UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

BRUNO ROGÉRIO SIMÕES DOS SANTOS

RSOTP - UM PROTOCOLO TDMA BASEADO EM COLORAÇÃO DE GRAFOS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE REDES DE SENSORES SEM FIO

FORTALEZA – CEARÁ

2016

BRUNO ROGÉRIO SIMÕES DOS SANTOS

RSOTP - UM PROTOCOLO TDMA BASEADO EM COLORAÇÃO DE GRAFOS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE REDES DE SENSORES SEM FIO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Ciência da Computação

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Sampaio Rocha

Co-Orientador: Prof. Dr. Joaquim Celestino Júnior

FORTALEZA – CEARÁ

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Estadual do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Santos, Bruno Rogério Simões dos.
RSOTP - um protocolo tdma baseado em coloração de grafos para melhoria da eficiência de redes de sensores sem fio [recurso eletrônico] / Bruno Rogério Simões dos Santos. - 2016.
1 CD-ROM: il.; 4 ¾ pol.

CD-ROM contendo o arquivo no formato PDF do trabalho acadêmico com 80 folhas, acondicionado em caixa de DVD Slim (19 x 14 cm x 7 mm).

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia, Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação, Fortaleza, 2016.
Área de concentração: Algoritmos e Redes de Sensores.
Orientação: Prof. Dr. Leonardo Sampaio Rocha.
Coorientação: Prof. Ph.D. Joaquim Celestino Júnior.

1. Redes de Sensores. 2. Protocolo TDMA. 3. Intervalos de Tempo. 4. Escalonamento. 5. Coloração de Grafos. I. Título.

ATA DA NONAGÉSIMA SEGUNDA DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ao vigésimo nono dia de dois mil e dezesseis, no miniauditório do prédio de Pesquisa e Pós-Graduação em Computação, do Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação – MACC, realizou-se a sessão pública de defesa de dissertação de **Bruno Rogério Simões dos Santos,** aluno regularmente matriculado no Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação–MACC, intitulada: **"RSOTP – Um protocolo TDMA baseado em coloração de Grafos para melhoria da eficiência de redes de sensores sem fio"** ". A Banca Examinadora reuniu-se no horário das 14:00h às 16:30 horas, sendo constituída pelos Professores Doutores Leonardo Sampaio Rocha **(Orientador/UECE); Joaquim Celestino Júnior (UECE); Marcial Porto Fernandez (UECE) e Danielo Gonçalves Gomes (UFC).** Inicialmente o mestrando expôs seu trabalho e a seguir foi submetido à arguição pelos membros da Banca, dispondo cada membro de tempo para tal. Finalmente a Banca reuniu-se em separado e concluiu por considerar o mestrando APROVADO, por sua dissertação e sua defesa pública. Eu, **Professor Dr. Leonardo Sampaio Rocha,** Orientador e Presidente da Banca, lavrei a presente Ata que será assinada por mim e demais membros da Banca. Fortaleza, 29 de novembro de 2016.

Prof. Dr. Leonardo Sampaio Rocha (Orientador – UECE)

Prof. Dr. Joaquim Celestino Júnior (UECE)

Prof. Dr. Marcial Porto Fernandez (UECE)

Prof. Dr. Danielo Gonçalves Gomes (UFC)

À minha amada noiva por todo seu carinho e apoio constante para que eu conseguisse me manter firme nos estudos, sem desistir de lograr com êxito o diploma de mestre. Sua capacidade de acreditar em mim e nos planos que traçamos juntos foi o que me deu a esperança para seguir.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário e mestrando, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e preocupação em todos os momentos. Pelo dom da vida, sem eles este momento não estaria acontecendo. Agradeço profundamente por todos os momentos que tiveram paciência comigo e acreditaram na minha capacidade, pelo investimento que fizeram em mim para que eu pudesse alcançar meus sonhos.

À minha amada noiva Ivanilda, pelo carinho, atenção e o apoio incondicional, mesmo nos momentos mais difíceis que passei nos estudos e nas implementações dos algoritmos ao longo desses dois anos de mestrado. Que me manteve firme e atento a perseguir com esforço o êxito em terminar a pós-graduação. Obrigado por tudo, amor.

Ao meu colega de mestrado Henrique que me ajudou bastante no aprendizado em relação aos simuladores que utilizei para validar a proposta e tirando dúvidas relacionadas às implementações. Também agradeço ao Renan, bolsista de iniciação científica do meu orientador, que também me ajudou nas implementações e na elaboração dos resultados.

Aos professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional. Em especial ao meu orientador e professor Leonardo que me ensinou muito desde antes começar as aulas do mestrado, um homem sério e prestativo, que sempre me ajudou com grande satisfação e com toda paciência do mundo. Devo também a ele por ter conseguido chegar até aqui. Também expresso todo o meu agradecimento ao meu co-orientador e professor Celestino que chamou a minha atenção quando era preciso e que graças a sua disciplina de Tópicos em Redes esforcei-me bastante para ler mais artigos, além de ter me ajudado com ideias para os trabalhos neste dois anos de mestrado.

A palavra mestre, nunca fará justiça a todos estes professores dedicados ao dom de ensinar. Todos terão os meus eternos agradecimentos.

"É melhor lançar-se à luta em busca do triunfo mesmo expondo-se ao insucesso, que formar fila com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito; E vivem nessa penumbra cinzenta sem conhecer nem vitoria nem derrota."

(Franklin Roosevelt)

RESUMO

Este trabalho de dissertação tem como finalidade apresentar um protocolo TDMA baseado em coloração de grafos para redes de sensores, o RSOTP. O protocolo RSOTP foi desenvolvido com a finalidade de oferecer escabilidade e eficiência na coleta de dados captados pela estação base a partir dos sensores da rede. Em um meio compartilhado, as transmissões dos nós sensores estão sujeitas a muitas interferências e colisões, sendo preciso coordenar estas transmissões de modo que a informação chegue íntegra na estação base. Para isto é que foram criados os protocolos de controle de acesso ao meio. Estes protocolos podem-se utilizar de técnicas, como por exemplo, o TDMA, FDMA ou CDMA para coordenar as transmissões dos nós sensores presentes na rede através da divisão por tempo, frequência ou código, respectivamente. Dentre estas técnicas citadas, o acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) foi escolhido para as implementações deste trabalho a fim de alocar intervalos de transmissão para cada sensor, tornando possível que a estação base faça um escalonamento da rede através dos intervalos de tempo dedicados aos sensores. Por meio da geração de um grafo de conflitos, criado a partir da vizinhança de cada sensor, é possível fazer com que a estação base decida como reaproveitar um intervalo de transmissão para um determinado sensor, sem que o mesmo cause interferência e conflito de transmissão a outro sensor que utilize este mesmo intervalo. A partir da modelagem do problema de reutilização de intervalos de tempo como um problema de coloração no grafo de conflitos gerado a partir das informações dos sensores, é possível realizar o reuso dos intervalos. Além da ideia da reutilização dos intervalos de tempo, são implementadas ao protocolo RSOTP outras melhorias não relacionadas ao escalonamento dos intervalos de transmissão. Estas melhorias tem o intuito de fornecerem estabilidade entre as transmissões dos nós e aumentar o tempo de vida da rede. A partir dos resultados obtidos é visto que no protocolo RSOTP a taxa de reutilização de intervalos de transmissão cresce à medida que se aumenta o número de nós presentes na rede, apresentando um maior reaproveitamento de intervalos em cenários mais densos. O RSOTP também apresenta uma eficiência superior a 30% em relação à quantidade de dados recebidos pela estação base quando comparado aos protocolos que não fazem reuso dos intervalos de tempo.

Palavras-chave: Redes de Sensores. Protocolo TDMA. Intervalos de Tempo. Escalonamento. Coloração de Grafos.

ABSTRACT

This dissertation aims to present a TDMA protocol based on graph coloring for sensor networks, the RSOTP. The RSOTP protocol was created with the purpose of offering scalability and efficiency in data collection captured by the base station from the network sensors. In a shared environment, the sensor transmission are subject to many interferences and collisions, being necessary to coordinate these transmissions so that the information arrives integrally in the base station. For this, the medium access control protocols were created. These protocols can be used by techniques such as TDMA, FDMA or CDMA to coordinate the transmissions of sensor nodes present in the network through division by time, frequency or code, respectively. Among these techniques, time division multiple access (TDMA) was chosen for implementations of this work in order to guarantee time slots for each sensor, making it possible for the base station to schedule the network through the dedicated time slots to the sensors. Through the generation of a conflict graph, created from the neighborhood of each sensor, it is possible to make the base station decides how to reuse a time slot for a particular sensor without it causing interference and transmission conflict another sensor which using this same slot. Through the modeling of the problem of reuse of time slots as a graph coloring problem of conflicts generated from the neighbors, it is possible to reuse the time slots. In addition to the idea of reusing the time slots, other improvements not related to the scheduling of the time slots are implemented to the RSOTP protocol. These improvements are intended to provide stability between node transmissions and increase network lifetime. From the results obtained it is seen that in the RSOTP protocol the rate of reuse of time slots grows up the measure which the number of nodes in the network increases, presenting a greater reuse of time slots in scenarios more dense. RSOTP also has an effective greater than 30% based on the amount of data received by the base station when compared to protocols that do not reuse the time slots.

Keywords: WSN. TDMA Protocol. Time Slots. Scheduling. Graph Coloring

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Nó B pode ouvir A e C, mas A e C não podem-se ouvir. 19
Figura 2 – (a) Problema do Terminal Exposto; (b) Problema do Terminal Oculto. . . . 19
Figura 3 – Conceito básico do TDMA. 21
Figura 4 – Conceito básico do FDMA. 23
Figura 5 – Conceito básico do CDMA. 24
Figura 6 – Estrutura de um quadro TDMA. 25
Figura 7 – Exemplo de uma Rede de Sensores. 27
Figura 8 – Exemplo de um grafo árvore. 29
Figura 9 – Exemplo de Coloração de Vértices. 30
Figura 10 – Escalonamento inverso a partir de uma transmissão com 3 saltos. 33
Figura 11 – Grafo Conflitante em uma rede utilizando o protocolo TDMA-CA. 37
Figura 12 – Fluxograma do Algoritmo de Coloração Distribuída. 38
Figura 13 – O resultado de ambos os estágios. 39
Figura 14 – Escalonamento TDMA Distribuído no TDMA-CA. 39
Figura 15 – Estado de Busca do protocolo RSOTP. 48
Figura 16 – Estado de Sincronização do protocolo RSOTP. 48
Figura 17 – Estado de Registro do protocolo RSOTP. 49
Figura 18 – Exemplo de utilização do protocolo SOTP em alguns nós da rede. 56
Figura 19 – Exemplo de utilização do protocolo RSOTP em alguns nós da rede. 56
Figura 20 – Topologia do Cenário 1. 58
Figura 21 – Topologia do Cenário 2. 58
Figura 22 – Topologia do Cenário 3. 59
Figura 23 – Número de slots necessários para cada Cenário. 64
Figura 24 – Quantidade de dados recebidos pela Estação Base em cada Cenário. 65
Figura 25 – Eficiência de Coleta no Cenário 1. 67
Figura 26 – Eficiência de Coleta no Cenário 2. 67
Figura 27 – Eficiência de Coleta no Cenário 3. 68
Figura 28 – Tempo de morte do primeiro nó em cada Cenário. 69
Figura 29 – Tempo de vida da rede (80% de nós mortos) em cada Cenário. 71
Figura 30 – Consumo médio de energia no Cenário 1. 73
Figura 31 – Consumo médio de energia no Cenário 2. 73

Figura 32 – Consumo médio de energia no Cenário 3. 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Cenários utilizados para as simulações dos protocolos. 57
Tabela 3 – Parâmetros da Rede. 60
Tabela 4 – Parâmetros do Simulador. 60
Tabela 5 – Parâmetros do Protocolo SOTP. 61
Tabela 6 – Parâmetros do Protocolo RSOTP. 61
Tabela 7 – Parâmetros do Protocolo LEACH. 61
Tabela 8 – Resultados do Aproveitamento dos Slots no RSOTP. 64
Tabela 9 – Resultados do RSOTP em relação ao SOTP. 64
Tabela 10 – Resultados da Quantidade de Dados Recebidos pela BS no Cenário 1. . . . 66
Tabela 11 – Resultados da Quantidade de Dados Recebidos pela BS no Cenário 2. . . . 66
Tabela 12 – Resultados da Quantidade de Dados Recebidos pela BS no Cenário 3. . . . 66
Tabela 13 – Resultados do Tempo de morte do primeiro nó no Cenário 1. 70
Tabela 14 – Resultados do Tempo de morte do primeiro nó no Cenário 2. 70
Tabela 15 – Resultados do Tempo de morte do primeiro nó no Cenário 3. 70
Tabela 16 – Resultados do Tempo de Vida da Rede (80% de nós mortos) no Cenário 1. . 72
Tabela 17 – Resultados do Tempo de Vida da Rede (80% de nós mortos) no Cenário 2. . 72
Tabela 18 – Resultados do Tempo de Vida da Rede (80% de nós mortos) no Cenário 3. . 72

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Coloração de Vértices 30

Algoritmo 2 – Algoritmo de Ordenação 50

Algoritmo 3 – Coloração de um sensor 55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACT	*Active State Indicator Packet*
AP	*Access Point*
BS	*Base Station*
CDMA	*Code Division Multiple Access*
CFP	*Child Found Packet*
CH	*Cluster Head*
CS	*Carrier Sensing*
DFS	*Depth-First Search*
FDMA	*Frequency Division Multiple Access*
LAN	*Local Area Network*
LEACH	*Low-energy Adaptative Clustering Hierarchy*
MAC	*Medium Access Control*
MS	*Master Station*
RSOTP	*Reuse of Slots for the Self-Organized TDMA Protocol*
RSSF	Redes de Sensores sem Fio
SAP	*Slot Allocation Packets*
SOFLEE	*Self Organized, Flexible, Latency and Energy Efficient*
SOTP	*Self-Organized TDMA Protocol*
TDD	*Time Division Duplexing*
TDMA	*Time Division Multiple Access*
TDMA-CA	*Time Division Multiple Access-Coloring Algorithm*

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	15
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**	18
2.1	ESCALONAMENTO EM REDES	18
2.2	TÉCNICAS DE ACESSO MÚLTIPLO	20
2.3	ESCALONAMENTO TDMA	25
2.4	REDES DE SENSORES SEM FIO	25
2.5	TEORIA DOS GRAFOS	28
2.6	COLORAÇÃO DE GRAFOS	29
3	**TRABALHOS RELACIONADOS**	31
3.5	RELAÇÕES COM A PROPOSTA	44
4	**PROPOSTA**	47
4.1	METODOLOGIA	49
5	**RESULTADOS**	57
5.1	CENÁRIOS E PARÂMETROS DA REDE E DO SIMULADOR	57
5.2	PARÂMETROS DOS PROTOCOLOS SIMULADOS	60
5.3	MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO	61
5.4	ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS	62
6	**CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) consiste em um conjunto de vários sensores e uma estação base, a qual é responsável por processar os dados enviados pelos sensores. Estes sensores realizam um trabalho colaborativo, sendo responsáveis por executar funções de monitoramento e pelo envio de dados (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Em muitas aplicações que envolvem este tipo de rede, os sensores são dispostos em ambientes hostis e sem o mínimo de controle dos eventos no intuito de obter informações importantes para análise e prevenção de riscos, por exemplo. Os sensores têm ampla aplicabilidade em várias áreas, incluindo saúde e segurança. Porém, estes dispositivos possuem baixa capacidade de processamento e, geralmente, dotados de fonte limitada de energia, como por exemplo, baterias. Por apresentarem características de comunicação sem fio, estes dispositivos precisam compartilhar o meio para uma transmissão de dados eficiente. Na necessidade de coordenar transmissões em ambientes deste tipo, a fim de que interferências e colisões sejam evitadas, pode-se fazer uso dos protocolos de controle de acesso ao meio (MAC).

Os protocolos de controle de acesso ao meio trabalham em uma camada abaixo da camada de rede e utilizam-se de técnicas para coordenar as transmissões, aumentando as chances de que os dados transmitidos pelos vários nós sensores sejam recebidos pela estação base, a qual é responsável por captar e repassar as informações colhidas para um usuário final. Dentre as técnicas existentes, o TDMA, FDMA e o CDMA, são as mais conhecidas no meio científico. Estas técnicas diferenciam-se pela atribuição de faixas de tempo, frequência ou código para cada sensor da rede, respectivamente. Assim cada sensor tem seu determinado momento para transmitir seus dados, não interferindo na transmissão de outro sensor. O acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) foi escolhido para as implementações deste trabalho a fim de distribuir intervalos de transmissão para cada sensor, tornando possível que a estação base faça um escalonamento da rede atribuindo intervalos de tempo aos sensores, tomando cuidado com o sincronismo entre todos os componentes da rede.

O escalonamento em redes é um assunto que já há muito tempo é discutido na literatura científica. Desde a formação das antigas redes de pacotes de rádio que são tratados os problemas causados por interferências e colisões de dados. Problemas estes, comuns de ocorrerem durante as transmissões dos dispositivos de uma rede de sensores. Além de lidar com estes problemas, o escalonamento em redes de sensores também pode ser útil na diminuição do consumo de energia das baterias dos nós, pois através do escalonamento é possível fazer com

que determinados sensores realizem transmissões e recepções de dados sem que haja colisões, enquanto outros nós ficarão em estado de espera, consequentemente, diminuindo o consumo de energia.

Além dos problemas relacionados à interferência, colisão de dados e o consumo de energia, outro aspecto importante que deve ser levar em conta em uma rede de sensores é a escalabilidade da rede e a eficiência energética em relação a quantidade de dados entregues à estação base. Um protocolo escalável permite que uma topologia de rede aceite a entrada de mais nós sem piorar o desempenho e o funcionamento da rede. Quanto a eficiência de coleta, uma rede é eficiente na coleta de dados quando os sensores conseguem entregar uma grande quantidade de dados à estação base levando em conta o consumo de energia de suas baterias.

A proposta da reutilização dos intervalos de tempo tem como finalidade tornar o protocolo escalável, maximizar o desempenho da rede e as trocas de informações e tornar o protocolo eficiente em relação à coleta de dados da estação base. Para isto foi utilizada a técnica de coloração de grafos. As implementações foram realizadas através do protocolo TDMA auto-organizado, conhecido como SOTP (do inglês, *Self-Organized TDMA Protocol*) (WANG *et al.*, 2006).

Ao término das implementações foi desenvolvido um novo protocolo TDMA baseado em coloração de grafos, chamado de RSOTP (do inglês, *Reuse of Slots for the Self-Organized TDMA Protocol*). O protocolo RSOTP, tendo em vista suas características de reaproveitamento dos intervalos de transmissão e do máximo de transmissões durante o intervalo alocado a cada sensor, pode ser aplicado em uma rede de sensoriamento militar ou de vigilância. Com a aplicação deste protocolo é possível coletar dados constantemente na área em que o sensor se encontra a fim de medir a presença ou não de um indivíduo e assim executar alguma ação específica.

