology). ISBN 978-3-642-17489-6.

CHEN, Y. et al. Power-Aware Cooperative Relay Selection Strategies in Wireless Ad Hoc Networks. **17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications**, p. 1–5, 2006.

COMMUNITY, O. **OMNET++**. 2011. <https://omnetpp.org/>. Online; accessed 11-maio-2017.

ENGEL, F.; ABRÃO, T.; HANZO, L. Relay selection methods for maximizing the lifetime of wireless sensor networks. **IEEE Wireless Communications and Networking Conference**, p. 2357–2362, 2013.

ETEZADI, F. et al. Decentralized Relay Selection Schemes in Uniformly Distributed Wireless Sensor Networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 11, n. 3, p. 938–951, 2012. ISSN 1536-1276.

FEENEY, L. M. Towards trustworthy simulation of wireless mac/phy layers: A comparison framework. In: ACM. **Proceedings of the 15th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems**. [S.l.], 2012. p. 295–304.

FENG, H.; XIAO, Y.; CIMINI, L. J. Spectral Efficiency of Centralized and Decentralized Cooperative Networks with Relay Selection. In: **MILCOM 2013 - 2013 IEEE Military Communications Conference**. [S.l.]: IEEE, 2013. v. 3, n. 5, p. 7–12. ISBN 978-0-7695-5124-1.

FILHO, P. de F. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena**. [S.l.]: Visual Books, 2008. ISBN 9788575022283.

GOKTURK, M. S.; GURBUZ, O. Cooperation with multiple relays in wireless sensor networks: Optimal cooperator selection and power assignment. **Wireless Networks**, v. 20, n. 2, p. 209–225, 2014. ISSN 10220038.

GOMEZ-CUBA, F.; ASOREY-CACHEDA, R.; GONZALEZ-CASTANO, F. A Survey on Cooperative Diversity for Wireless Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 14, n. 5, p. 34–39, sep 2011. ISSN 1553-877X.

HIMANSHU, K.; ASHUTOSH, R.; RUPALI, A. Cooperative Communication: A Review. **IETE Technical Review**, v. 5, p. 1–10, 2015.

HWANG, K.-S.; KO, Y.-C. An Efficient Relay Selection Algorithm for Cooperative Networks. **2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference**, p. 81–85, 2007. ISSN 1090-3038.

IEEE Computer, S. **Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)**. [S.l.: s.n.], 2011. 314 p. ISBN 9780738166834.

IEEE Computer, S. **IEEE Std 802.15.4-2015, IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks**. New York: [s.n.], 2015. 707 p. ISBN 9781504408462.

IKKI, S. S.; AHMED, M. H. Exact Error Probability and Channel Capacity of the Best-Relay Cooperative-Diversity Networks. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 16, n. 12, p. 1051–1054, 2009.

JAMAL, T.; MENDES, P. Relay selection approaches for wireless cooperative networks. In: **6th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications**. [S.l.]: IEEE, 2010. p. 661–668. ISBN 978-1-4244-7743-2.

KHAN, M. Z. et al. Limitations of simulation tools for large-scale wireless sensor networks. In: IEEE. **Advanced Information Networking and Applications (WAINA), 2011 IEEE Workshops of International Conference on**. [S.l.], 2011. p. 820–825.

KHAN, R. A. M.; KARL, H. MAC Protocols for Cooperative Diversity in Wireless LANs and Wireless Sensor Networks. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 16, n. 1, p. 46–63, 2014.

KORKALAINEN, M. et al. Survey of wireless sensor networks simulation tools for demanding applications. In: IEEE. **Networking and Services, 2009. ICNS'09. Fifth International Conference on**. [S.l.], 2009. p. 102–106.

LAURINDO, S. et al. Smart: Adequate selection of relay nodes to support cooperative communication in wsns. In: IEEE. **13th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)**. Trondheim, Noruega, 2017.

LAURINDO, S. M. et al. Um Survey de Seleção de Nós Cooperantes em Abordagens de Comunicação Cooperativa em Redes de Sensores Sem Fio. In: XXXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS (SBRC). **IV Workshop de Comunicação em Sistemas Embarcados Críticos (WOCES)**. Salvador, 2016. p. 12–21.