1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação para o desenvolvimento do protocolo RSOTP foi a busca em desenvolver um protocolo que oferecesse escabilidade e eficiência na coleta de dados captados pela estação base. Outra aspecto relevante foi o de evitar o desperdício de tempo por meio da reutilização dos intervalos de tempo, levando a uma alta performance no colhimento de informações pelos sensores, consequentemente, gerando mais fluxo de dados na rede sem interferir no desempenho quando comparado a outros protocolos durante um mesmo período de tempo.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Os objetivos desta dissertação de mestrado consiste em aprimorar o escalonamento TDMA usando um modelo de coloração de grafos, propôr melhorias não relacionadas ao escalonamento dos intervalos de transmissão, como a criação de uma heurística de ordenação para entrada dos nós no processo de registro, equações referente ao sincronismo do relógio dos sensores e definição de um critério para a construção da árvore de roteamento. E, finalmente, validar a proposta comprando com um protocolo existente na literatura, no caso o protocolo LEACH. As implementações realizadas e baseadas no estudo do escalonamento em redes de sensores serão executadas utilizando-se de instâncias reais criadas por um simulador específico para redes de sensores.

Objetivos Específicos

- Minimizar o número de intervalos de transmissão utilizados.
- Fornecer estabilidade na comunicação entre os sensores e diminuir os atrasos nas transmissões.
- Maximizar o tempo de vida da rede.
- Comparar o RSOTP, SOTP e o LEACH em relação a capacidade máxima de nós na rede, quantidade de dados recebidos pela estação base, eficiência energética dos protocolos em relação a quantidade de pacotes coletados pela estação base e a energia consumida pela rede, tempo de vida da rede e a média de consumo de energia dos nós.
- Validar a proposta utilizando o simulador **Castalia**.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Nos Capítulos a seguir serão apresentados os detalhes acerca deste trabalho. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica acerca dos assuntos que envolvem esta dissertação. No Capítulo 3 são expostos os trabalhos relacionados. No Capítulo 4 é apresentada a proposta desta dissertação e a metodologia utilizada para o desenvolvimento do protocolo RSOTP. No Capítulo 5 são expostos os resultados e a análise das simulações realizadas, referentes aos protocolos SOTP, RSOTP e LEACH. E no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões acerca do trabalho e os trabalhos futuros que podem vir a contribuir ainda mais com este tema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O problema de escalonamento em redes se encaixa perfeitamente no contexto de redes de sensores. A topologia pode estar suscetível ou não a constantes variações, dependendo da aplicação e da disposição dos sensores. Por exemplo, uma rede que é constituída por nós móveis está propensa a mudanças constantes na topologia da rede, consequentemente o escalonamento precisa ser reavaliado. Já em uma rede constituída por nós (sensores) estáticos, tais mudanças não ocorrem com frequência e o escalonamento é fixado por um período de tempo relativamente grande. Nas seções seguintes serão retratados com mais detalhes o problema de escalonamento em redes, as técnicas de acesso múltiplo com o ênfase em TDMA, redes de sensores e a modelagem do problema de escalonamento TDMA utilizando coloração de grafos.

2.1 ESCALONAMENTO EM REDES

Escalonamento é uma forma utilizada para otimizar a transmissão e recepção de informações em torno de uma rede, seja ela constituída por dispositivos móveis ou fixos. Dessa forma, aumenta-se as chances de que a informação seja transmitida e recebida de forma íntegra, sem perdas. Uma rede pode ser facilmente modelada a partir de um grafo, onde os nós (vértices) seriam os dispositivos de transmissão e as arestas seriam os enlaces, ou seja, a comunicação sem fio entre os nós.

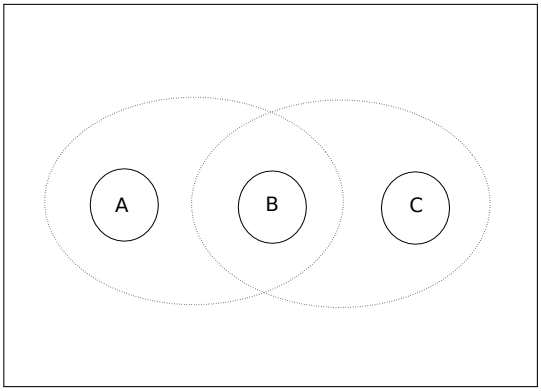
O escalonamento pode ser realizado através de várias técnicas de particionamento, porém dentre as técnicas mais conhecidas e utilizadas de acordo com os trabalhos e artigos estudados, estão o TDMA, FDMA ou CDMA, as quais serão explicadas na próxima sessão. O TDMA foi a técnica escolhida para o desenvolvimento do protocolo RSOTP por já ser bastante conhecido e aplicado no meio científico. Um escalonamento TDMA MAC é um processo de alocação de intervalos de tempo nos sensores ou nos enlaces de uma rede a fim de garantir acesso ao canal, livre de colisão (KANAGASABAI, 2013).

2.1.1 Conflitos em Redes sem Fio

O maior objetivo ao escalonar uma rede de sensores é justamente evitar ou diminuir o número de colisões, para isso é necessário saber quais são os conflitos existentes em uma rede. Os conflitos mais comuns que podem ocorrer é quando um nó faz ou recebe duas ou mais transmissões de dados ao mesmo tempo, cujos sensores estejam no mesmo raio de trans-

missão. Além destes conflitos, existem outros tipos de conflitos que precisam ser analisados mais cuidadosamente: **O Problema do Terminal Exposto** e o **Problema do Terminal Oculto** (BHARGHAVAN *et al.*, 1994).

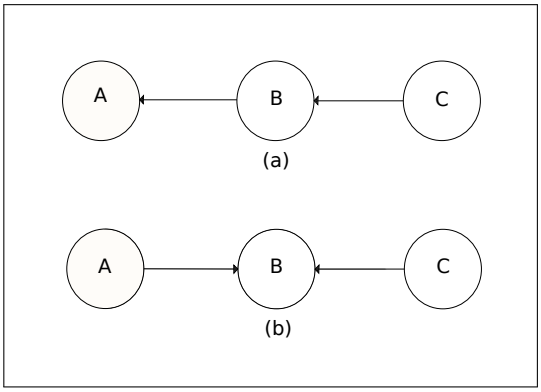
Figura 1 – Nó B pode ouvir A e C, mas A e C não podem-se ouvir.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Problema do Terminal Exposto**: Ocorre quando um nó transmite e recebe dados ao mesmo tempo. Observe na Figura 2(a): B está transmitindo para A e C tenta transmitir para B, ocorrendo assim interferência na transmissão de dados de B para A, e consequentemente colisão de dados em B (os dados de C se colidem com os dados de B que estão sendo transmitidos para A).
- **Problema do Terminal Oculto**: Ocorre quando um nó recebe duas transmissões ao mesmo tempo, sendo que os dois nós extremos (neste caso, A e C) estão fora do alcance um do outro. Observe na Figura 2(b): Se A começar a transmitir dados para B, C não irá saber e achando que B está livre para recepção, enviará dados também para B, o que ocasionará a colisão de dados em B.

Figura 2 – (a) Problema do Terminal Exposto; (b) Problema do Terminal Oculto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 TÉCNICAS DE ACESSO MÚLTIPLO

Um protocolo de controle de acesso ao meio MAC (do inglês, *Medium Access Control*) especifica as regras segundo as quais um quadro é transmitido pelo enlace. Um quadro[1] é uma unidade de dados trocada pelo protocolo de camada de enlace. Para enlaces ponto a ponto que tem um único remetente em uma extremidade do enlace e um único receptor na outra extremidade, o protocolo MAC é simples: o remetente pode enviar um quadro sempre que o enlace estiver ocioso (KUROSE; ROSS, 2010). O caso mais interessante é quando vários nós compartilham um único enlace *broadcast*, o denominado problema de acesso múltiplo. Aqui o protocolo MAC serve para coordenar as transmissões de quadros dos muitos nós, e desempenha um importante papel na determinação da utilização da capacidade do canal, atrasos na rede e consumo de energia.

Os protocolos MAC (HUANG *et al.*, 2002) são necessários em uma ampla variedade de cenários de rede, que inclui redes locais com fio, sem fio e redes por satélite. Como todos os nós têm a capacidade de transmitir quadros, dois ou mais nós podem transmitir quadros ao mesmo tempo. Quando isso acontece, todos os nós recebem vários quadros ao mesmo tempo, isto é, os quadros transmitidos colidem em todos os receptores. Além de que, duas ou mais transmissões simultâneas geram interferência. Foi para coordenar o acesso ao meio que os protocolos MAC foram criados.

Os protocolos na camada de enlace, referentes ao MAC, tem como função determinar como os nós devem compartilhar o canal de um enlace, isto é, determinam quando cada nó pode transmitir (UEYAMA, 2013). Um enlace de rede possui uma largura de banda disponível pra trafegar as informações, ou seja, transferir dados de um nó para o outro. Essa largura de banda é chamada de canal.

Baseando-se na definição e na finalidade da camada de enlace e dependendo do protocolo, o escalonamento é feito utilizando diferentes técnicas. Através das técnicas de particionamento utilizadas na camada de enlace, referente ao controle de acesso ao meio (MAC), é possível definir o acesso ao enlace, por exemplo, através do uso de intervalos de tempo (**TDMA**), bandas de frequência (**FDMA**) ou através da atribuição de um código diferente a cada enlace (**CDMA**).

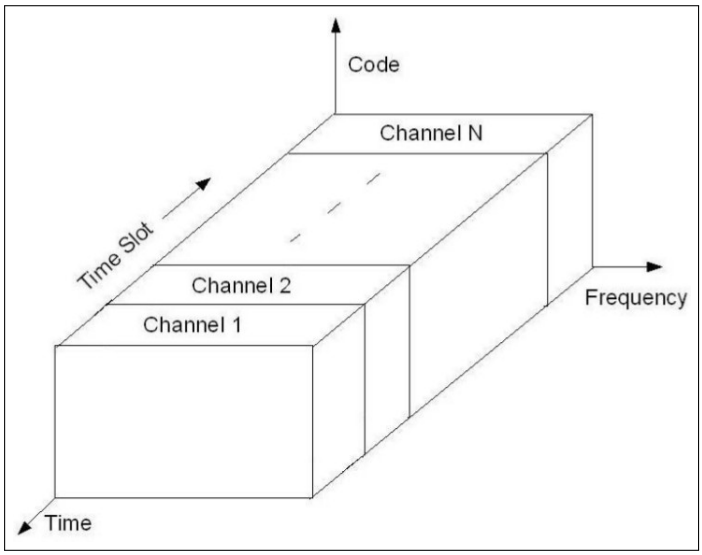
[1] Não confundir um quadro de dados com um quadro TDMA. Um quadro TDMA é um período de tempo suscetível a divisão de intervalos menores de tempo.

2.2.1 TDMA (*Time Division Multiplexing Access*)

No acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA), toda a largura de banda do canal é disponível, mas apenas por um período limitado de tempo. São atribuídos intervalos de tempo aos utilizadores, durante esses intervalos cada utilizador terá todo o enlace disponível para transmitir ou receber informações, como mostra a Figura 9.

TDMA requer cuidado na sincronização de tempo, pois os usuários compartilham a mesma frequência. TDMA utiliza diferentes intervalos de tempo para transmissão e recepção. Por não transmitir e receber informações ao mesmo tempo, o TDMA não precisa de duplexadores para isso. Um duplexador é referido como uma duplexação por divisão de tempo (TDD) (IITG, 2015).

Figura 3 – Conceito básico do TDMA.



Fonte: (IITG, 2015)

As principais características do TDMA são as seguintes:

- TDMA compartilha uma única frequência com vários usuários, onde cada usuário faz uso de intervalos de tempo não sobrepostos;
- O número de intervalos de tempo necessários por quadro depende de vários fatores, tais como técnicas de modulação, a largura de banda disponível, etc;
- A transmissão de dados no TDMA não é contínua, mas ocorre em ciclos. Isso resulta em um baixo consumo de bateria desde que o transmissor do nó possa ser desligado quando não estiver em uso;

Por poder ocorrer uma transmissão descontínua pelo do TDMA, o processo de

transferência é muito mais simples para um nó que está transmitindo, uma vez que este é capaz de escutar os outros nós da rede que estão ociosos durante determinados intervalos de tempo.

TDMA possui uma vantagem que é atribuir diferentes números de intervalos de tempo por quadro para diferentes usuários. Assim, a largura de banda pode ser fornecida sob demanda para diferentes usuários, concatenando ou reatribuindo intervalos de tempo com base nas prioridades.

2.2.2 FDMA (*Frequency Division Multiplexing Access*)

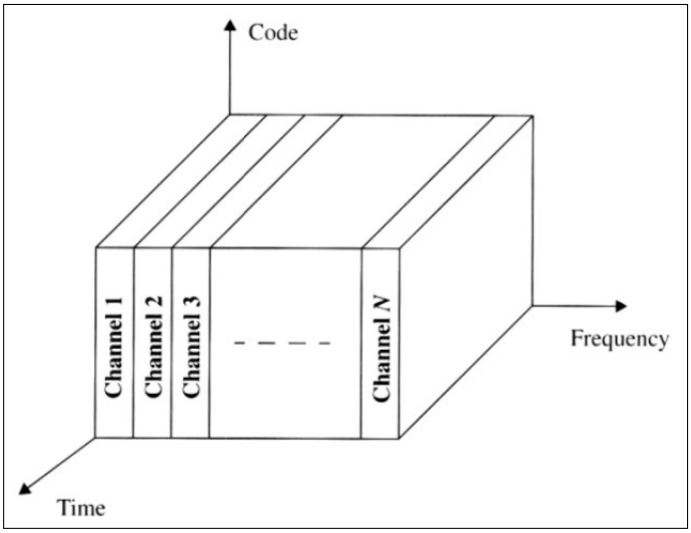
O acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA) foi inicialmente proposto para sistemas celulares em que a cada usuário é atribuído um par de frequências ao fazer ou receber uma chamada, ou seja, nesta técnica é atribuído a cada usuário uma única faixa de frequência ou um canal. Estes canais são atribuídos sob demanda e não podem ser compartilhados (SDU, 2012). Se um canal FDMA não estiver em uso, ele fica inativo e não pode ser utilizado por outros utilizadores.

As larguras de banda de canais FDMA são relativamente estreitas (30 kHz), pois cada canal suporta apenas um circuito por portadora, ou seja, o FDMA é geralmente executado em sistemas de banda estreita. Um circuito nada mais é do que uma conexão bidirecional, contendo um canal dedicado para cada estação transceptora até o término da comunicação (GOMES, 2012). Uma portadora é um sinal lógico em forma de onda, este sinal é constituído de amplitude, frequência e fase, na qual uma destas características será modulada para transportar a informação a ser transmitida (KIOSKEA.NET, 2010).

Um sistema de banda estreita refere-se a sistemas que utilizam canais ou circuitos que servem para transmitir a débitos binários bastante limitados, ou seja, transmitir uma quantidade pequena de informações (BAIAO, 2010). A complexidade dos sistemas móveis FDMA é menor quando comparado com os sistemas móveis TDMA, embora isso esteja mudando como forma de melhorar os métodos de processamento dos sinais digitais no TDMA. Além disso, o FDMA exige uma filtragem justa para minimizar a interferência de canais adjacentes (IITG, 2015).

O FDMA é um esquema de transmissão contínua. Menos bits são necessários para fins gerais (como para a sincronização e bits de enquadramento) em comparação com o TDMA. Com o FDMA, é preciso utilizar duplexadores, pois tanto o transmissor e receptor operam ao mesmo tempo.

Figura 4 – Conceito básico do FDMA.



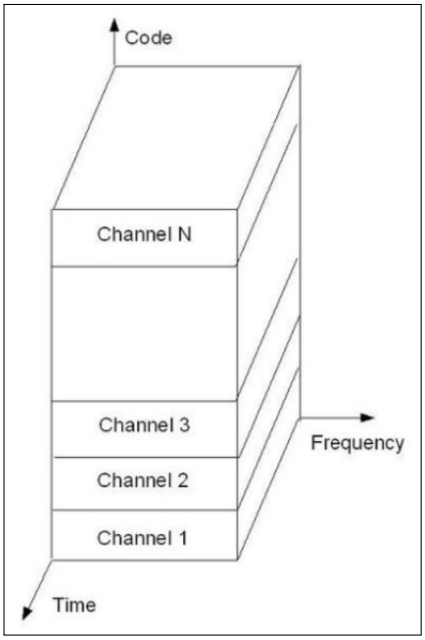
Fonte: (SDU, 2012)

2.2.3 CDMA (*Code Division Multiplexing Access*)

O acesso múltiplo por divisão de código (CDMA), atribui um código diferente a cada nó. Cada nó usa seu código exclusivo para codificar os bits de dados que envia. Se os códigos forem escolhidos cuidadosamente, as redes CDMA terão a maravilhosa propriedade de permitir que os nós transmitam simultaneamente e, ainda assim, consigam que seus respectivos receptores recebam corretamente os bits codificados pelo remetente (admitindo-se que o receptor conheça o código remetente), a despeito das interferências causadas pelas transmissões de outros nós (KUROSE; ROSS, 2010).

O CDMA vem sendo usado em sistemas militares há algum tempo devido suas propriedades anti-interferências. E agora está começando a se difundir para uso civil, em particular para canais de acesso múltiplo sem fio, predominantemente em tecnologias celulares e de LAN sem fio. O CDMA utiliza uma técnica de espectro de dispersão na qual um sinal de espalhamento é usado para distribuir o sinal de mensagem de banda estreita (IITG, 2015).

Figura 5 – Conceito básico do CDMA.



Fonte: (IITG, 2015)

O sinal de espalhamento é uma sequência de código pseudo-ruído que tem uma velocidade de *chipping* que é de ordens de magnitude muito maior do que a taxa de dados da mensagem (SDU, 2012). Uma sequência de código-pseudo ruído é qualquer grupo de sequências binárias que apresentam propriedades aleatórias parecidas com as do ruído (PUC-MG, 2000). Uma velocidade ou sequência de *chipping* é a taxa com que cada usuário, utilizando o CDMA, leva para codificar os dados (FAINA, 2013).

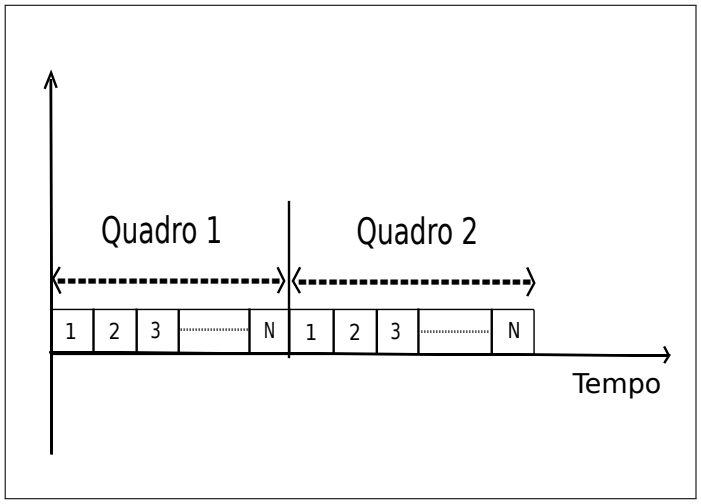
Todos os usuários usam a mesma frequência e podem transmitir simultaneamente. O receptor executa uma correlação no tempo para detectar apenas a palavra-código desejada, além disso o receptor necessita saber a palavra-código utilizada pelo transmissor. Uma correlação no tempo é o processo de filtragem que retorna a palavra-código desejada (GHOSH; KONAR, 2013). Cada usuário opera de forma independente, sem conhecimento dos outros usuários.

Ao contrário do TDMA ou FDMA, o CDMA tem um limite de capacidade flexível. O aumento do número de utilizadores de um sistema CDMA aumenta linearmente o ruído de fundo. Assim não há limite absoluto do número de utilizadores em CDMA, porém a qualidade da comunicação CDMA diminui.

2.3 ESCALONAMENTO TDMA

Em protocolos que faz uso da camada de enlace e do TDMA, o tempo é dividido em quadros e cada quadro é dividido em um determinado número de intervalos de tempo. O escalonamento TDMA é realizado através da atribuição destes intervalos de tempo, pertencente a um quadro, aos nós ou aos enlaces. O escalonamento de nós é também conhecido como escalonamento *broadcast* ou escalonamento de transmissão. Tem como finalidade produzir e/ou manter um escalonamento infinito de intervalos de tempo TDMA de tal forma que cada nó receba periodicamente um intervalo de tempo para a transmissão e todas as transmissões sejam recebidas livres de colisões (STOJMENOVIC, 2003). Essa nomenclatura definida como escalonamento infinito, significa dizer que sempre será possível alocar um intervalo de tempo para um nó, desde que haja um número de intervalos de tempo igual ou superior a quantidade de nós na rede.

Figura 6 – Estrutura de um quadro TDMA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 REDES DE SENSORES SEM FIO

Em uma rede de sensores, os sensores são geralmente dispositivos fixos e colocados em regiões de difícil acesso para captar determinados tipos de dados sobre aquela região e enviá-los a uma estação base (BECHELANE, 2009). Além dessa utilidade, os sensores podem ter amplas aplicações em vigilância e cuidados com a saúde, por exemplo. Redes de sensores normalmente consistem de um conjunto de pequenos nós alimentados por bateria. A estação base em uma rede de sensores tem como função reunir as informações coletadas por todos os

nós da rede e as encaminhar para um *gateway*, de onde elas seguem para outras redes como a Internet e possivelmente até um sistema de controle e monitoramento remoto (CAMPOS, 2011). Um *gateway* é uma máquina intermediária que serve para interligar redes.

Os sensores são propensos à falhas devido a baixa capacidade de processamento. Como consequência desse baixo processamento, cada um desses nós possuem uma taxa de transmissão e uma detecção limitada, mas juntos eles atingem um nível de detecção e comunicação de alto nível. Uma vantagem nesse tipo de rede é que os níveis de potência de transmissão podem ser mantidos baixos, o que é altamente desejável em operações militares, pois uma baixa potência de transmissão dificulta a detecção da transmissão por algum inimigo, por exemplo. Umas das restrições mais importantes sobre sensores é a exigência de se obter um baixo consumo de energia.

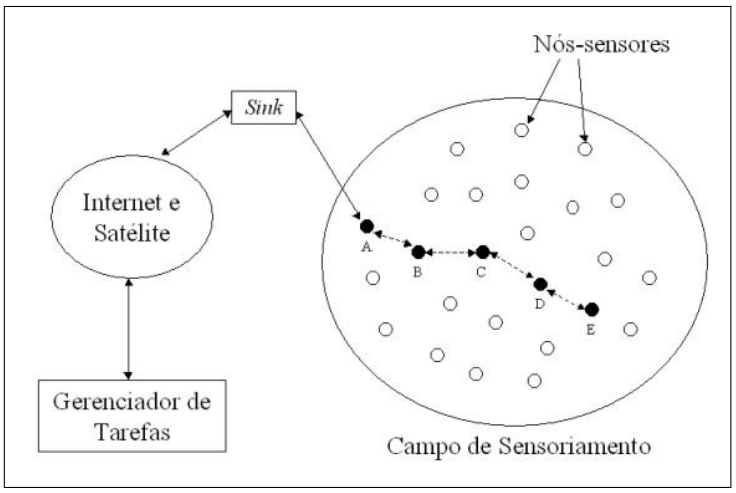
Uma vez que um grande número de sensores são implantados em um espaço limitado, nós vizinhos podem estar muito próximos uns dos outros. Em redes deste tipo, transmissões *multi-hop*, também conhecidas como transmissões de múltiplos saltos, são indispensáveis, pois comunicações *multi-hop* também podem superar alguns dos efeitos de propagação de sinal em comunicação sem fio de longa distância, fazendo com que seja consumido menos energia e a latência seja menor durante a comunicação entre os sensores (AKYILDIZ *et al.*, 2002a).

A posição dos sensores não precisa ser manipulada ou pré-determinada, isso permite a implantação aleatória em terrenos inacessíveis ou em operações de desastres, por exemplo. Por outro lado, isso também significa que os protocolos e algoritmos específicos para as redes de sensores devem possuir funcionalidades de auto-organização.

Outra característica única das redes de sensores é o esforço cooperativo entre os sensores. Em vez de enviar os dados brutos para os *cluster heads*, eles usam suas habilidades de processamento para realizarem localmente cálculos simples e transmitir apenas os dados necessários e parcialmente transformados. Isso faz com que o sensor não gaste toda sua capacidade de energia (AKYILDIZ *et al.*, 2002b). *Cluster heads* são nós responsáveis pela junção das informações de todos os outros sensores pertencentes ao *cluster*. Um *cluster* é um agrupamento de sensores.

Como já mencionado, os sensores possuem baterias limitadas, que são geralmente, insubstituíveis fontes de energia. Portanto, enquanto as redes tradicionais visam atingir uma alta qualidade de serviço, os protocolos das redes de sensores precisam levar em consideração a conservação de energia. Sendo assim, objetivo primordial de um protocolo para redes de sensores sem fio é maximizar o tempo de vida do nó, e consequentemente, de toda a rede (DEMIRKOL *et*

Figura 7 – Exemplo de uma Rede de Sensores.



Fonte: (TAVARES, 2002)

al., 2006). Logo, os protocolos MAC propostos devem sempre priorizar a eficiência energética, reduzindo assim o desperdício de energia.

Existem vários fatores inerentes ao desperdício de energia, como por exemplo, as retransmissões de pacotes. Seja por causa de colisões ou porque os pacotes não tenham sido enviados ao destinatário correto. As escutas desnecessárias, nas quais os sensores podem receber pacotes não destinados a eles. A sobrecarga de pacotes de controle, que está relacionada a um número excedente de pacotes de controle utilizados para fazer a transmissão de dados, gerando um fluxo desnecessário na rede e assim aumentando o consumo de energia.

Além destes exemplos, a escuta ociosa é comum e é uma das grandes causas de desperdício de energia, pois o rádio do sensor fica ligado desnecessariamente sem que haja qualquer transmissão dirigida a ele. Outro fator de desperdício é a emissão de pacotes por acaso que acontece quando o sensor manda dados ao sensor destinatário sem que este esteja apto a receber. Estes fatores que contribuem para um grande consumo de energia devem ser tratados e solucionados rigorosamente em uma rede de sensores (CUNHA *et al.*, 2007).

O controle de acesso ao meio é um dos problemas críticos na concepção das redes de sensores sem fio. Como na maioria das redes sem fio, as colisões nas redes de sensores geram uma grande preocupação a ser resolvida (PAL; CHATTERJEE, 2014). A fim de resolvê-la, emprega-se um protocolo que se utiliza da camada de enlace, o qual irá arbitrar o acesso ao meio compartilhado a fim de evitar colisão de dados e ao mesmo tempo de forma justa e eficiente, partilhar os recursos de banda entre os vários sensores (RAJENDRAN; OBRACZKA; GARCIA-LUNA-ACEVES, 2006; LU; KRISHNAMACHARI; RAGHAVENDRA, 2004; DAM; LANGENDOEN, 2003).

Com o uso de grafos, é possível modelar os conflitos em redes de sensores, resolvendo um problema de escalonamento, e consequentemente diminuindo ou evitando a ocorrência de colisões nas transmissões em uma rede de sensores. Para uma atribuição eficiente dos intervalos de tempo existe o problema de coloração de grafos (KHAN *et al.*, 2013; RAHMANI; KHADEMZADEH; MOGHADAM, 2013; GANDHAM; DAWANDE; PRAKASH, 2008; CHENG; YIN, 2007). O problema de coloração de grafos será utilizado neste trabalho a fim de obter um reaproveitamento dos intervalos de tempo, cujo objetivo é alocar um mesmo intervalo a outros nós distantes geograficamente sem que haja a possibilidade de ocorrer interferências e colisões entre as transmissões. Para isso é preciso entender o conceito de grafos para perceber que existe uma relação estreita entre redes de sensores, grafos e o problema de escalonamento.

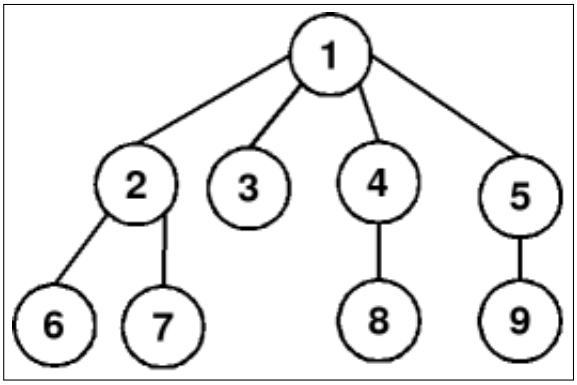
2.5 TEORIA DOS GRAFOS

Um *grafo* G é um par (V, E), onde V é um conjunto de *vértices* e $E \subset [V]^2$ um conjunto de *arestas*. $[V]^2$ é denotado como todos os subconjuntos de 2 elementos de V. A cardinalidade de $V(G)$ é a *ordem* de G e a cardinalidade de $E(G)$ é o seu *tamanho*. As letras n e m são usadas para denotar $|V(G)|$ e $|E(G)|$, respectivamente. A notação uv é usada para indicar a aresta $\{u, v\}$. Se $uv \in E(G)$, é dito então que u e v são as *extremidades* da aresta (ROCHA, 2012).

Seja $G = (V, E)$ um grafo. Se $uv \in E(G)$, então u e v são *vizinhos* em G. O conjunto de todos os vizinhos do vértice $v \in V(G)$ é a *vizinhança* de v, e é denotada como $N_G(v)$. O *grau* $d_G(v)$ do vértice $v \in V(G)$ é a cardinalidade de $N_G(v)$. O *mínimo grau* de G, denotado $\delta(G)$, é o menor grau de um vértice de G, enquanto o *máximo grau* de G é denotado como $\Delta(G)$. Um grafo é *k-regular* se todos os vértices tem grau k.

Uma *árvore* é um grafo conexo que não tem um ciclo como um subgrafo. Um grafo que é livre de ciclos, mas não é conexo, pode ser dividido em outras árvores, isto são as chamadas florestas. É comum identificar um vértice como a raiz da árvore. Depois que a raiz da árvore é fixada, a terminologia de pai e filho com respeito à raiz segue de uma forma natural. Cada um dos vértices tem um pai, exceto a raiz. Vértices que não tem filhos são as folhas da árvore (RAMANATHAN; LLOYD, 1992).

Figura 8 – Exemplo de um grafo árvore.



Fonte: (AMARAL, 2007)

Resumindo, os grafos podem modelar qualquer situação física, incluindo por exemplo, os vizinhos geograficamente próximos que não podem se comunicar diretamente devido à interferência (por exemplo, uma montanha) em uma linha direta entre as estações (nós).

2.6 COLORAÇÃO DE GRAFOS

O problema de coloração de grafos pode ser subdividido em **coloração de vértices** e **coloração de arestas**. Uma coloração de vértices é uma atribuição de cores aos vértices de um grafo, de modo que os vértices adjacentes tenham cores distintas. Uma coloração de arestas é uma atribuição de cores às arestas de um grafo, arestas estas que tendo origem no mesmo vértice devem ser coloridas com cores distintas.

2.6.1 Coloração de Vértices

Uma *coloração de vértices* de um grafo G é uma função $c : V(G) \rightarrow S$. Os elementos de S são chamados de cores. Os vértices de uma cor formam uma *classe de cor*. Se $|S| = k$, nós dizemos que c é uma *k-coloração*. Alternativamente, uma k-coloração de um grafo $G = (V,E)$ é simplesmente uma função $c : V \rightarrow \{1,2,...,k\}$. Muitas vezes é útil considerar colorações em que alguma condição é imposta sobre as classes de cores (ROCHA, 2012).

Uma *coloração própria* é uma coloração em que são atribuídas cores distintas. Uma coloração própria e trivial é obtida pela colocação de cada vértice em uma classe de cores separada. O interesse é em achar colorações próprias com o menor número de cores possível. Um *número cromático* é precisamente o menor valor k tal que o grafo em questão admita uma k-coloração própria. O número cromático de um grafo G é denotado como $\chi(G)$.

Abaixo, podemos ver uma simples heurística utilizada para produzir uma coloração

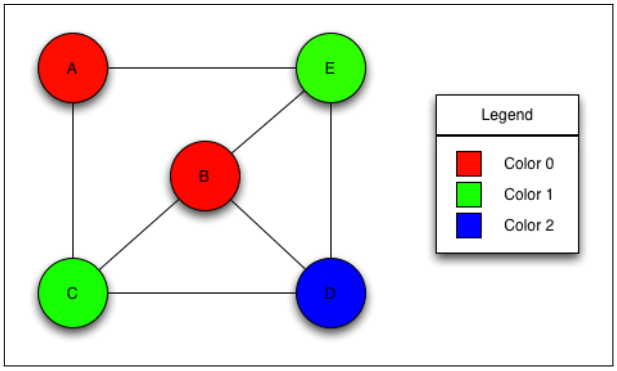
própria de um grafo. Esta heurística utiliza-se de um algoritmo guloso.

Algoritmo 1: Coloração de Vértices

Entrada: G e uma ordenação de vértice $\sigma = v_1 < v_2 < ... < v_n$ de $V(G)$
Saída: Uma coloração adequada c

```
início
    para i de 1 a n faça
        Atribuir para c(v_i) o menor inteiro positivo que não aparece em c(N(v_i)).
    fim
fim
retorna c
```

Figura 9 – Exemplo de Coloração de Vértices.



Fonte: (LUMSDAINE; GREGOR, 2004)

A coloração de grafos ainda é um campo de pesquisa muito ativo, sendo um conteúdo um tanto atual se comparado a outros da matemática e que tem auxílio do uso de computadores. Existem muitos exemplos de aplicabilidade dessa heurística, além do uso em redes de sensores. É possível aplicar, por exemplo, para obter mitigação de interferência em canais de dispositivos de rede e em transmissões de redes veiculares via coloração. Essa técnica, de modo geral, tem ampla aplicação em redes de computadores quando se tem como objetivo evitar colisões e conflitos entre as comunicações de dispositivos presentes em uma rede.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

A seguir, serão mostrados em detalhes, os dois trabalhos que mais contribuíram com o embasamento da proposta, tais trabalhos abordam, respectivamente, o escalonamento TDMA e o problema de coloração de grafos em redes de sensores. O primeiro trata-se do protocolo SOTP, que é o trabalho principal referenciado nesta dissertação, além de ser o trabalho no qual o processo de registro dos nós, utilizado pelo protocolo RSOTP, foi baseado. O segundo, trata-se do protocolo TDMA-CA que aborda coloração de grafos, heurística utilizada no protocolo RSOTP, no intuito de propiciar a reutilização dos intervalos de transmissão. Logo depois, são mencionados outros trabalhos em redes de sensores que também contribuíram significativamente para o desenvolvimento do RSOTP. Na seção 3.5 são descritas as conclusões acerca dos trabalhos mencionados neste Capítulo e as suas contribuições para a construção da proposta.

3.1 SOTP: UM PROTOCOLO TDMA AUTO-ORGANIZADO PARA REDES DE SENSORES SEM FIO

Os autores (WANG *et al.*, 2006) propuseram o protocolo SOTP (do inglês, *Self-Organized TDMA Protocol*) que aplica uma abordagem *cross layer* visando integrar as camadas de rede a fim de maximizar o requisito de eficiência energética em uma rede de sensores. Várias técnicas são utilizadas a fim de assegurar a alocação de intervalos de tempo livres de colisões em um ambiente de rede de múltiplos saltos. O SOTP se utiliza do acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) para alcançar maior eficiência de energia e evitar o problema das escutas desnecessárias por parte dos sensores. Tanto a estação base como os sensores operam em modo TDMA, usando a mesma frequência de rádio.

Este protocolo se aplica a uma topologia de rede plana não-clusterizada, ou seja, sem o uso de *cluster-heads* para repassar os dados coletados à *base station* (BS), estação base. Outra característica deste protocolo é que o alcance de transmissão da estação base é muito maior do que a dos sensores, visto que a estação base precisa de uma potência maior para alcançar todos os sensores da rede e assim todos os nós possam receber as informações repassadas pela estação base. Assim, segundo os autores, considera-se que a estação base pode transmitir dados para todos os sensores enquanto estes só podem atingir os seus vizinhos imediatos de um salto.

Neste artigo (WANG *et al.*, 2006), admite-se que o número de intervalos em um quadro é maior do que o número de nós em toda a rede. Isto significa que esse número de intervalos em um quadro irá atender a topologia, caso mais nós sejam inseridos na rede, porém o

número de sensores inseridos deve ser limitado. A estação base e cada sensor devem ocupar pelo menos um intervalo por quadro.

O escalonamento TDMA, neste protocolo, acontece centralmente através da estação base e as informações de atribuições de intervalos de tempo acontecem por meio de comunicação *broadcast* entre estação base e os sensores da rede. Abaixo estão listadas as principais características do SOTP:

- Alcança um *status* livre de colisões através do escalonamento TDMA e introduz um intervalo *Carrier Sensing*.
- Reduz o atraso de transmissões de múltiplos saltos através de um escalonamento inverso.
- Constrói uma árvore de roteamento durante o processo de auto-organização, podendo aplicar diferentes abordagens para a seleção do nó pai a fim de atingir diferentes objetivos. Como por exemplo, promover estabilidade na comunicação entre os sensores ou aumentar o tempo de vida da rede.
- Recupera-se rapidamente de falhas que ocorrem devido a quebra de enlace ou falha do nó.

O intervalo *Carrier Sensing*, também conhecido como o intervalo de tempo dedicado à detecção de portadora, é utilizado por todos os sensores da rede no intuito de monitorar a existência de nós transmitindo ou não pacotes de registro para um nó pai. Quando um nó está ouvindo este intervalo, ele na verdade está ouvindo o canal para ver se quaisquer outros sensores estão o ocupando e enviando pacotes.

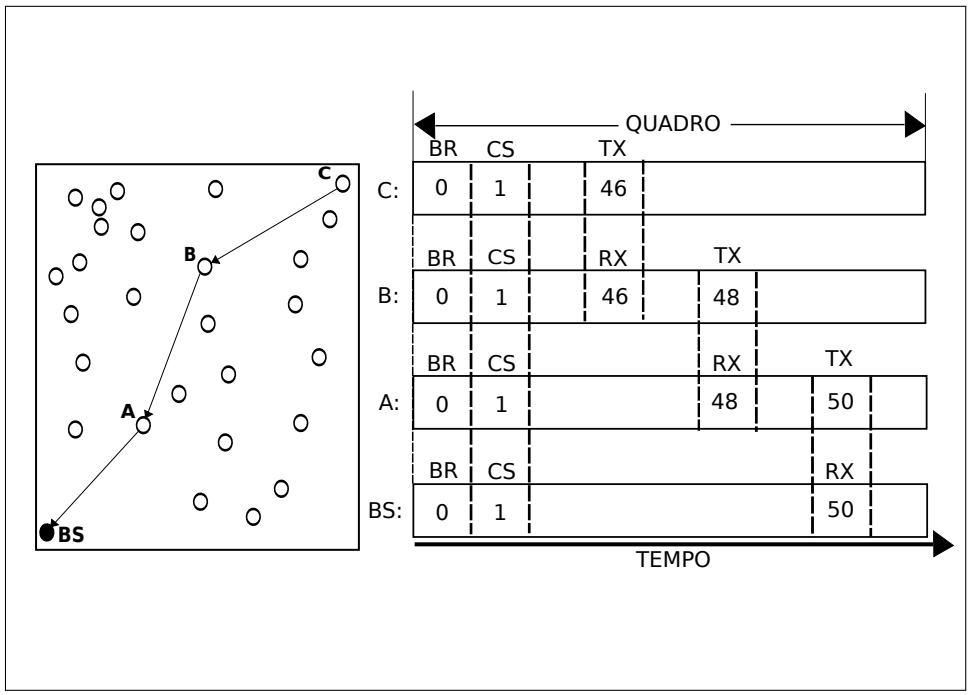
Um nó pai é um sensor responsável por coletar informações do ambiente e encaminhar informações de outros sensores até a estação base, no caso os nós filhos. O encaminhamento de informações tem como objetivo, evitar o rápido consumo da bateria dos nós filhos, pois estes nós, dependendo de suas localizações, poderiam precisar de uma potência muito grande para mandar suas informações até a estação base. Sem mencionar, a ocorrência de muitas colisões na rede durante as transmissões.