- LEÃO, E. et al. Superframe duration allocation schemes to improve the throughput of cluster-tree wireless sensor networks. **Sensors**, v. 17, n. 2, 2017. ISSN 1424-8220.
- LI, Y. et al. On the Design of Relay Selection Strategies in Regenerative Cooperative Networks with Outdated CSI. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 10, n. 9, p. 3086–3097, 2011.
- LIANG, X.; BALASINGHAM, I.; LEUNG, V. C. M. Cooperative Communications with Relay Selection for QoS Provisioning in Wireless Sensor Networks. In: **GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference**. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1–8. ISBN 978-1-4244-4148-8. ISSN 1930-529X.
- LIU, L. et al. Relay Selection for Three-Stage Relaying Scheme in Clustered Wireless Networks. **IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY**, v. 64, n. 6, p. 2398–2408, 2015.
- LOUREIRO, A. A. et al. Redes de Sensores Sem Fio. **XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores**, p. 179–226, 2003.
- LUO, J. et al. Link-Failure Probabilities for Practical Cooperative Relay Networks. In: **2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference**. [S.l.]: IEEE, 2005. v. 3, p. 1489–1493. ISBN 0-7803-8887-9.
- LUO, J. et al. Opportunistic routing algorithm for relay node selection in wireless sensor networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 11, n. 1, p. 112–121, 2015. ISSN 1551-3203.
- MARCHENKO, N. et al. An Experimental Study of Selective Cooperative Relaying in Industrial Wireless Sensor Networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 3, p. 1806–1816, 2014.
- MELO, P. O. S. V. et al. O Problema da Cooperação entre Redes de Sensores Sem Fio. In: **XXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 791–804.
- NASSIFFE, R. M. **Aborgadens Para Reconfiguração De Sistemas De Tempo Real Com QoS E Restrições De Energia E Temperatura**. 119 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- NETO, F. T. **Técnica de otimização de energia para rssf**. 145 p. Tese (Doutorado) — PUC- Pontifícia Universidade Católica do rio Grande do Sul, 2015.

RABER, A. et al. Aplicação de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) na Agricultura. In: **Encontro Anual de Tecnologia da Informação e Semana Acadêmica de Tecnologia da Informação**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 261 – 265.

SEMPREBOM, T. et al. Quality of Service Provision Assessment for DDBP Approach in IEEE 802.15.4 Networks. In: **12th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 118–123.

SOUSA, M. P. **Diversidade Cooperativa Adaptativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio**. 103 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

SRINIVASAN, K.; LEVIS, P. Rssi is under appreciated. In: **In Proceedings of the Third Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets)**. [S.l.]: Cambridge, MA, USA, 2006. p. 239–242.

SUN, L. et al. Cooperative communications with relay selection in wireless sensor networks. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 55, n. 2, p. 513–517, 2009. ISSN 00983063.

VALLE, O. T. **Codificação de Rede na Retransmissão Oportunista De Mensagens Em Redes de Sensores Sem Fio**. 201 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

VALLE, O. T. et al. NetCoDer: A Retransmission Mechanism for WSNs Based on Cooperative Relays and Network Coding. **Sensors**, v. 16, n. 6, 2016.

WANG, B.; HAN, Z.; LIU, K. J. R. Distributed Relay Selection and Power Control for Multiuser Cooperative Communication Networks Using Stackelberg Game. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 8, n. 7, p. 975–990, 2009.

WANG, C.-L.; SYUE, S.-J. An Efficient Relay Selection Protocol for Cooperative Wireless Sensor Networks. In: **IEEE Wireless Communications and Networking Conference**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5. ISBN 978-1-4244-2947-9.

WANG, H. et al. Single Relay Selection With Feedback and Power Allocation in Multisource Multidestination Cooperative Networks. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 17, n. 12, p. 997–1000, 2010.

WEI, Y.; YU, F. R.; SONG, M. Distributed Optimal Relay Selection in Wireless Cooperative Networks With Finite-State Markov Channels. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 59, n. 5, p. 2149–2158, 2010.

WEISER, M. The computer for the 21st century. **ACM SIGMOBILE: Mobile Computing and Communications Review**, ACM New York, NY, USA, v. 3, n. 3, p. 3–11, 1999.

WILLIG, A.; UHLEMANN, E. On relaying for wireless industrial communications: Is careful placement of relayers strictly necessary? In: **IEEE. 9th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)**. [S.l.], 2012. p. 191–200.

WOLSEY, L. A. **Integer programming**. 1. ed. New York: Wiley, 1998. ISBN 0471283665.

YANG, C.-q. et al. Lifetime maximization of cooperative networks with mean channel gain information. **Journal of China Universities of Posts and Telecommunications**, v. 16, p. 98–103, 2009.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. **Computer Networks**, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008. ISSN 13891286.

ZARIFI, K. et al. Relay Selection Schemes for Uniformly Distributed Wireless Sensor Networks. In: **2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference**. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1–6. ISBN 978-1-4244-2947-9. ISSN 1525-3511.

**APÊNDICE A – PROTOCOLO DE BUSCA E RESULTADOS DA
REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

Este protocolo de busca irá embasar a revisão sistemática da literatura.

A.1 OBJETIVO

Selecionar trabalhos relevantes em RSSF que utilizam técnicas de seleção de nodos cooperantes. Objetivando propor uma nova técnica melhorando o desempenho das transmissões.

A.2 QUESTÃO PRINCIPAL

Quais técnicas são utilizadas para realizar a seleção de nodos cooperantes em RSSF que utilizam diversidade cooperativa?

A.2.1 Questões Secundárias

- Quais técnicas apresentam abordagem centralizada?
- Quais técnicas apresentam abordagem descentralizada?

População: RSSF que utilizam diversidade cooperativa;

Intervenção: proposta de uma nova técnica;

Controle: Analisar as técnicas de seleção de nodos cooperantes em RSSF;

Resultados: Melhorar o desempenho das transmissões de mensagens.

A.3 CRITÉRIOS DE BUSCA E BASES DE DADOS UTILIZADAS

Para a realização das buscas nas bases de dados será utilizada a String de busca a seguir:

Relay and Selection and Cooperative and “wireless sensor network ”

A.3.1 Bases de Dados utilizadas

- Scopus: <http://www.scopus.com/>;
- IEEE: <http://ieeexplore.ieee.org/search/advsearch.jsp>;
- Engineering Village: <https://www.engineeringvillage.com/search/>

quick.url?database=1;

- Wiley Online Library: <http://onlinelibrary.wiley.com/advanced/search>;
- ACM: <http://dl.acm.org/advsearch.cfm?coll=DL&dl=ACM&CFID=597399561&CFTOKEN=54152624>;
- Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/search>;
- Google Acadêmico: <https://scholar.google.com.br/>.

A.4 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO INICIAL

Os trabalhos serão filtrados a partir dos seguintes critérios:

A.4.1 Critérios de inclusão (I):

- Ano superior a 2003 (I);
- Apresentar as palavras da *String* de busca no título ou no *abstract* (I);
- Publicações escritas em inglês, espanhol ou em português (I);
- Ser de um *journal* ou *magazine* (I);
- Estar disponível abertamente na web (I).

A.4.2 Critérios de exclusão (E):

- Trabalhos com títulos e *abstract* conflitantes, ou seja, se o título trata de um assunto e o *abstract* de outro (E);
- Ano inferior a 2003 (E);
- Não apresentar as palavras da *String* de busca no título ou no *abstract* (E);
- Estar escrito em um idioma diferente de inglês, espanhol ou português (E);
- Não estar disponível abertamente na web (E).

A.5 SELEÇÃO INICIAL DOS ESTUDOS:

Nesta etapa será realizada a primeira seleção dos trabalhos, o critério de seleção é o seguinte:

- baseado na leitura do *abstract* e do título, aplicando os critérios de inclusão e exclusão.
- Para um melhor gerenciamento dos documentos encontrados, será utilizado o software StArt (*State of the Art through Systematic Review*). Este permite importar arquivos BibTeX dos trabalhos encontrados e aplicar na seleção inicial dos estudos. De acordo com o número de vezes que as palavras da *String* de busca aparecem no título, no *abstract* ou nas palavras chave do trabalho, será atribuído um peso ao trabalho e gerará um score. E assim pode-se iniciar a leitura dos *abstracts* e aplicar a primeira etapa.
- Na segunda etapa (Extração dos dados) será realizada a leitura completa dos artigos.