O escalonamento inverso é aplicado no SOTP para a alocação de intervalos de tempo do fim ao início do quadro, no intuito de reduzir o atraso de transmissões de múltiplos saltos. Os nós filhos transmitem para os intervalos RX do nó pai, os quais estão associados com os respectivos intervalos TX de cada nó filho, assim sucessivamente até os dados chegarem na estação base. Sendo que o TX de cada nó irá ocupar as últimas posições do quadro. Desta forma, diminui-se o atraso e a informação originada em um nó poderá ser entregue à estação base em um único quadro. Caso mais nós entrem ou saiam da rede, ficará a critério da estação base readequar ou não os intervalos TX e RX dos nós da rede.

3.1.1 Detalhes do Protocolo

Um quadro TDMA (do inglês, *frame*), representa um espaço dividido em vários intervalos de tempo, sendo que cada sensor utiliza-se de um intervalo de tempo para utilizar-se do canal a fim de transmitir ou receber dados. Cada quadro, como já mencionado, pode ser dividido em vários intervalos, destes, cinco são obrigatórios: **Intervalo *Broadcast* (BR), Intervalo *Carrier Sensing* (CS), Intervalo de Transmissão (TX), Intervalo de Recepção (RX) e Intervalo Ocioso (ID)**. Um intervalo BR é sempre o primeiro intervalo no quadro e um intervalo CS, o segundo.

Figura 10 – Escalonamento inverso a partir de uma transmissão com 3 saltos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada nó encontra-se em um dos três estados: **busca, sincronizado ou registrado**. Um nó no estado registrado pode possuir mais de um nó filho, porém só pode possuir um nó pai. Cada nó pai define os intervalos TX de seus nós filhos como seus próprios intervalos RX[1]. Uma rede de sensores, utilizando-se deste protocolo, é auto-organizada de acordo com o seguinte processo:

1) Cada nó é inicializado no estado de busca, exceto a estação base que já inicia-se no estado registrado.
2) A estação base transmite periodicamente pacotes de atribuição de intervalo *SAP* (do inglês,

[1] O nó pai pode ter mais de um intervalo RX, mas somente um intervalo TX.

Slot Allocation Packets) através do intervalo BR. Os pacotes *SAP* incluem dois tipos de informações: A lista atual de intervalos de tempo ocupados/desocupados e a confirmação da atribuição de intervalo de tempo para o sensor que fez a solicitação no quadro anterior.

3) Um nó em estado de busca sempre escuta as transmissões de fora (transmissões dos vizinhos e da estação base). Uma vez que detecta e recebe o *SAP* a partir da estação base, o nó move-se para o estado sincronizado. Em seguida, ele seleciona um intervalo desocupado para ser o seu intervalo TX a partir da lista de intervalos contida no pacote *SAP* enviado pela estação base. Logo em seguida, ele seleciona um de seus nós vizinhos já registrados na rede para ser o seu nó pai e envia um pacote de registro (REG), tanto no intervalo CS como no intervalo TX que escolheu.
4) Os nós no estado registrado transmitem dados em seu próprio intervalo TX e escuta as transmissões dos vizinhos através dos intervalos CS e RX. O rádio é desligado[2]durante os intervalos ociosos[3](ID) a fim de economizar energia.
5) Quando um nó no estado registrado escuta transmissão no intervalo CS, significa que um ou mais nós vizinhos podem defini-lo como nó pai. Ele escuta durante todos os intervalos ID para uma possível transmissão (se ele escutar transmissão no intervalo CS, permanecerá acordado durante todos os intervalos ociosos, caso contrário o rádio será desligado). Se um pacote REG está destinado a um nó, este nó considera o remetente como um nó filho e encaminha o pacote REG para o seu respectivo nó pai (caso tenha), e assim sucessivamente, até que o pacote atinja a estação base.
6) Quando a estação base recebe o pacote REG encaminhado, ela aloca um intervalo de tempo desocupado de acordo com a solicitação requerida pelo nó que originou a solicitação. Após isso, adiciona estas novas informações para os próximos pacotes *SAP*.
7) Quando um nó está no estado sincronizado e ouve o pacote *SAP* atualizado a partir da estação base, ele move-se para o estado registrado e muda seu intervalo TX para alocado através do novo *SAP* enviado pela estação base. Os pacotes *SAP* também são usados por seu nó pai para modificar os intervalos RX dele, caso seja preciso.

Desde que a atribuição de intervalo seja determinada centralmente pela estação base, a colisão em uma rede de sensores utilizando este protocolo só acontecerá quando dois ou mais nós selecionam o mesmo intervalo de tempo dedicado ao intervalo TX durante o registro. Neste caso, o nó pai não pode decodificar o pacote REG, portanto os remetentes selecionam novamente

[2] O sensor ficar com o rádio desligado é uma forma de dizer que o sensor fica em modo *sleep* - modo de baixo consumo.

[3] Período em que um sensor não tem nenhum dado para transmitir e nem receber.

o intervalo TX já que eles não recebem qualquer atribuição por parte da estação base. Depois que cada nó for registrado, a árvore geradora da topologia da rede também é construída. A flexibilidade do SOTP reside na seleção do nó pai/filho, pois através da aplicação de diferentes abordagens, o processo de seleção pode produzir diferentes resultados. Por exemplo, a escolha do nó pai pelo sinal de maior intensidade pode levar a comunicação a ser relativamente estável, enquanto a limitação do número de nós filhos pode aumentar o tempo de vida da rede.

Além deste processo de auto-organização, o protocolo SOTP faz uso do seguinte mecanismo para fazer a adaptação da rede para eventuais falhas dos nós ou enlaces:

- Nós no estado registrado enviam periodicamente um pacote indicador de estado ativo *ACT* de volta para a estação base. Se a estação não receber o pacote *ACT* através de um número específico de quadros, ela marcará esse nó como falho e define os intervalos de tempo utilizados por esse nó como desocupados (intervalos TX e RX) no próximo pacote *SAP*.
- Quando um nó encontra o seu nó filho marcado como falho, ele remove o nó filho imediatamente.
- Quando um nó se encontra marcado como falho pela estação base, ele repete o processo de registro imediatamente, mas mantém todas as informações do nó filho.
- Quando um nó encontra o seu nó pai marcado como falho, ele monitora seu nó pai através de um número de quadros para ver se ele pode se recuperar do fracasso. Senão, ele repete o processo de registro para selecionar um novo nó pai enquanto sua informação de nó filho ainda é mantida.

3.2 PROTOCOLO DE ESCALONAMENTO TDMA DISTRIBUÍDO BASEADO NA EXTINÇÃO DE CONFLITOS

Os autores (WU; WANG; LI, 2010) propõem um protocolo de escalonamento TDMA distribuído baseado em um algoritmo de coloração (TDMA-CA) e que faz uso da reutilização espacial do canal de transmissão, ou seja, possibilita que diferentes sensores utilizem o mesmo canal de transmissão. Porém deve-se levar em consideração alguns aspectos, como o raio de alcance e a potência de transmissão dos sensores. O protocolo aloca diferentes cores para os nós conflitantes na rede e providencia intervalos de tempo distintos para a transmissão de dados para cada cor através do escalonamento TDMA.

Este protocolo de escalonamento TDMA distribuído baseado em algoritmo de coloração visa evitar um alto atraso de propagação e consumo de energia causado pela retransmissão,

garantindo assim o desempenho da rede. Antes do escalonamento TDMA, as redes somente identificavam um conjunto de nós não-conflitantes e alocavam a mesma cor para os nós livres de conflitos. No período do escalonamento TDMA, apenas os nós com mesma cor podem transmitir dados a qualquer momento.

Considera-se que toda a rede de sensores é definida como uma árvore geradora enraizada no *access point* (AP), ponto de acesso. A árvore é representada por um grafo $G = (V, E)$. V é o conjunto de nós e E é o conjunto de arestas, representando as ligações entre os nós na rede. Todos os pacotes de dados de um nó são repassados para o seu respectivo nó pai, e assim sucessivamente, até chegar ao nó AP. Cada nó tem as seguintes propriedades na rede:

- Natureza isomorfa dos nós;
- O alcance de transmissão do nó é uma área de comunicação circular;
- A comunicação entre os nós é bilateral;
- Os nós estão sujeitos a rigorosa sincronização de tempo;

Considera-se que cada nó tem um ID de identificação exclusivo e saltos até o AP, conhecido com *hopCount*. O ID do nó raiz é 0. Cada nó mantém um conjunto de nós vizinhos de um salto, de dois saltos e um nó pai. Durante a fase de escalonamento TDMA, a duração de um quadro escalonado (super intervalo) é o número máximo de cores utilizadas na rede. Além disso, os autores partem do princípio de que cada nó gera o mesmo comprimento de pacote, dessa forma um intervalo de tempo tem duração suficiente para garantir que cada nó envie ou receba um pacote.

3.2.1 Construção da Árvore Geradora

Considera-se que N sensores foram distribuídos aleatoriamente em uma área de monitoramento. Uma árvore geradora foi construída nas fases iniciais de implementação da rede. Primeiro de tudo, o nó AP está selecionado como nó raiz para se juntar à árvore geradora. O *hopCount* do AP é 0. Em seguida, o nó transmite um pacote chamado de "Pacote de Filho Encontrado"CFP (do inglês, *Child Found Packet*) para procurar seus nós filhos. O CFP contém o ID e o *hopCount* do nó raiz.

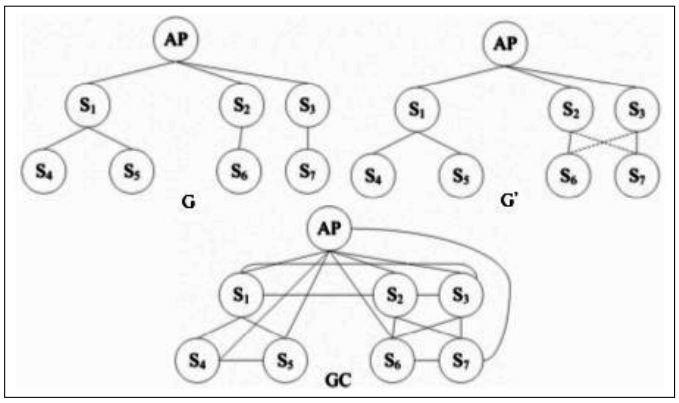
Quando os nós que estão no alcance do AP receberem o pacote, o *hopCount* do AP aumenta para 1 e os nós juntam-se à árvore geradora. O nó raiz será considerado o nó pai deles, pois esses nós registram o ID do AP para ser o nó pai deles. Depois disso, esses nós que receberam o CFP, também transmitem o CFP. Assim seus nós adjacentes obtém este pacote e

juntam-se à árvore geradora como nós filhos do nó o qual eles receberam o pacote e registram o ID contido no CFP para ser o seu nó pai.

Outros nós continuam esse processo até que todos os nós juntem-se à árvore geradora. Se um nó receber um pacote CFP cujo *hopCount* é maior do que o dele, então o pacote é abandonado, caso contrário ele atualiza o *hopCount* do pacote com o seu *hopCount* para fazer assim parte da árvore geradora. Portanto, todas as redes de sensores formam uma árvore geradora enraizada no AP, desta forma cada pacote de dados originado em um nó será encaminhado para o seu respectivo nó pai até que os dados cheguem ao nó AP (nó raiz).

A Figura 11 mostra uma árvore geradora que tem 8 nós e constrói um grafo conflitante *GC*. Qualquer dois nós associados com uma linha sólida corresponde a um conflito. G' mostra a colisão entre os nós através de uma linha tracejada.

Figura 11 – Grafo Conflitante em uma rede utilizando o protocolo TDMA-CA.

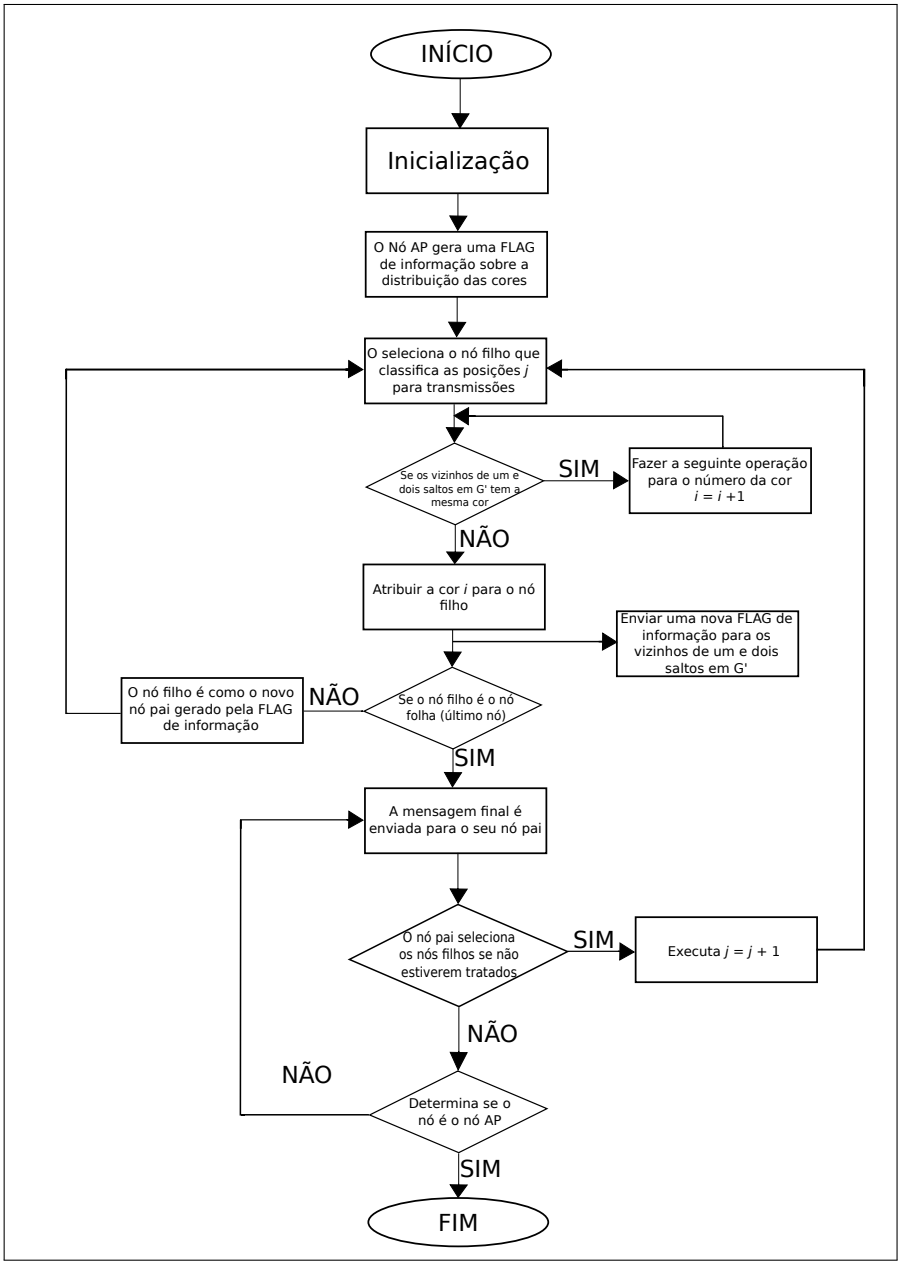


Fonte: (WU; WANG; LI, 2010)

3.2.2 Algoritmo de Coloração Distribuída

O algoritmo de coloração é dividido em duas fases, durante a primeira fase, cada nó do grafo *G* escolhe um intervalo para transmitir no fim do percurso da primeira busca em profundidade (DFS). Na segunda etapa, o DFS é repetido e agora cada nó pega muitas das cores restantes para a transmissão. Em ambas as etapas, os nós enviam essas informações para os seus vizinhos de um e dois saltos em G' para que todos os seus nós interferentes em *GC* aprendam sobre a atribuição.

Figura 12 – Fluxograma do Algoritmo de Coloração Distribuída.

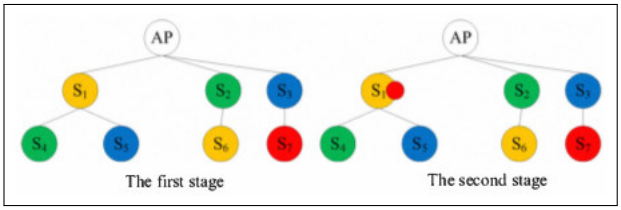


Fonte: (WU; WANG; LI, 2010)

Os passos do algoritmo na primeira fase são os seguintes:

- Na inicialização, o ID dos nós filhos dentro de um salto de cada nó são classificados em ordem crescente, a variável *j* denota as primeiras *j* posições. A variável *i* registra o número de cores em toda a rede, quando cada nó executa o algoritmo de coloração. O valor inicial de *i* é 1. A variável *Max* é utilizada para gravar o número máximo de cores, cujo valor inicial é 0.
- Após a execução do algoritmo, cada nó obtém um intervalo para transmissão.

Figura 13 – O resultado de ambos os estágios.

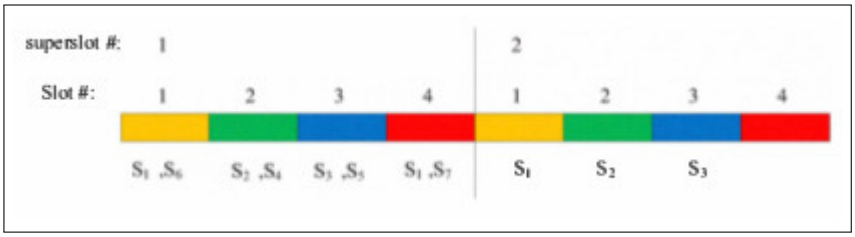


Fonte: (WU; WANG; LI, 2010)

3.2.3 Escalonamento TDMA Distribuído

De acordo com o algoritmo de coloração acima, cada cor corresponde ao número máximo de nós. Somente os nós de mesmas cores podem transferir dados simultaneamente a qualquer momento. A Figura 14 mostra o processo do escalonamento TDMA.

Figura 14 – Escalonamento TDMA Distribuído no TDMA-CA.



Fonte: (WU; WANG; LI, 2010)

3.3 PROTOCOLO AUTO-ORGANIZADO, FLEXÍVEL, EFICIENTE EM ENERGIA E DE BAIXA LATÊNCIA PARA REDES DE SENSORES SEM FIO

Os autores (GAJJAR; SARKAR; DASGUPTA, 2014) propuseram um protocolo auto-organizado, flexível, eficiente em energia e de baixa latência, chamado de SOFLEE (do inglês, *Self Organized, Flexible, Latency and Energy Efficient*). O SOFLEE é um protocolo *cross-layer* para redes de sensores sem fio baseado esquema de acesso ao meio TDMA combinado com múltiplos saltos e encaminhamento de informações durante a alocação do intervalo de tempo.

A interação entre a camada de enlace e protocolo de roteamento requer apenas que a comunicação entre os nós envolvidos aconteça durante seus intervalos de tempo associados. Isso resulta no uso eficiente dos recursos energéticos, memória e largura de banda. A alocação dos intervalos de tempo é feita centralmente pela *master station* (MS), estação mestre[4], para fornecer acesso a um meio livre de colisão. A estação mestre aloca o mesmo intervalo TXS para

[4] Estação mestre é outro nome que pode ser dado à estação base.

os nós que estão há dois saltos de distância a fim de aumentar a reutilização espacial do canal e diminuir a latência de dados. Cada nó utiliza a intensidade do sinal recebido, o RSSI, para estimar sua distância da MS.

Para a coleta de dados na MS, o SOFLEE usa um mecanismo chamado *parenthood willingness* a fim de transmitir os dados coletados através da árvore de roteamento enraizada na MS. Este mecanismo é uma operação binária, onde o nó f, por exemplo, decide se tornará pai do nó i se $PW(f)$ for 1. $PW(f)$ é determinado como está descrito abaixo:

$$PW(f) = \begin{cases} 1, & \text{se} \begin{cases} LC(i) > LC(f) \\ NC(f) \leq C_{max} \\ E_{res}(f) > E_{min-res} \\ SNR_{SCHM}(f) > SNR_{min-SNR} \end{cases} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{3.1}$$

$PW(f)$ é 1 se todas as condições de 3.1 forem satisfeitas. A primeira condição checa se o nó i está em um nível acima do nó f. Isso garante que o pacote vá na direção correta até a MS. A segunda condição limita o número de filhos que um nó pode ter, ou seja, o nó f só será pai de i se tiver um valor menor ou igual ao da variável C_{max}. A terceira condição garante que a energia residual do nó f permaneça acima de um valor mínimo. E a última condição assegura se o *link* de comunicação entre o nó i e f é confiável. Se PW(f) = 1, o nó f decide se tornar pai, então considera o remetente como seu filho e encaminha uma mensagem *SCHEDULE_MESSAGE* para o seu próprio nó pai, até chegar na MS. Essa mensagem contém informações para o registro de um nó na rede.

O mecanismo *parenthood willingness* de um nó é utilizado conforme:

(1) A sua localização em relação à MS para que os dados sejam transmitidos na direção correta.
(2) O número de nós filhos que o nó possui, pois muitos nós filhos podem causar congestionamento local.
(3) A sua energia residual para distribuir uniformemente a carga de energia por ser um nó pai.
(4) A confiabilidade na comunicação entre nó pai e nó filho para garantir uma entrega de dados consistente.

Os modos existentes no SOFLEE em que o sensores pode se encontrar são o de busca, harmonizado e escalonado. A MS sempre está no modo escalonado, o restante dos nós iniciam-se no modo de busca. No processo de registro a MS transmite para os nós uma *BEACON_MESSAGE*

para os nós sincronizarem seus relógios. Esta mensagem contém o intervalo de *beacon*, a duração do super-quadro, a duração do sub-quadro e a duração do intervalo.

A MS transmite periodicamente uma *SLOT_DISTRIBUTION_MESSAGE*, contendo o ID do nó, o número do intervalo de tempo alocado ao nó e os intervalos não alocados. O nó em modo de busca está escutando a rede quando recebe a *SLOT_DISTRIBUTION_MESSAGE* da MS e move-se para o modo harmonizado. Em seguida, ele seleciona um intervalo desocupado como seu TXS, seleciona um dos seus nós vizinhos no modo escalonado para ser o seu nó pai e envia uma *SCHEDULE_MESSAGE* tanto no intervalo CST como no intervalo TXS que escolheu.

Quando um nó escalonado ouve transmissão no intervalo CST, significa que um ou mais dos seus nós vizinhos pode defini-lo como pai, então ele escuta durante todos os seus intervalos ociosos para uma possível transmissão. Ao receber a mensagem *SCHEDULE_MESSAGE* do nó i, o nó f decide se tornará pai de i. Esta decisão é tomada através do mecanismo *parenthood willingness* com base no estado atual do nó referente a sua localização, o número de nós filhos existentes, a energia residual e a qualidade do *link* de comunicação. Se o nó f decidir se tornar pai, então o nó considera o remetente como seu filho e encaminha a mensagem *SCHEDULE_MESSAGE* para o seu próprio nó pai, até chegar na MS.

A MS, ao receber a *SCHEDULE_MESSAGE* encaminhada, aloca um intervalo TX desocupado de acordo com o pedido do nó remetente e adiciona as informações de atribuição dos intervalos de tempo TX na próxima *SLOT_DISTRIBUTION_MESSAGE*. Quando um nó no modo harmonizado ouve a *SLOT_DISTRIBUTION_MESSAGE* enviada pela MS, ele entra em modo escalonado e muda seus intervalos TXS para alocado pela MS. Seu pai usa a *SLOT_DISTRIBUTION_MESSAGE* para definir seus RXS como os TXS do seu nó filho. Depois que cada nó foi registrado na rede, a árvore de roteamento enraizada na MS é finalizada.

O protocolo SOFLEE foi criado com o objetivo de suprir as necessidades em várias aplicações de uma rede de sensores sem fio, como por exemplo: Eficiência energética, meios justos de acesso, confiabilidade na entrega de dados, baixa latência na transmissão de dados, adaptação aos padrões de tráfegos dinâmicos de aplicação, previsibilidade em relação a taxa de transferência de dados, robustez e simplicidade.

3.4 UMA APLICAÇÃO ESPECÍFICA DE UMA ARQUITETURA DE PROTOCOLO PARA REDES DE MICRO SENSORES SEM FIO

Os autores (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002) de-

senvolveram um protocolo de roteamento distribuído e hierárquico que tem o objetivo de estender o tempo de vida dos sensores, aumentando assim o tempo de vida da rede. Este protocolo combina as ideias de roteamento e meios de acesso baseado em conjuntos eficientes de energia, juntamente com a agregação de dados específicos para conseguir um bom desempenho em termos de vida útil do sistema e latência.

O protocolo foi desenvolvido para aplicações específicas. A aplicação que suporta típicas redes de micro sensores é o monitoramento de um ambiente remoto. Como os dados dos nós são muitas vezes correlacionados, o usuário final não necessita de todos os dados (redundantes). Em vez disso, o usuário necessita de uma função de alto nível de dados que descreva os eventos que ocorrem no ambiente. Uma vez que a correlação é mais forte entre os sinais de dados de nós localizados próximos uns aos outros, optou-se por utilizar uma infraestrutura de clusterização como base para o LEACH.

No LEACH, os nós se organizam entre si para a formação de grupos (*clusters*) e para a eleição de um líder (*cluter head*) para cada grupo. Assim, a rede é clusterizada de forma distribuída, não tendo nenhuma participação da estação base no cálculo para a formação dos *clusters*. Os algoritmos nesse protocolo propiciam uma clusterização adequada e um rotacionamento da posição dos líderes para distribuir uniformemente a carga de energia entre todos os nós.

Quando os *clusters* da rede são definidos, cada nó pertencente a um grupo envia seus dados ao líder. Ao receber os dados de todos os membros do seu grupo, o *cluster head* executa procedimentos em cima dos dados recebidos, como a fusão de dados, por exemplo, e transmite as informações para a estação base (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002). Como os líderes têm um papel importante dentro de cada grupo, eles acabam gastando mais energia do que os demais.

Para evitar que eles fiquem inoperantes rapidamente, o LEACH incorpora a rotação randomizada de alta energia entre a posição do *cluster head* e dos sensores para evitar gastar a bateria de qualquer sensor da rede. Desta forma, a carga de energia do *cluster head* é uniformemente distribuída entre os nós. A operação do LEACH é dividida em rodadas. Existem duas fases que compõem uma rodada: a fase de formação dos grupos (*clusters*) e a fase de coleta e transmissão de dados.

Na fase de formação dos grupos, um algoritmo distribuído elege os líderes e constrói os grupos. O objetivo é encontrar um certo número k de *clusters* durante cada rodada. Os nós não precisam ter conhecimento global da rede, podendo fazer decisões autônomas sem qualquer

centralização. Além disso, como os nós começam com a mesma energia, o objetivo é tentar distribuir uniformemente a carga de energia entre todos os nós da rede. Como ser um nó *cluster head* é muito mais desgastante em termos energético do que ser um nó comum, isto requer que cada nó tome sua vez como *cluster head*.

Cada sensor da rede decide se ele será ou não um *cluster head* de acordo com uma fórmula probabilística $P_i(t)$ no tempo t. A fórmula leva em consideração um número k desejável de *cluster heads* na rede e o fato de que um nó somente pode se tornar líder a cada N/k rodadas, onde N é o número total de nós na rede. A probabilidade $P_i(t)$ de um nó se tornar um *cluster head* é definida pela equação 3.2:

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N-k\cdot(r \bmod \frac{N}{k})} : & C_i(t) = 1 \\ 0 : & C_i(t) = 0 \end{cases} \tag{3.2}$$

onde:

N = Quantidade de nós na rede;

k = Número de *cluster heads* desejáveis para a rede;

i = Nó que calcula a probabilidade;

r = ID da rodada corrente indexado a partir do zero (0, 1, 2, 3,...);

$C_i(t)$ = Variável que indica se o nó i está elegível a se tornar *cluster head* no tempo t;

Portanto, somente os nós que ainda não tenham sido *cluster heads* recentemente, e que, presumivelmente, tem mais energia disponível do que os nós que já tenham sido, podem tornar-se *cluster heads* em $r + 1$ rodadas. O número esperado de nós que não tenham sido *cluster heads* nas primeiras r rodadas é $N - (k \cdot r)$. Após N/k rodadas, todos os nós devem ter sido *cluster heads* um vez. Assim, um ciclo de N/k rodadas se inicia novamente, onde cada nó pode se tornar *cluster head* uma outra vez. $C_i(t)$ será 1 se o nó estiver elegível para ser um *cluster head* no tempo t. Caso contrário será 0. O termo $\sum_{i=1}^{N} C_i(t)$ representa o número total de nós que são elegíveis a se tornarem um *cluster head* no tempo t. Isto assegura que a energia em todos os nós são aproximadamente iguais umas às outras após cada N/k rodadas.

Os nós que se tornam *cluster head* devem enviar uma mensagem para os outros nós da rede indicando que eles são os líderes daquela rodada. Assim, eles enviam uma mensagem de anúncio (*ADV-CH*) de forma *broadcast*. Cada nó do *cluster* que recebe esse anúncio determina quem será seu *cluster head* baseado na intensidade do sinal recebido, conhecido como RSSI (do

inglês, *Received Signal Strenght Intensity*), ou seja, nós CHs com maior força de sinal indicam maior proximidade e requerem menor gasto de energia na comunicação.

Um vez que o nó decide em qual grupo irá ficar, ele cria e envia uma mensagem de ingresso (*JOIN_REQ*) para o seu respectivo líder. Assim, os CHs armazenam os nós que pertencem ao grupo em que ele é líder. Os sensores que não recebem a mensagem de anúncio (*ADV-CH*) do *cluster head* acabam enviando seus dados diretamente pra a estação base. Para evitar colisões entre as mensagens de dados, um *cluster head* aloca intervalos de tempo para cada membro de seu *cluster*. Assim, cada nó do *cluster* transmite seus dados somente no seu intervalo TX e vai para um modo de baixo consumo (modo *sleep*) quando o tempo desse intervalo termina.

Após a fase de formação dos grupos, a fase de coleta de dados é iniciada. Nesse momento, os nós coletam as informações do ambiente, enviam para o seu líder que por sua vez envia para a estação base. Quando o tempo da rodada finalizar, todo o processo, fase de formação dos grupos e coleta de dados, se inicia novamente.

3.5 RELAÇÕES COM A PROPOSTA

A seguir é mostrado as conclusões acerca dos trabalhos relatados neste Capítulo, assim como suas contribuições para o embasamento da proposta e, consequentemente, no desenvolvimento do protocolo proposto, o RSOTP.

3.5.1 Protocolo SOTP

Pode-se concluir que o SOTP apresenta muitas vantagens ao ser aplicado em uma rede de sensores, porém o protocolo deixa lacunas que poderiam ser exploradas a fim de obter um melhor desempenho do protocolo na rede. O protocolo não escolhe uma abordagem ótima para a construção da árvore de roteamento. Esta árvore consiste nas rotas definidas a partir um sensor até a estação base, ou seja, um caminho de múltiplos saltos que consiste de um ou mais sensores até a estação base. Dessa forma conclui-se que o protocolo não definiu um melhor critério para a escolha do nó pai.

Uma deficiência que pode ser verificada no SOTP, é que ele não apresenta escalabilidade, pois limitando o número de intervalos de tempo, a rede não irá suportar, em determinado tempo que mais nós se registrem na rede já que não haverá intervalos de tempo disponíveis para eles. Ao implementar a ideia da reutilização dos intervalos de tempo é possível encontrar um número ótimo de intervalos de tempo necessário para suportar um grande quantidade de nós na

rede. O protocolo contribuiu significativamente em relação à implementação do escalonamento inverso e do processo de registro no protocolo RSOTP.

3.5.2 Protocolo TDMA-CA

O protocolo TDMA-CA foi criado para monitorar aplicações de alto risco. Ele consegue ser eficiente energeticamente e de baixa latência. Com o reaproveitamento intervalos de tempo pelo TDMA-CA é possível garantir que os nós possam transmitir ao mesmo tempo sem preocupação com interferência e colisões e a taxa de pacotes se torna grande em um mesmo período de tempo quando comparado com outros protocolos que não reaproveitam os intervalos TX, como o protocolo SOTP.

O protocolo limita o comprimento do pacote para todos os nós da rede a fim de garantir que cada nó envie e receba um pacote sem ultrapassar o tempo de transmissão do intervalo de tempo. Os nós neste protocolo conseguem alcançar vizinhos de um e dois saltos, aumentando a possibilidade de colisões, porém os nós que causam interferência aprendem a lidar com a atribuição de tempo para que depois não causem nenhum tipo de conflito e colisão. A ideia da reutilização dos intervalos de tempo no protocolo TDMA-CA através de um algoritmo de coloração contribuiu para o reuso dos intervalos no RSOTP.

3.5.3 Protocolo SOFLEE

Em relação ao protocolo SOFLEE pode-se concluir que para projetar protocolos para as redes de sensores é importante considerar a eficiência energética, a equidade de acesso ao meio, entrega de dados em tempo útil, a escalabilidade, a auto-cura da rede e as restrições de energia. Estes requisitos são levados em conta no SOFLEE. Um quadro comum para rota criada e para a transferência de dados reduz a complexidade de implementação em nível de software e hardware.

O uso do TDMA garante imparcialidade e evita grande desperdício de energia decorrentes de escutas ociosas, colisão e escutas desnecessárias. Compartilha os intervalos TX entre os nós que não estão dentro da faixa de interferência de outro nó e diminui a latência de dados. O protocolo SOFLEE contribui na implementação do reuso de intervalos centralizado na estação base, assim como no processo de registro adotado.

3.5.4 Protocolo LEACH

O protocolo LEACH foi criado para aumentar o tempo de vida da rede, através de

suas características de agregação de dados e tempo de rodada, na qual todos os nós tornam-se *cluster heads* pelo menos uma vez. Objetivo de dividir o tempo em rodadas é de distribuir igualitariamente o consumo de energia entre os sensores da rede. Porém, por ser um protocolo probabilístico e distribuído pode realizar uma clusterização ruim e com isso contribuindo para um maior consumo de energia.

O LEACH adota um esquema de acesso ao meio através do uso do TDMA nos grupos formados, alocando intervalos de tempo distintos para os membros dos *clusters*. Por utilizar o TDMA nos grupos, regiões específicas onde os sensores se encontram com baixa potência, e por possuir aspectos de roteamento, tais características contribuíram no desenvolvimento do protocolo RSOTP e na escolha de usar o LEACH na validação do protocolo proposto.

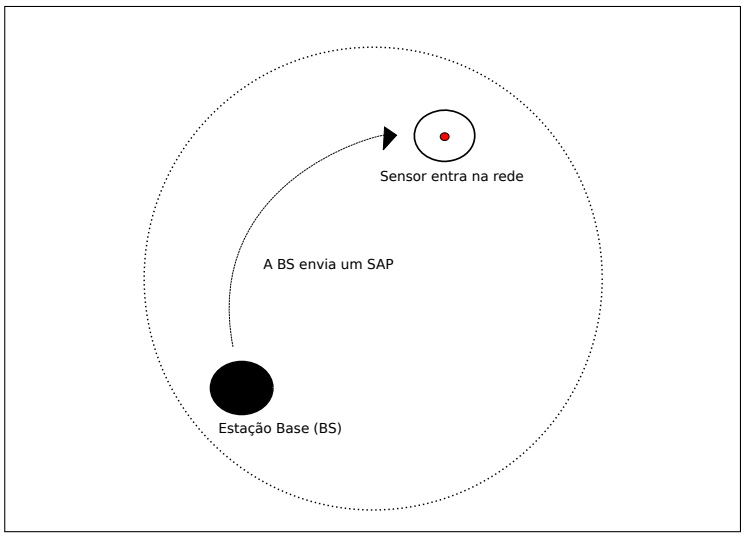
4 PROPOSTA

A proposta deste trabalho é desenvolver um protocolo TDMA que ofereça um reuso dos intervalos de transmissão através de um escalonamento TDMA, além de melhorias relacionadas ao roteamento da rede. O reuso dos intervalos de transmissão irá potencializar o ciclo de trabalho dos sensores e tornar eficiente a coleta de dados da estação base. Este reaproveitamento tornará a rede altamente escalável, ou seja, não sendo preciso aumentar o número de intervalos de tempo a medida que mais nós sensores sejam inseridos na rede. Para obter este aprimoramento em relação ao escalonamento da rede foi utilizado o modelo de coloração de grafos.

A coloração de grafos em uma rede de sensores consiste em atribuir cores, as quais estão associadas aos intervalos de tempo disponíveis no quadro, aos sensores da rede. A medida que os nós forem se registrando na rede serão alocados a eles estes intervalos e cada intervalo está associado a uma determinada cor. Para que outro nó, ainda não registrado ou recentemente adicionado na rede, possa utilizar um intervalo que já esteja sendo utilizado por outro sensor devem ser satisfeitas algumas condições. Estas condições serão explicadas na subseção 4.1.2 da seção 4.1.