A.6 AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DOS ESTUDOS

Os estudos serão avaliados em sua qualidade abordando os seguintes aspectos:

- **Objetivo:** O objetivo do trabalho deve ser no sentido de aplicar técnicas de seleção de nodos cooperantes, visando alguma melhoria na rede.
- **Condução:** O trabalho deve estar bem referenciado, apresentar uma etapa experimental, com validação das hipóteses. As métricas utilizadas para verificar o desempenho do experimento devem estar explicitadas no trabalho.

A.7 EXTRAÇÃO DE DADOS

Nesta etapa será realizada a extração de alguns dados do artigo. A leitura será iniciada pelos mais relevantes, como critério de relevância será utilizado a classificação realizada na primeira etapa. Esta foi feita de acordo com o conteúdo apresentado nos *abstracts* dos artigos. A classificação é realizada com os termos “*very high, high, low, very low*”. Desta forma a leitura será iniciada pelos artigos com classificação mais alta.

Os dados a serem extraídos de cada trabalho são:

- Nome dos autores;
- Título do trabalho;
- Ano de publicação;
- Tipo do Artigo: teórico, experimental ou ambos;
- Problema abordado;
- Técnica utilizada;
- Abordagem da técnica utilizada: centralizada ou descentralizada;
- Métricas de avaliação;
- Comparado com quais técnicas? e
- Resultados Obtidos.

A.8 BUSCA

Realizando a busca com a seguinte *String*: Relay and Selection and Cooperative and “wireless sensor network”, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 7.

OBS: Estes dados ainda são brutos, não foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão. Entretanto, nas bases que permitiam buscas avançadas, já foi filtrado por ano de publicação superior a 2003.

Após aplicar a etapa de seleção, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Dados obtidos na busca.

| Bases Utilizadas | Nº de documentos | Restrição da Busca |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Scopus | 116 | Título, Abstract e Keywords, artigos, ano de publicação >2003 |
| IEEE | 8 | Título, Abstract e Keywords, Journals & Magazines, ano de publicação >2003 |
| Engineering Village | 23 | Título, Abstract e Keywords, Journal article, ano de publicação >2003 |
| Wiley | 3 | Abstract, ano de publicação >2003 |
| ACM | 38 | Abstract, ano de publicação >2003, The ACM Guide To Computing Literature |
| Science Direct | 3 | Título, Abstract e Keywords, ano de publicação >2003, Artigos |
| Google Acadêmico | 1 | Título, ano de publicação >2003 |

Tabela 8 – Dados obtidos com a seleção.

| Bases Utilizadas | Nº de documentos Selecionado na 1º etapa | Nº de documentos Selecionado na 2º etapa |
|----------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Scopus | 52 | 10 |
| IEEE | 5 | 1 |
| Engineering Village | 1 | 0 |
| Wiley | 0 | 0 |
| ACM | 1 | 0 |
| Science Direct | 1 | 0 |
| Google Acadêmico | 0 | 0 |

**APÊNDICE B - PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DAS
SIMULAÇÕES - OMNeT++ E CASTALIA**

Neste apêndice é apresentada a configuração utilizada no simulador para avaliar a técnica apresentada.

O arquivo `omnetpp.ini`, é onde se encontram os principais parâmetros utilizados nas simulações. Nas figuras apresentadas abaixo estão detalhadas as configurações que foram utilizadas na avaliação da técnica proposta nesta dissertação.

Figura 29 – Arquivo `omnetpp.ini` - Configurações generalizadas.

```

2 [General]
3
4 # =====
5 # Parâmetros de inicialização Castalia.ini
6 # =====
7 include ../Parameters/Castalia.ini
8
9
10 # =====
11 #                               Tempo de Simulação
12 # =====
13 sim-time-limit = 450s
14
15 # =====
16 #                               Área de Simulação
17 # =====
18 SN.field_x = 50 # meters
19 SN.field_y = 50 # meters
20
21 # =====
22 #                               Número de Nodos
23 # =====
24 SN.numNodes = 101
25

```

Fonte: Adaptado Boulis (2011).