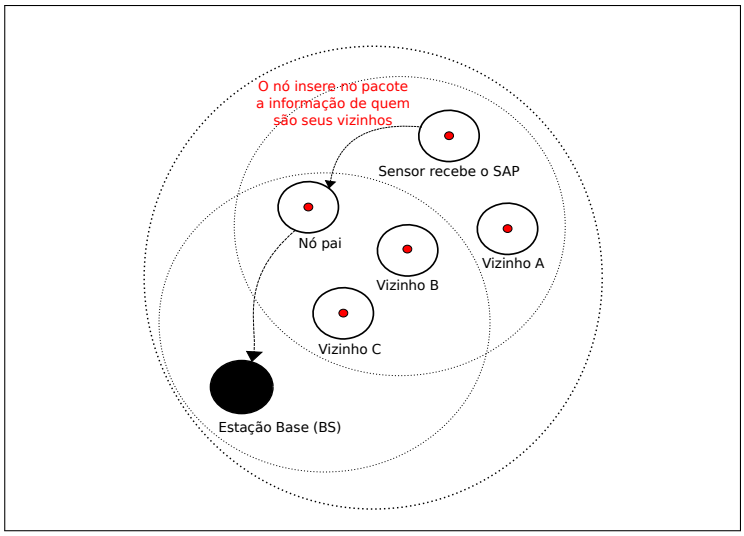
A partir das implementações propostas, referentes ao reuso dos intervalos de transmissão e das melhorias relacionadas ao roteamento, foi possível o desenvolvimento de um novo protocolo TDMA baseado em coloração de grafos para redes de sensores sem fio, o protocolo RSOTP (*Reuse of Slots for the Self-Organized TDMA Protocol*). As Figuras 15, 16 e 17 descrevem o processo de registro dos nós sensores junto à estação base no protocolo RSOTP. O processo de registro é semelhante ao de (WANG *et al.*, 2006), porém difere em alguns pontos referentes a implementação da reutilização dos intervalos de transmissão.

Figura 15 – Estado de Busca do protocolo RSOTP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Estado de Sincronização do protocolo RSOTP.



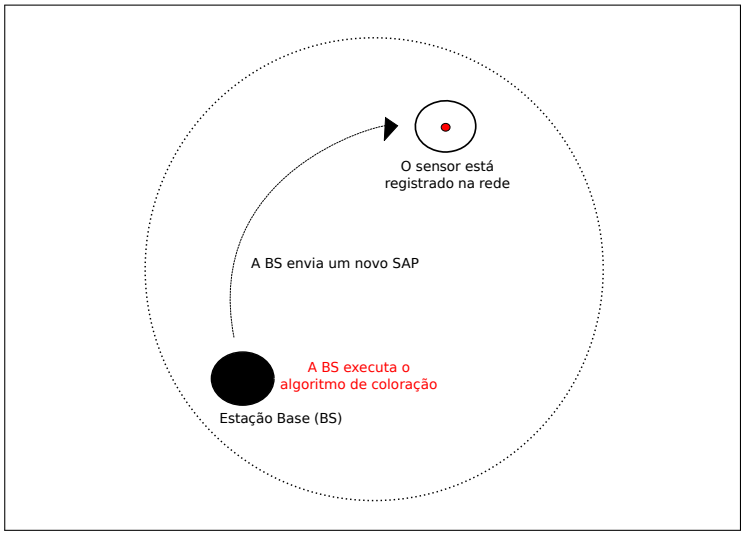
Fonte: Elaborado pelo autor.

No estado de sincronização, por exemplo, o sensor depois de escolher um nó pai e um intervalo desocupado a partir das informações contidas no último SAP transmitido pela estação base, ele envia estas informações em um pacote de registro para seu nó pai, porém essas informações são acrescidas com a matriz de adjacência referente aos vizinhos do sensor. Quando o pacote chega até a estação base, a matriz é preenchida com bit 1 para os ID's referentes aos nós vizinhos e com bit 0 aos nós que não são vizinhos.

De posse dessa informação, a estação aplica o algoritmo de coloração, descrito na subseção 4.1.2 da seção 4.1. Com isso, a estação base verifica se é possível reutilizar algum intervalo pertencente a algum nó registrado. Caso contrário, ele aloca um dos intervalos

desocupados pertencentes ao quadro. Feito isso, a estação registra o nó sensor.

Figura 17 – Estado de Registro do protocolo RSOTP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na seção seguinte será descrita a metodologia aplicada ao trabalho, na qual serão explicadas detalhadamente as melhorias relacionadas ao roteamento, o modelo de coloração de grafos aplicado visando a implementação do reuso dos intervalos, além de outros detalhes observados durante as fases de implementação.

4.1 METODOLOGIA

Para a entrada dos nós no processo de registro junto à estação base foi criada uma heurística de ordenação, implementada como aprimoramento do roteamento da rede no protocolo RSOTP. Para a construção da árvore de roteamento foi implementado o critério de escolha para o nó pai através da distância entre dois pontos. As duas próximas subseções são destinadas a descrever em detalhes as melhorias relacionadas ao roteamento e escalonamento da rede, respectivamente.

4.1.1 Melhorias Relacionadas ao Roteamento da Rede

As rotas que interligam um sensor até a estação base são chamadas de caminhos de múltiplos saltos. Por utilizar-se de múltiplos saltos para o tráfego das informações, o protocolo SOTP adota a estratégia do escalonamento inverso, explicada no Capítulo 3, subseção 3.1. Esta estratégia diminui o atraso em transmissões de múltiplos saltos, pois aumenta a probabilidade de

que as informações transmitidas por um nó chegue à estação base em um único quadro. Esta estratégia também é adotada no RSOTP, porém quando há muitas reutilizações de intervalos de tempo e um nó pai com vários nós filhos, não há garantia de que as informações de todos os nós cheguem em único quadro. De qualquer forma diminui-se o número de quadros necessários para que as informações cheguem até a estação base, o que não aconteceria se não fosse adotada essa estratégia no protocolo proposto.

A fim de obter eficiência na implementação do escalonamento inverso foi criada uma heurística para a ordenar a entrada dos nós no processo de registro. Para isso foi dado aos nós localizados mais próximos à estação base, os intervalos de tempo dispostos no final do quadro e aos nós localizados distantes, os intervalos de tempo disponíveis no começo do quadro, após os intervalos de tempo 0 e 1, que são os intervalos de *Broadcast* (BR) e *Carrier Sensing* (CS), respectivamente. Para isso foi criado um cálculo que retorna o tempo em que o nó irá esperar para entrar no processo de registro. Dessa forma, os nós que estão próximos à estação base irão esperar menos tempo pra entrar no processo de registro do que os nós mais distantes à estação.

Abaixo podemos ver a heurística criada para obter a ordenação dos nós em relação à entrada no processo de registro.

Algoritmo 2: Algoritmo de Ordenação

Entrada: n nós sensores
Saída: Tempo de espera t

1 **início**
2 **para** *i de 1 a n* **faça**
3 Fazer a distância relativa entre i e a Estação Base pela fórmula:
4 $Dist_{iBS} = \sqrt{(i_X - BS_X)^2 + (i_Y - BS_Y)^2}$
5 E fazer a divisão: $t = Dist_{iBS}/1.5$
6 **fim**
7 **fim**
8 **retorna** *t*

Onde i representa o ID de cada sensor e n o número de nós inseridos da rede. O cálculo da distância relativa entre cada sensor e a estação base tem como resultado o valor da distância em metros entre o sensor e a estação base. Essa distância representada pela variável $Dist_{iBS}$ é dividida por 1.5, valor esse que foi definido empiricamente a partir do comportamento dos nós na rede através de mais de 50 simulações, para cada topologia simulada. O valor dessa divisão é o tempo de espera pra cada nó entrar no processo de registro. Com esse algoritmo evita-se que todos os nós tentem se registrar ao mesmo tempo e que não precisem esperar tanto

tempo para entrar no processo de registro junto à estação base, minimizando o tempo de registro de todos os nós na rede.

Em relação a construção da árvore de roteamento, o critério de escolha do nó pai/filho implementado está relacionado com as distâncias dos sensores que querem se registrar, as distâncias dos seus vizinhos e da estação base. Dessa forma o nó escolhido para ser o nó pai será o sensor que estiver na melhor posição entre o nó que quer se registrar e a estação base quando comparado aos outros vizinhos do nó que está no processo de registro. Com a escolha deste critério de nó pai/filho espera-se que a rede obtenha tanto uma comunicação estável entre os sensores como uma considerável economia de energia, levando a um aumento no tempo de vida da rede.

$$D_{NV} = \sqrt{(N_X - V_X)^2 + (N_Y - V_Y)^2} \tag{4.1}$$

$$D_{VBS} = \sqrt{(V_X - BS_X)^2 + (V_Y - BS_Y)^2} \tag{4.2}$$

$$D_{NBS} = \sqrt{(N_X - BS_X)^2 + (N_Y - BS_Y)^2} \tag{4.3}$$

onde:

D_{NV} = Distância entre o nó e cada vizinho;

D_{VBS} = Distância entre cada vizinho e a Estação Base;

D_{NBS} = Distância entre o nó e a Estação Base;

N_X = Coordenada X do nó;

N_Y = Coordenada Y do nó;

V_X = Coordenada X do vizinho;

V_Y = Coordenada Y do vizinho;

BS_X = Coordenada X da Estação Base;

BS_Y = Coordenada Y da Estação Base;

A sincronização em um protocolo TDMA é muito importante visto que causa um impacto significativo no consumo de energia e nas transmissões de cada nó sensor. Com as equações mostradas a seguir, e utilizadas nas implementações, é possível fazer com que cada

nó sensor transmita somente no intervalo de transmissão alocado a eles, fiquem em modo de recepção quando os nós filhos ou a estação base estão transmitindo e fiquem com o rádio desligado (*sleep*) nos intervalos ociosos.

$$TempoQAtual = TempoAtual(mod)(Nslot \cdot Dslot) \tag{4.4}$$

onde:

TempoQAtual = Tempo percorrido do quadro atual;

TempoAtual = Tempo atual da simulação;

Nslot = Número de intervalos de tempo;

Dslot = Duração do intervalo de tempo;

$$SlotAtual = \frac{TempoQAtual}{Dslot} \tag{4.5}$$

onde:

SlotAtual = Intervalo de tempo atual;

TempoQAtual = Tempo percorrido do quadro atual;

Dslot = Duração do intervalo de tempo;

A equação 4.4 refere-se ao tempo percorrido do quadro atual em que o sensor se encontra. Este valor é encontrado através do resto da divisão (*mod*) entre o tempo atual em que a simulação se encontra e o tempo de duração do quadro. A equação 4.5 refere-se ao intervalo de tempo atual em que o sensor se encontra. Com essa equação, o sensor é capaz de descobrir em que intervalo do quadro ele se encontra no momento e transmitir somente no seu intervalo de transmissão, ficar em determinados intervalos em modo recepção para receber os pacotes provenientes dos nós filhos, os pacotes *SAP* da estação base e escutar o intervalo de detecção de portadora. E, finalmente, desligar o rádio nos intervalos ociosos, ou seja, nos intervalos que não são nem de transmissão e nem de recepção.

Há situações em que o nó precisa ir diretamente para um intervalo de tempo específico a fim de começar a colher e transmitir informações ou desligar o rádio. Por exemplo, assim que o sensor recebe o *SAP* da estação base o informando que está registrado, ele já pode começar a transmitir informações, dependendo da posição do seu intervalo de transmissão no quadro. Pois, se o próximo intervalo de tempo no quadro não for o seu intervalo de transmissão e

nem de recepção, então no intervalo seguinte o nó desliga o rádio a fim de economizar energia, permanecendo desligado até o intervalo de recepção (*RX*) ou de transmissão (*TX*). Caso contrário, a partir do intervalo em que se encontra e do tempo já percorrido neste intervalo, pode-se fazer um cálculo que retorna o tempo em que o nó tenha que esperar para entrar no começo do seu intervalo de transmissão e assim não correr o risco de suas informações não serem transmitidas por não haver tempo hábil para as transmissões.

Para isto é preciso satisfazer uma das duas condições abaixo:

1) O intervalo de transmissão alocado para o nó é maior que o intervalo de tempo atual;
2) O intervalo de transmissão alocado para o nó é menor ou igual ao intervalo de tempo atual;

$$dx = TempoQAtual(mod)Dslot \tag{4.6}$$

onde:
dx = Tempo percorrido do intervalo de tempo atual;

$$((SlotTX - SlotAtual) \cdot Dslot) - dx \tag{4.7}$$

$$(((Nslot - SlotAtual) \cdot Dslot) - dx) + (SlotTX \cdot Dslot) \tag{4.8}$$

onde:
SlotTX = Intervalo de transmissão do sensor;

A equação 4.6 refere-se ao tempo já percorrido pelo sensor no intervalo de tempo em que se encontra, esta equação é necessária, pois com o valor da variável *dx* é que o nó sensor irá fazer uso do próximo intervalo de tempo desde o início. Quando o intervalo de transmissão do sensor satisfazer a primeira condição, o nó irá fazer uso da equação 4.7, caso contrário será a equação 4.8.

4.1.2 Melhorias Relacionadas ao Escalonamento da Rede

O aprimoramento do escalonamento da rede no protocolo RSOTP se deve a implementação da reutilização dos intervalos de transmissão. Para implementar o reuso dos intervalos

TX já utilizados por nós registrados na rede, utilizou-se o modelo de coloração de grafos, mais precisamente a coloração de vértices. Primeiramente é criado um grafo de conflitos, este grafo é construído através da matriz de adjacência armazenada na estação base. Esta matriz é criada a partir das informações fornecidas por cada sensor presente na rede, durante o processo de registro. Com este grafo, a estação base sabe a vizinhança de cada sensor. Logo depois é atribuída uma cor para cada nó da rede, sendo que esta cor é associada a cada intervalo de tempo existente no quadro TDMA, com exceção do intervalo BR e do intervalo CS, cuja função destes intervalos já foi explicada no subseção 3.1 do Capítulo 3. Para que os nós possam ser coloridos com a mesma cor, ou seja receberem o mesmo intervalo TX de outros sensores, eles devem satisfazer as seguintes condições:

1) Os nós não podem possuir o mesmo intervalo TX dos seus vizinhos, assim a transmissão de um não interferirá na transmissão do outro, evitando a ocorrência de conflitos, como por exemplo, o problema do terminal exposto.
2) Os nós não podem possuir o mesmo intervalo TX dos vizinhos do nó pai escolhido, assim evitará a ocorrência do problema do terminal oculto em que dois nós que estão fora do alcance um do outro acabam transmitindo ao mesmo tempo para um mesmo nó, pois em redes de sensores um sensor transmite para todos os nós que estão dentro do seu raio de alcance e não somente para o nó destinatário.
3) Os nós não podem possuir o mesmo intervalo TX dos nós filhos de seus vizinhos, assim também evita outra possibilidade de ocorrência do problema do terminal oculto, evitando que ocorra colisão de dados em um dos seus vizinhos quando transmitir para todos os sensores que estão no seu raio de transmissão.

O algoritmo que retrata a coloração dos sensores a partir dos seus intervalos de transmissão, segue abaixo:

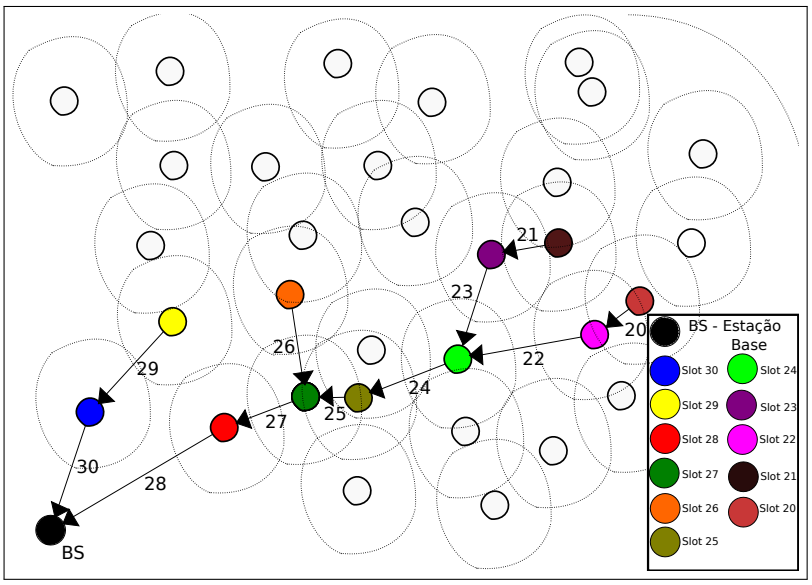
Algoritmo 3: Coloração de um sensor

```
Entrada: Sensor, matriz de adjacência e o vetor de slots
Saída: A maior cor adequada para o sensor x
1  início
2      Criar vetor D[1,..,s] para guardar os slots disponíveis para o nó x
3      para i de 1 a s faça
4          D[i] = 1 // Todos os slots estão disponíveis inicialmente
5      fim
6      Seja Slot(i) a função que retorna o slot do nó i
7      para cada vizinho i de x no grafo de conflitos faça
8          D[Slot(i)] = 0 // Não está disponível, pois se o nó i transmitir ao mesmo tempo que
             o nó x, o nó y não receberá a mensagem corretamente
9      fim
10     para cada vizinho i de x no grafo de conflitos faça
11         para cada filho j de i no grafo de conflitos faça
12             D[Slot(j)] = 0 // Não está disponível, pois se o nó j transmitir ao mesmo tempo
                 que o nó x, o nó i não receberá a mensagem corretamente
13         fim
14     fim
15 fim
16 retorna Slot(x) = maior slot disponível em D (com valor 1)
```

A Figura 18 mostra um exemplo de utilização do protocolo SOTP em alguns nós da rede. Nesta imagem é possível ver a disposição dos nós em uma área de total alcance da estação base, com cada nó possuindo o seu próprio raio de transmissão. Cada nó apresenta uma cor diferente, visto que cada nó possui o seu próprio intervalo de transmissão. Neste exemplo, podemos ver que há 11 nós registrados junto à estação base com cada um transmitindo no seu próprio intervalo, sendo necessários 11 intervalos para cada nó conseguir transmitir suas informações.

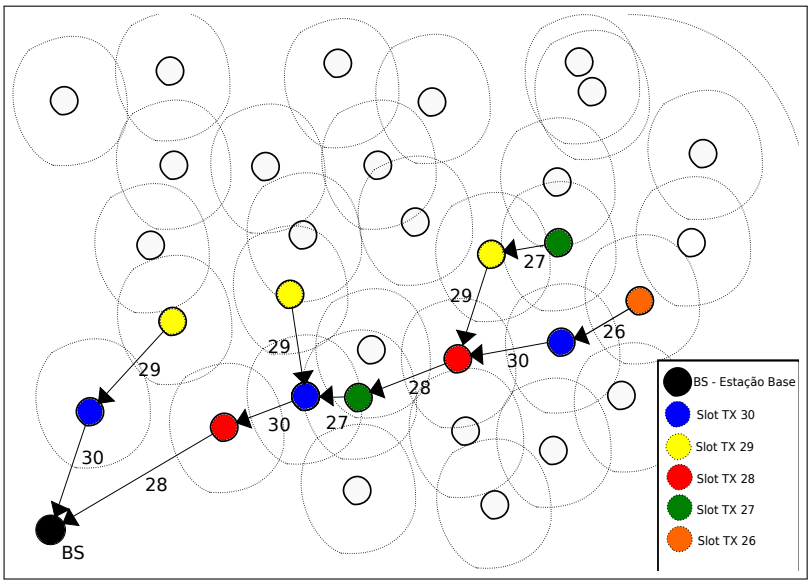
Já a Figura 19 mostra um exemplo de utilização do protocolo RSOTP em alguns nós da rede. Para um mesmo cenário e a mesma quantidade de nós registrados podemos ver que houve reutilização dos intervalos de transmissão, pois quando a estação base aplicou o algoritmo de coloração nos sensores foi possível reaproveitar os intervalos sem causar interferência e conflito nas transmissões dos outros nós da rede. Assim, neste exemplo com 11 nós registrados foram precisos somente 5 intervalos de transmissão, um aproveitamento superior a 50% quando comparado à rede da Figura 18.

Figura 18 – Exemplo de utilização do protocolo SOTP em alguns nós da rede.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Exemplo de utilização do protocolo RSOTP em alguns nós da rede.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a simulação e análise dos resultados do protocolo SOTP, do protocolo RSOTP e do protocolo LEACH foram utilizadas três topologias diferentes para uma mesma área de cobertura. As topologias de 50, 100 e 150 sensores serão analisadas em uma área de cobertura de 100m x 100m. Os detalhes acerca dos cenários e parâmetros utilizados para as simulações e da análise e verificação dos resultados obtidos serão descritos no Capítulo 5.

5 RESULTADOS

Neste Capítulo são mostrados os detalhes acerca dos cenários e parâmetros utilizados nas simulações realizadas para os protocolos RSOTP, SOTP e LEACH, assim como os resultados obtidos. O protocolo LEACH foi escolhido para as simulações por ser um protocolo de redes de sensores que faz uso de intervalos de tempo (TDMA) e por ser bastante difundido na literatura, porém em algumas métricas a comparação com os protocolos RSOTP e SOTP se mostrou difícil por conta das características que são muito diferentes. [1,2]

5.1 CENÁRIOS E PARÂMETROS DA REDE E DO SIMULADOR

Os sensores foram depositados no ambiente de forma aleatória seguindo uma distribuição uniforme e não possuindo nenhum aspecto de mobilidade. Cada nó, exceto a estação base, foi configurado com uma energia inicial de 10 joules para que as simulações não demorassem muito tempo. A estação base foi configurada com uma energia inicial de 99999 joules, este valor é o máximo permitido pelo simulador. Este valor foi utilizado visto que a estação base é dotada de uma fonte ilimitada de energia. A Tabela 2 mostra os cenários utilizados nas simulações de cada protocolo. As Figuras 20, 21 e 22 apresentam exemplos da topologia da rede para cada cenário, já que os sensores são depositados de forma aleatória.

Tabela 2 – Cenários utilizados para as simulações dos protocolos.

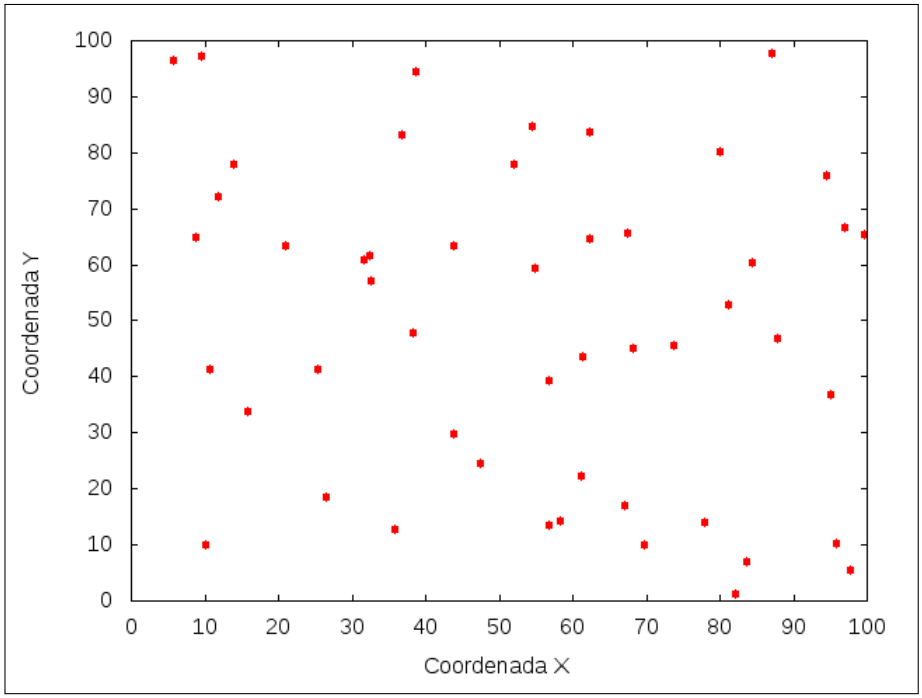
Cenário	Quantidade de Nós	Área (m x m)	Posição da Estação Base
1	50	100 x 100	(10, 10)
2	100	100 x 100	(10, 10)
3	150	100 x 100	(10, 10)

Fonte: Elaborado pelo autor.

[1] Para escrever os códigos das implementações foi utilizada a linguagem de programação **C++**. Para a simulação da rede foi utilizado o ***Castalia***, na versão **3.3** (BOULIS, 2011. 120 p). Este *software* é um simulador de eventos discretos específicos para redes de sensores sem fio, sendo uma extensão do simulador de redes ***OMNeT++***, cuja versão utilizada foi a **4.6** (VARGA, 2014. 428 p). O Castalia oferece modelagens realísticas do canal sem fio, gerenciamento da bateria e módulos de rádio de cada sensor.

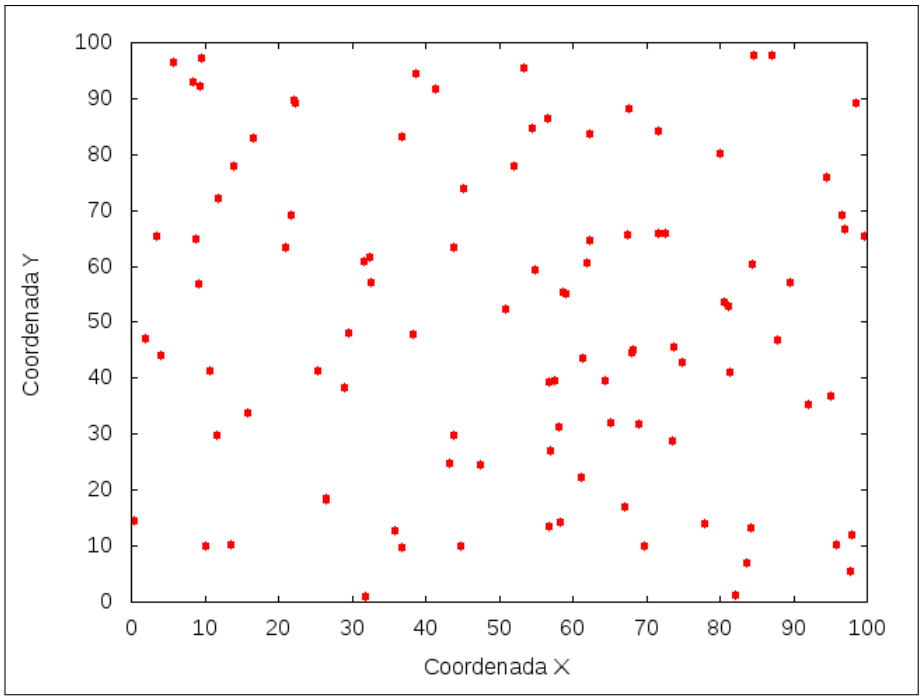
[2] O *link* para o *download* dos protocolos implementados, os protocolos RSOTP e SOTP, é o seguinte: https://www.dropbox.com/s/e0aqof3xi00ogmz/Codigos.zip

Figura 20 – Topologia do Cenário 1.



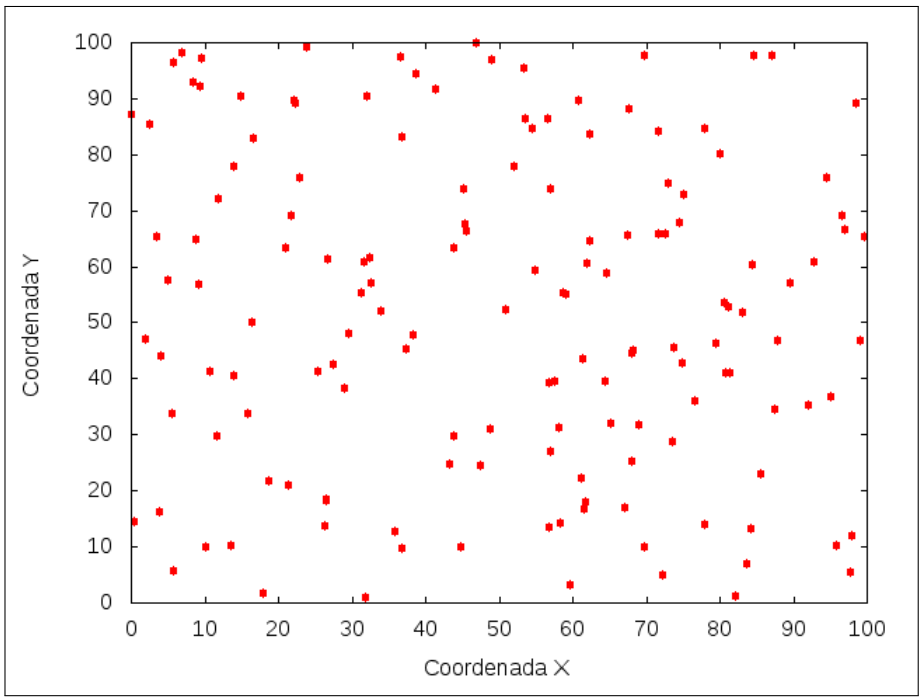
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Topologia do Cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Topologia do Cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os protocolos foram executados em execuções parciais de 200, 400, 600, 800 e 1000s a fim de obter um resultado comparativo para as métricas analisadas em cada um desses períodos. As métricas analisadas serão mostradas na sessão 5.3 deste Capítulo. O parâmetro do simulador *Sigma* foi configurado com o valor padrão do simulador, 4.0. O parâmetro *BidirectionalSigma* também foi configurado com o valor padrão do simulador, 1.0. A configuração desses dois parâmetros com esses valores indica que os enlaces entre dois nós quaisquer apresentam diferentes forças de sinal. O parâmetro *PathLossExponent* foi configurado com 1.4 para todos os cenários. Esse parâmetro indica quão rápido a força do sinal é enfraquecida.

O simulador também apresenta modelagens de módulos reais que podem ser utilizados na simulação carregando-se determinados arquivos. O arquivo CC2420.txt define um rádio real de mesmo nome desenvolvido pela empresa *Texas Instruments*. Nesse arquivo são definidas, por exemplo, as potências máxima e mínima que um sensor possui para transmitir um dado. A estação base foi configurada com a potência máxima disponível neste arquivo, a fim de que seu raio de transmissão alcance todos os nós da rede. Já os sensores foram configurados com uma potência muito baixa, no intuito que seus raios de transmissão alcance somente os nós vizinhos de um salto.

Tabela 3 – Parâmetros da Rede.

Posição dos Nós	Energia Inicial	Tempo de Simulação	Mobilidade
Aleatória	10 Joules	200, 400, 600, 800 e 1000s	Estático

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Parâmetros do Simulador.

Sigma	BidirectionalSigma	PathLossExponent	RadioParametersFile	TxOutputPower
4.0	1.0	1.4	"../Parameters/Radio/CC2420.txt"	-15dBm

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 PARÂMETROS DOS PROTOCOLOS SIMULADOS

O valor configurado para a duração do intervalo de tempo nos três protocolos foi de *5 milissegundos*. Esse valor foi escolhido com base em outros trabalhos acadêmicos e científicos. Os valores dos parâmetros *Tempo de Rodada* e *Probabilidade - $P_i(t)$* usados para as simulações do protocolo LEACH foram calculados para cada cenário de acordo com (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002). O tamanho do pacote de dados configurados para os três protocolos foi de *128 bytes* baseado em (WANG *et al.*, 2006). A taxa de dados gerada no protocolo LEACH foi configurada de acordo com a taxa de dados do SOTP, levando-se em conta a quantidade de dados que os nós no SOTP conseguem transmitir durante todo o intervalo TX em cada cenário.

O tamanho do quadro na simulação do protocolo SOTP para os cenários 1, 2 e 3 foram configurados com os valores de *0.255 segundos*, *0.505 segundos* e *0.755 segundos*, respectivamente. Já para o protocolo RSOTP, de acordo com a quantidade de intervalos de transmissão necessária para cada topologia, os cenários 1, 2 e 3 foram configurados para *0.18 segundos*, *0.305 segundos* e *0.355 segundos*, respectivamente. O tamanho do quadro no LEACH é determinado dinamicamente durante a formação dos *clusters*.

A quantidade desejável de *clusters* para cada cenário foi calculada de acordo com a equação 5.1 que pode ser encontrada em (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002). Considerando as energias de amplificação E_{fs} = 10pj e E_{mp} = 0.0013pj, foram encontrados os valores aproximados de 3 *clusters* para o primeiro cenário e 5 *clusters* para o segundo e o terceiro cenários.

$$k = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \cdot \frac{M}{d^2_{toBS}} \tag{5.1}$$

onde:

N = Número de nós da rede;

E_{fs} e E_{mp} = Energias de amplificação do rádio transmissor;

M = Dimensão de uma rede MxM;

d^2_{toBS} = Distância do nó mais distante da Estação Base;

Tabela 5 – Parâmetros do Protocolo SOTP.

Cenário	Duração do Intervalo	Tamanho do Quadro	Tamanho do Pacote de Dados
1	0.005s	0.255s	128 bytes
2	0.005s	0.505s	128 bytes
3	0.005s	0.755s	128 bytes

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Parâmetros do Protocolo RSOTP.

Cenário	Duração do Intervalo	Tamanho do Quadro	Tamanho do Pacote de Dados
1	0.005s	0.18s	128 bytes
2	0.005s	0.305s	128 bytes
3	0.005s	0.355s	128 bytes

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Parâmetros do Protocolo LEACH.

Cenário	Tempo de Rodada	Duração do Intervalo	Qt. de *Clusters*	Tamanho do Pacote de Dados
1	17s	0.005s	3	128 bytes
2	20s	0.005s	5	128 bytes
3	30s	0.005s	5	128 bytes

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO

Os resultados obtidos foram comparados de acordo com as seguintes métricas:

- **Aproveitamento dos slots (intervalos):** Nesta métrica é possível verificar a eficácia do protocolo quanto a quantidade necessária de intervalos de transmissão para atender cada cenário. O objetivo é verificar que para uma mesma quantidade de nós na rede é possível minimizar o número de intervalos necessários.
- **Quantidade de dados recebidos pela Estação Base:** Esta métrica representa a quantidade de dados que foram corretamente entregues à Estação Base durante o tempo máximo de funcionamento da rede. Quanto maior essa quantidade de dados, melhor a avaliação dos eventos que acontecem no ambiente. O objetivo é verificar qual protocolo maximiza essa métrica.
- **Eficiência de coleta:** Com esta métrica é possível verificar a quantidade de pacotes coletados pela estação base por energia gasta. O objetivo é medir a eficiência da rede na coleta de dados e verificar qual protocolo maximiza essa métrica.
- **Tempo de morte do primeiro nó:** Esta métrica checa o tempo de cobertura da rede, ou seja, o tempo em que a rede trabalhou 100% na coleta de dados. Uma vez que um nó morre, a cobertura deixa de ser total. Dessa forma, pretende-se maximizar esse tempo de cobertura da rede.
- **Tempo de vida da rede (80% de nós mortos):** Com esta métrica, é possível verificar qual protocolo conseguiu estender ao máximo o funcionamento da rede. O objetivo é verificar qual protocolo maximiza essa métrica.
- **Consumo médio de energia por nó:** Nesta métrica é avaliada a economia de energia para os sensores da rede. O objetivo é verificar qual protocolo minimiza essa métrica.

5.4 ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados das simulações nos três cenários definidos. Os três protocolos foram executados nos seguintes tempos de simulação: 200, 400, 600, 800 e 1000s. O objetivo é analisar o comportamento dos protocolos em relação às métricas citadas na seção 5.3 e verificar se houve ganho ou perca entre os períodos de tempo executados.

5.4.1 Aproveitamento dos Slots

Essa métrica foi simulada somente para os protocolos RSOTP e SOTP, pois no protocolo LEACH, a formação dos *clusters* e o tamanho do quadro acontecem de forma dinâmica, e consequentemente, o número de intervalos de transmissão necessários para cada *cluster* varia,

ficando difícil estimar uma quantidade certa de intervalos utilizados em cada cenário. A Figura 25 apresenta a quantidade de intervalos de transmissão necessários para cada cenário. Nessa métrica, o protocolo proposto, o RSOTP, precisou de menos intervalos de tempo em comparação ao protocolo SOTP.

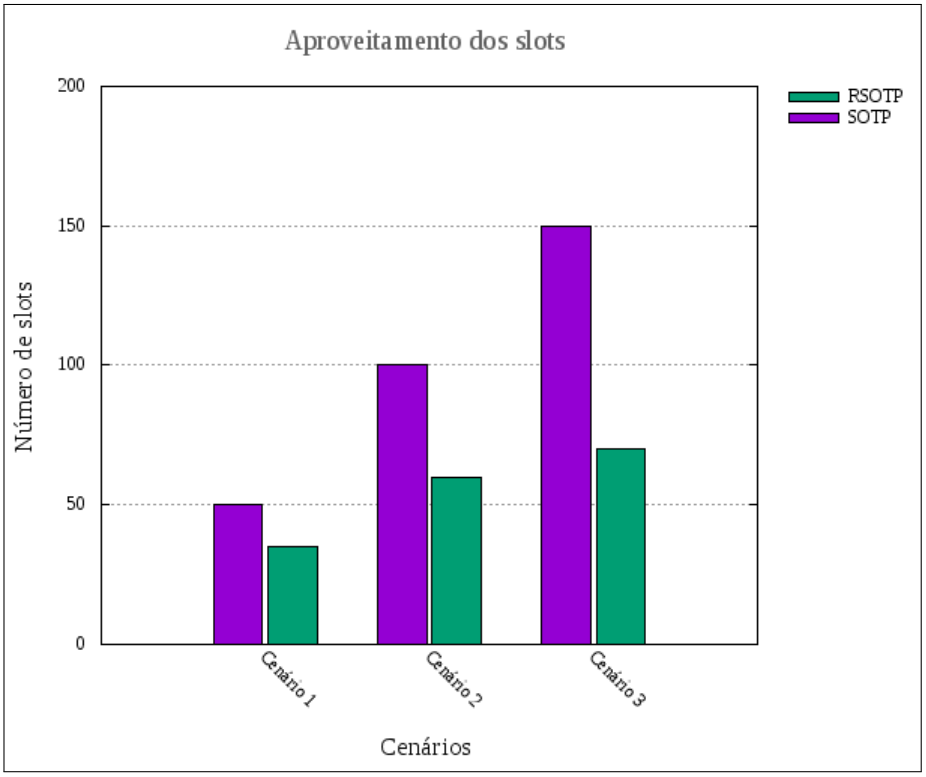
Como não há reutilização no protocolo SOTP, a quantidade necessária de intervalos em cada cenário, equivale a quantidade de nós presentes na rede. No cenário 1, foram precisos 50 intervalos TX para os nós no SOTP, já no RSOTP, de acordo com as simulações realizadas para diferentes distribuição dos nós, a quantidade de intervalos TX varia entre 23 e 27 intervalos. Para uma margem de segurança[3], estabelecida de acordo com as simulações realizadas, foi definido que o protocolo RSTOP garante 35 intervalos TX para o cenário 1. A partir disso, o protocolo RSOTP apresenta uma taxa entre 30-46% de eficiência em relação ao aproveitamento dos slots em comparação ao SOTP.

No cenário 2, foram precisos 100 intervalos TX para os nós no SOTP, enquanto no RSOTP, as simulações variaram entre 41 e 50 slots. A margem de segurança adotada foi de 60 intervalos TX. Apresentando assim, uma taxa de eficiência entre 40-50% em comparação ao SOTP. No cenário 3, foram precisos 150 intervalos TX para os nós no SOTP e no RSOTP, de acordo com as simulações, foram precisos entre 61 e 63 slots. A margem de segurança definida foi de 70 intervalos TX. A taxa de eficiência em relação ao aproveitamento dos slots no RSOTP foi entre 53.33%-58% comparado ao SOTP. A tabela 8 exibe os limites inferior e superior[4] da quantidade de intervalos TX e a margem de segurança adotada de acordo com as simulações realizadas para o protocolo RSOTP em cada cenário.