A Figura 29 apresenta o início do arquivo `omnetpp.ini` onde está descrito alguns parâmetros gerais. Abaixo segue o significado dos parâmetros:

- `include ../Parameters/Castalia.ini`: Inicializa parâmetros do Castalia. Esta linha deve estar em todas as simulações;
- `sim-time-limit = 450s`: Define o tempo de duração da simulação;
- `SN.field_x = 50` e `SN.field_y = 50`: Define a área de simulação em metros;
- `SN.numNodes = 101`: Define a quantidade de nodos que estarão na simulação;

A Figura 30 apresenta os parâmetros utilizados para os módulos de *radio*, *application*, *resourceManager* e para o arquivo de variação temporal. Abaixo segue uma explicação dos parâmetros:

- `SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"`: Este arquivo contém informações referentes

Figura 30 – Arquivo omnetpp.ini - Configurações Módulos.

```

34 #=====
35 #                               Parâmetros do Rádio
36 #=====
37 SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"
38 SN.node[*].Communication.Radio.symbolsForRSSI = 16
39 SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"
40
41 #=====
42 #                               Parâmetros da Aplicação
43 #=====
44 SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
45 SN.node[*].Application.startupDelay = 1
46
47 #=====
48 #                               Parâmetros do Módulo ResourceManager
49 #=====
50 SN.node[*].ResourceManager.initialEnergy = 18720
51 SN.node[*].ResourceManager.sigmaCPUTclockDrift = 0
52 SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0
53
54 #=====
55 #                               Modelo de Interferência
56 #=====
57 SN.wirelessChannel.temporalModelParametersFile = ""
58

```

Fonte: Adaptado Boulis (2011).

ao rádio. Para as simulações foi utilizado o arquivo que se refere ao rádio CC2420. O * em "SN.node[*]" sinaliza que este parâmetro é para todos os nodos da rede;

- *SN.node[*].Communication.Radio.symbolsForRSSI = 16*: Especifica a quantidade de símbolos que é necessária para o rádio realizar o cálculo de RSSI;
- *SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"*: Especifica a potência em que o radio entrega os pacotes;
- *SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"*: Este parâmetro especifica que o módulo de aplicação que está sendo utilizado é o ThroughputTest. Neste módulo todos os nodos enviarão os seus pacotes de dados para o nodo coordenador;
- *SN.node[*].Application.startupDelay = 1*: Especifica o tempo de 1 segundo para iniciar o envio de pacotes. É necessário pelo menos 1 segundo para que o Castalia inicialize todos os módulos;
- *SN.node[*].ResourceManager.initialEnergy = 18720*: Especifica a carga inicial das baterias dos sensores. O valor especificado representa duas pilhas AA.
- *SN.node[*].ResourceManager.sigmaCPUTclockDrift = 0*: Este parâmetro especifica a deriva do *clock* do nodo. O valor especificado significa que não será utilizado deriva de *clock*;

- *SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0*: Especifica o consumo de potência do nodo. O valor utilizado faz com que o consumo medido seja apenas da transmissão;
- *SN.wirelessChannel.temporalModelParametersFile = :* Especifica que não há um arquivo que define a variação temporal no canal wireless.

Figura 31 – Arquivo omnetpp.ini - Configurações Módulo MAC.

```

62 #=====
63 #                               Parâmetros MAC
64 #=====
65 SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "StaticGTS802154"
66 SN.node[0].Communication.MAC.isFFD = true
67 SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true
68 SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
69 SN.node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 4
70 SN.node[*].Communication.MAC.numSuperframeSlots = 145
71
72 SN.node[*].Communication.MAC.requestGTS = 1
73 SN.node[*].Communication.MAC.gtsOnly = true
74 SN.node[*].Communication.MAC.macMaxFrameRetries = 1
75

```

Fonte: Adaptado Boulis (2011).

A Figura 31 apresenta os parâmetros utilizados para configurar o módulo MAC. Abaixo segue uma explicação dos parâmetros:

- *SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "StaticGTS802154"*: Este parâmetro especifica o nome do protocolo que o MAC utiliza. Neste caso foi utilizado o IEEE802.15.4 utilizando GTS;
- *SN.node[0].Communication.MAC.isFFD = true*: Especifica que o nodo[0] foi configurado para ter todos os recursos do protocolo IEEE802.15.4, é um dispositivo de função completa;
- *SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true*: Especifica que o nodo[0] foi configurado como coordenador da rede;
- *SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250*: Especifica que a taxa de troca de dados utilizada pelos nodos na rede é 250kbps;
- *SN.node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 4*: Especifica que todos os nodos da rede foram configurados com 4 bit por símbolos. A configuração deste parâmetro deve ser sempre de acordo com *phyDataRate* para determinar o tempo correto de funcionamento no MAC;
- *SN.node[*].Communication.MAC.numSuperframeSlots = 145*: Especifica o número de *slots* que será utilizado;

- *SN.node[*].Communication.MAC.requestGTS = 1*: Especifica que cada nodo da rede irá solicitar 1 *slot* GTS para realizar suas transmissões;
- *SN.node[*].Communication.MAC.gtsOnly = true*: Especifica que a transmissão de dados ocorrerá apenas por GTS;
- *SN.node[*].Communication.MAC.macMaxFrameRetries = 1*: Especifica o número máximo de tentativas antes do pacote ser considerado como perdido.

Figura 32 – Arquivo omnetpp.ini - Configurações Para a Seleção de Cooperantes.

```

76 #=====
77 #                               Parâmetros da Seleção De Cooperantes
78 #=====
79 SN.node[*].Communication.MAC.selecao = 4
80 SN.node[*].Communication.MAC.userelay = true
81 SN.node[*].Communication.MAC.smart = true
82 SN.node[*].Communication.MAC.aleatoria = false
83 SN.node[*].Communication.MAC.oportunista = false
84 SN.node[*].Communication.MAC.completamenteAleatoria = false
85
86 #Parâmetros da seleção de cooperantes Smart#
87 SN.node[*].Communication.MAC.betaV = 1.0 #Vizinhos
88 SN.node[*].Communication.MAC.betaE = 0.5 #Energia
89 SN.node[*].Communication.MAC.betaS = 1.5 #RSSI
90 SN.node[*].Communication.MAC.betaSR = 1.5 #Historico de Taxa de Sucesso
91
92 #=====
93 #                               Parâmetros ds Topologia da Rede
94 #=====
95
96 SN.deployment = "[0]->center; [1..100]->uniform"

```

Fonte: Adaptado Boulis (2011).

A Figura 32 apresenta os parâmetros utilizados para a seleção de cooperantes e disposição dos nodos na área de simulação. Para a seleção de cooperantes foi comparada a técnica proposta com outras 3 técnicas, cada uma pode ser habilitada ou desabilitada pelo arquivo omnetpp.ini. Para a técnica proposta nesta dissertação, foram definidos alguns pesos que indicam a importância dos parâmetros utilizados na função benefício, esses pesos são beta1, beta2, beta3 e beta4. Abaixo segue uma explicação dos parâmetros:

- *SN.node[*].Communication.MAC.selecao = 4*: Especifica que a cada 4 *beacons* uma nova seleção de cooperantes é realizada;
- *SN.node[*].Communication.MAC.userelay = true*: Especifica se irá utilizar seleção de cooperantes ou não. Neste caso irá;
- *SN.node[*].Communication.MAC.smart = true*: Especifica se a técnica de seleção Smart será utilizada ou não;

- *SN.node[*].Communication.MAC.aleatoria = false*: Especifica se a técnica de seleção Aleatória será utilizada ou não;
- *SN.node[*].Communication.MAC.oportunista = false*: Especifica se a técnica de seleção Oportunista será utilizada ou não;
- *SN.node[*].Communication.MAC.completamenteAleatoria = false*: Especifica se a técnica de seleção CompletamenteAleatória será utilizada ou não;
- *SN.node[*].Communication.MAC.beta1 = 0.5*: Especifica o peso utilizado para o parâmetro energia;
- *SN.node[*].Communication.MAC.beta2 = 1.5*: Especifica o peso utilizado para o parâmetro RSSI;
- *SN.node[*].Communication.MAC.beta3 = 1.0*: Especifica o peso utilizado para o parâmetro número de vizinhos;
- *SN.node[*].Communication.MAC.beta4 = 1.5*: Especifica o peso utilizado para o parâmetro histórico de sucesso;
- *SN.deployment = "[0]->center; [1..100]->uniform"*: Especifica que os nodos serão inseridos na área de simulação utilizando uma distribuição aleatória uniforme, com o coordenador no centro.