[3] Para a métrica de *Aproveitamento de Slots*, cada cenário utilizando o protocolo RSOTP, foi simulada 35 vezes, sendo que para cada simulação foi escolhida uma semente diferente. O tempo de execução para estes testes foi de 200s, pois foi observado que este era o tempo máximo para que todos os nós da rede se registrassem. O objetivo dessas simulações foi definir uma margem de segurança ao protocolo RSOTP em relação a esta métrica.

[4] Os limites inferior e superior representam o menor e maior resultado apresentado, respectivamente, nas simulações realizadas.

Figura 23 – Número de slots necessários para cada Cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Resultados do Aproveitamento dos Slots no RSOTP.

Cenário	Limite Inferior	Limite Superior	Margem de Segurança
1	23 slots	27 slots	35 slots
2	41 slots	50 slots	60 slots
3	61 slots	63 slots	70 slots

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 9 exibe a taxa de eficiência do protocolo RSOTP em relação ao SOTP para os três cenários.

Tabela 9 – Resultados do RSOTP em relação ao SOTP.

Cenário	Taxa de Eficiência
1	30-40%
2	40-50%
3	53.33-58%

Fonte: Elaborado pelo autor.

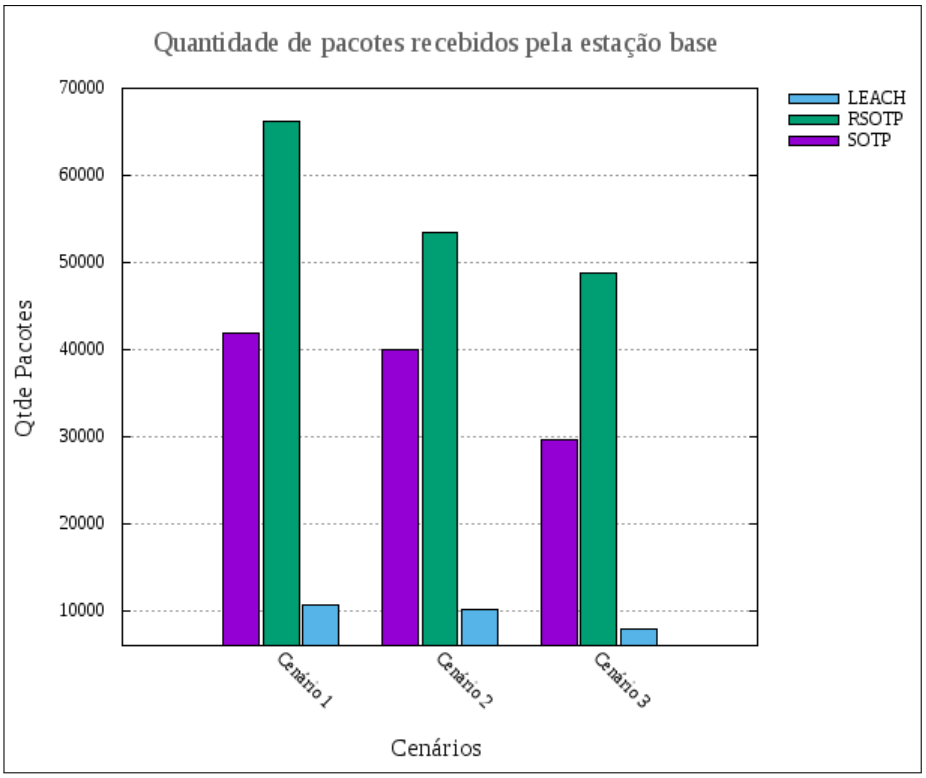
A partir dos resultados obtidos e mostrados pelo gráfico e pelas tabelas, nota-se que a medida que são inseridos mais nós na rede para uma mesma área de cobertura, a reutilização de intervalos de transmissão aumenta, consequentemente, sendo necessários menos intervalos a

serem alocados aos nós da rede para que os mesmos possam se registrar junto à estação base.

5.4.2 Quantidade de Dados Recebidos pela Estação Base

A Figura 24 apresenta a quantidade de dados recebidos pela estação base que os protocolos RSOTP, SOTP e LEACH obtiveram em cada cenário.

Figura 24 – Quantidade de dados recebidos pela Estação Base em cada Cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se a partir do gráfico da Figura 24 que o protocolo RSOTP apresentou maior quantidade de dados entregues corretamente à estação base em comparação ao SOTP. Em relação ao LEACH, não é possível comparar os resultados desse protocolo com os resultados obtidos pelo SOTP e RSOTP, pois o protocolo LEACH faz agregação dos dados nos nós *cluster heads*, diminuindo-se assim significativamente o número de pacotes transmitidos pelos nós em cada cenário.

Em comparação ao protocolo SOTP, o RSOTP conseguiu um aumento de aproximadamente 36.69% no cenário 1, 30.83% no cenário 2 e 36.39% no cenário 3. O aumento da quantidade de pacotes recebidos pela estação base no protocolo RSOTP se deve a reutilização dos intervalos TX pelos nós, com isso seus intervalos de transmissão se repetem mais vezes em comparação aos intervalos dos nós no SOTP. Isso se deve ao tamanho do quadro no RSOTP ser

menor comparado ao quadro no protocolo SOTP. As tabelas 10, 11 e 12 apresentam a média da quantidade de dados recebidos pela BS e os seus respectivos limites (inferior e superior) para os protocolos SOTP e RSOTP em cada cenário.

Tabela 10 – Resultados da Quantidade de Dados Recebidos pela BS no Cenário 1.

Protocolo	Qt. de Pacotes Recebidos	Limite Inferior	Limite Superior
SOTP	41885	34134	49639
RSOTP	66165	42827	74240

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Resultados da Quantidade de Dados Recebidos pela BS no Cenário 2.

Protocolo	Qt. de Pacotes Recebidos	Limite Inferior	Limite Superior
SOTP	39975	32680	47809
RSOTP	57790	53414	65180

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Resultados da Quantidade de Dados Recebidos pela BS no Cenário 3.

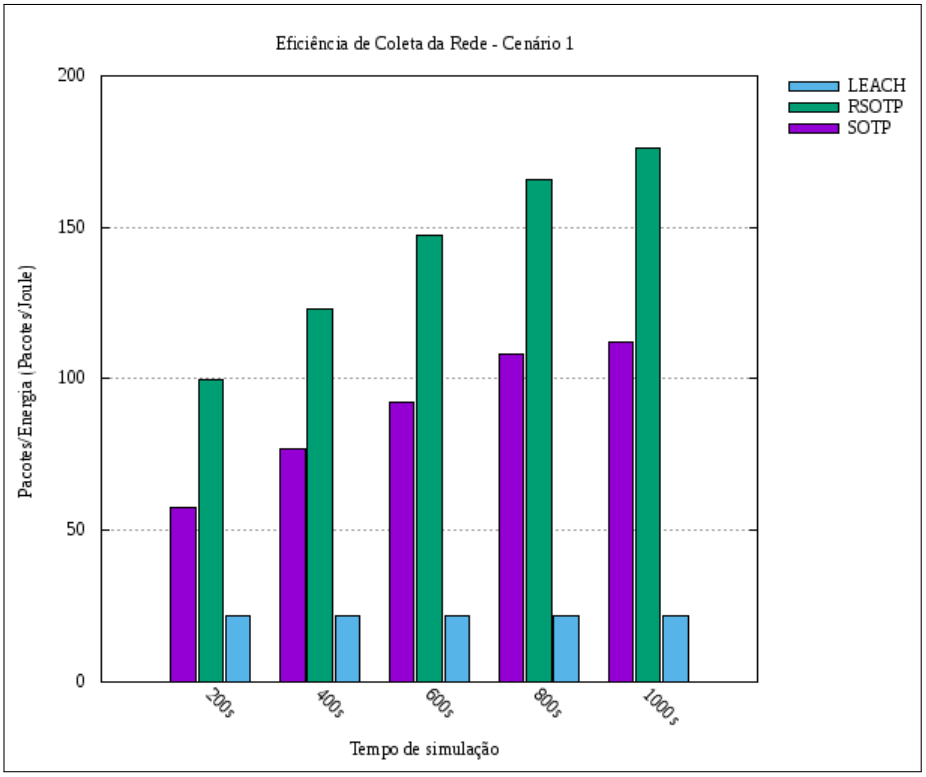
Protocolo	Qt. de Pacotes Recebidos	Limite Inferior	Limite Superior
SOTP	29611	22853	40902
RSOTP	46553	33700	59451

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.3 Eficiência de Coleta

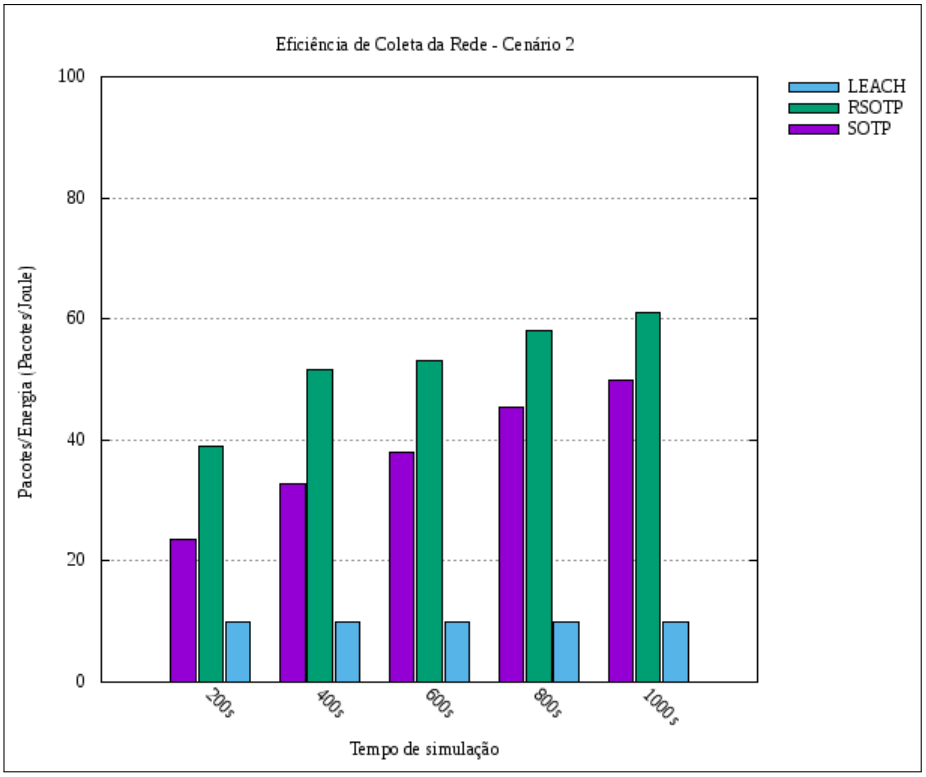
As Figuras 25, 26 e 27 apresentam a eficiência de coleta através da quantidade de pacotes coletados pela estação base por energia gasta pela rede nos protocolos RSOTP, SOTP e LEACH nos cenários 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 25 – Eficiência de Coleta no Cenário 1.



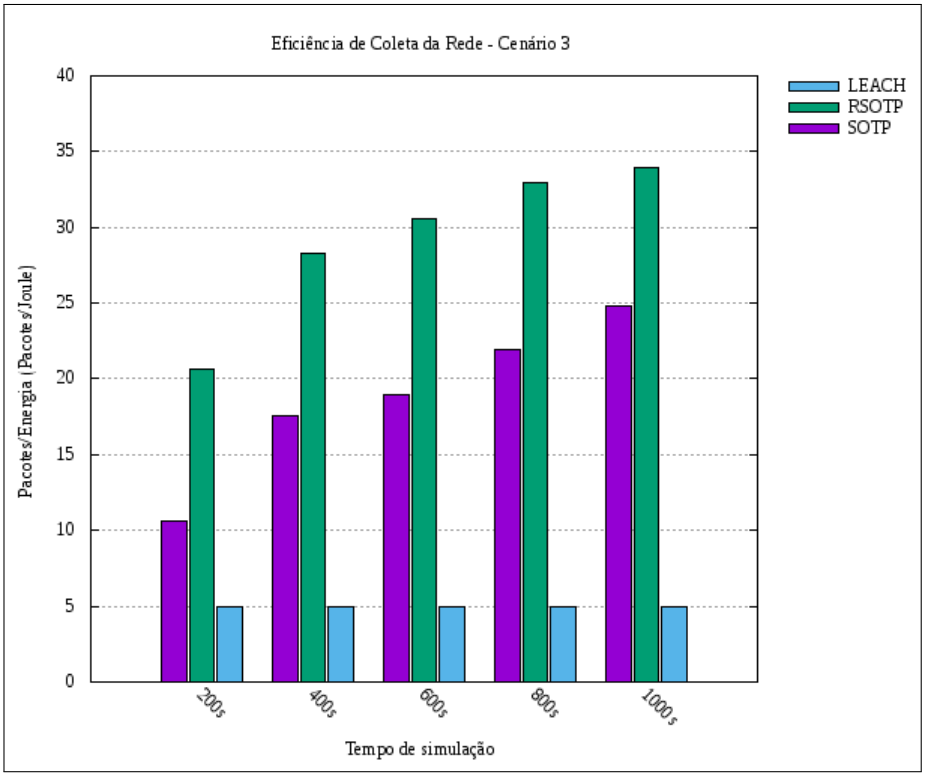
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Eficiência de Coleta no Cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Eficiência de Coleta no Cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

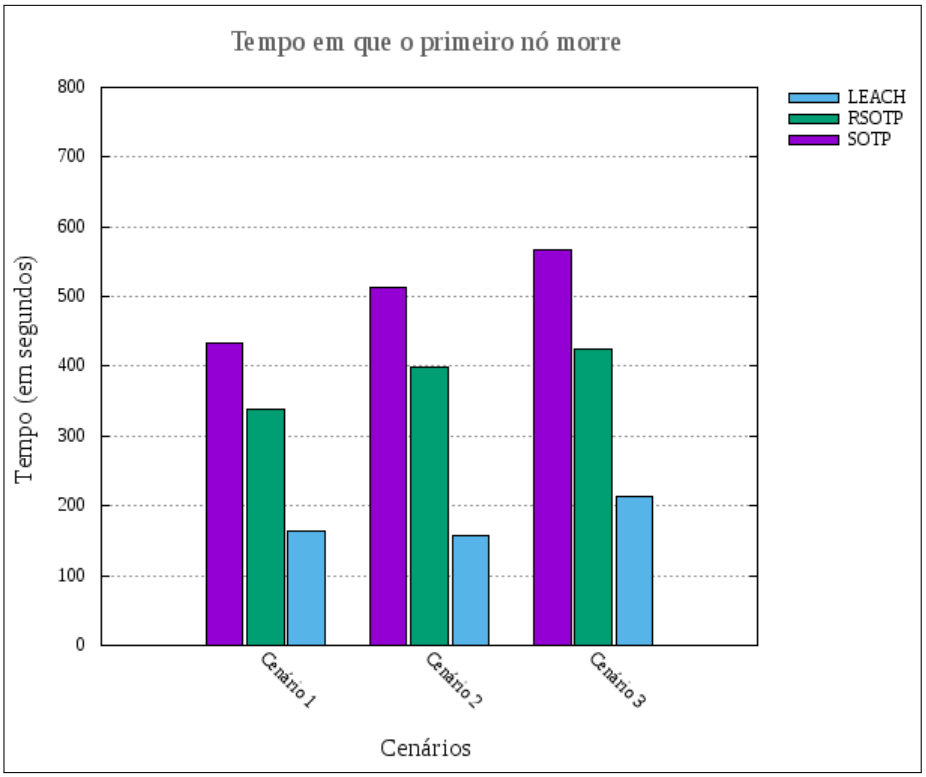
A partir dos resultados obtidos pelos gráficos acima, verifica-se que o protocolo RSOTP apresentou uma eficiência de coleta maior que o protocolo SOTP. Em relação ao LEACH, assim como foi dito na métrica anterior, subseção 5.4.2 deste capítulo, fica inviável comparar os resultados obtidos por esse protocolo com os resultados do RSOTP e SOTP pelos mesmos motivos já citados. Nota-se que a eficiência de coleta no LEACH permaneceu a mesma durante os diferentes tempos de simulação. Isso se deve ao fato que a quantidade de energia gasta pela rede por pacote pacote captado pela BS, pouco varia e o tempo de vida da rede no LEACH é muito baixo, como relatado na métrica anterior. Com isso os dados colhidos permanecem os mesmos durante toda a simulação em cada cenário.

A eficiência de coleta pela BS no protocolo RSOTP é maior que no SOTP devido ao fato de que como o RSOTP garante mais transmissões de dados, mais dados serão coletados, mesmo que o consumo de energia da rede seja maior que o consumo no SOTP. A razão Pacotes/Energia no cenário 1 é maior que a razão do cenário 2, que por sua vez é maior que a razão apresentada no cenário 3. Isso se deve ao fato de que a quantidade de pacotes recebidos pela estação base diminui a medida que a quantidade de nós presentes na rede e o tamanho do quadro aumentam.

5.4.4 Tempo de Morte do Primeiro Nó

A Figura 28 apresenta o tempo de morte do primeiro nó obtido pelos protocolos RSOTP, SOTP e LEACH em cada cenário. Para essa métrica, os resultados obtidos pelo protocolo SOTP foram melhores em comparação ao RSOTP e ao LEACH. No cenário 1, a morte do primeiro nó no LEACH aconteceu no tempo 162.9s, no RSOTP no tempo 337.8s, enquanto no SOTP aconteceu no tempo 434.4s. No cenário 2, a morte do primeiro nó no LEACH aconteceu no tempo 156.6s, no RSOTP no tempo 398.2s e no SOTP no tempo 512.9s. No cenário 3, a morte do primeiro nó no LEACH demora a acontecer em comparação aos cenários 1 e 2. Isso se deve ao fato de que nesse cenário a taxa de dados gerados e transmitidos é menor em relação aos outros dois cenários. A morte do primeiro nó aconteceu no tempo 213.2s. Já no RSOTP a morte do primeiro nó aconteceu no tempo 425.8s e no SOTP no tempo 567.9s. As tabelas 13, 14 e 15 exibem a média do tempo de morte do primeiro nó e os seus respectivos limites (inferior e superior) para cada protocolo em cada cenário.

Figura 28 – Tempo de morte do primeiro nó em cada Cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Resultados do Tempo de morte do primeiro nó no Cenário 1.

Protocolo	Tempo de Morte	Limite Inferior	Limite Superior
LEACH	162.9s	156.6s	170.1s
RSOTP	337.8s	336s	339.6s
SOTP	434.4s	430.9s	438s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Resultados do Tempo de morte do primeiro nó no Cenário 2.

Protocolo	Tempo de Morte	Limite Inferior	Limite Superior
LEACH	156.6s	155s	158s
RSOTP	398.2s	396.8s	399.6s
SOTP	512.9s	510.7s	515.1s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Resultados do Tempo de morte do primeiro nó no Cenário 3.

Protocolo	Tempo de Morte	Limite Inferior	Limite Superior
LEACH	213.2s	185.9s	241.9s
RSOTP	425.8s	422.9s	428.7s
SOTP	567.9s	567s	568.8s

Fonte: Elaborado pelo autor.

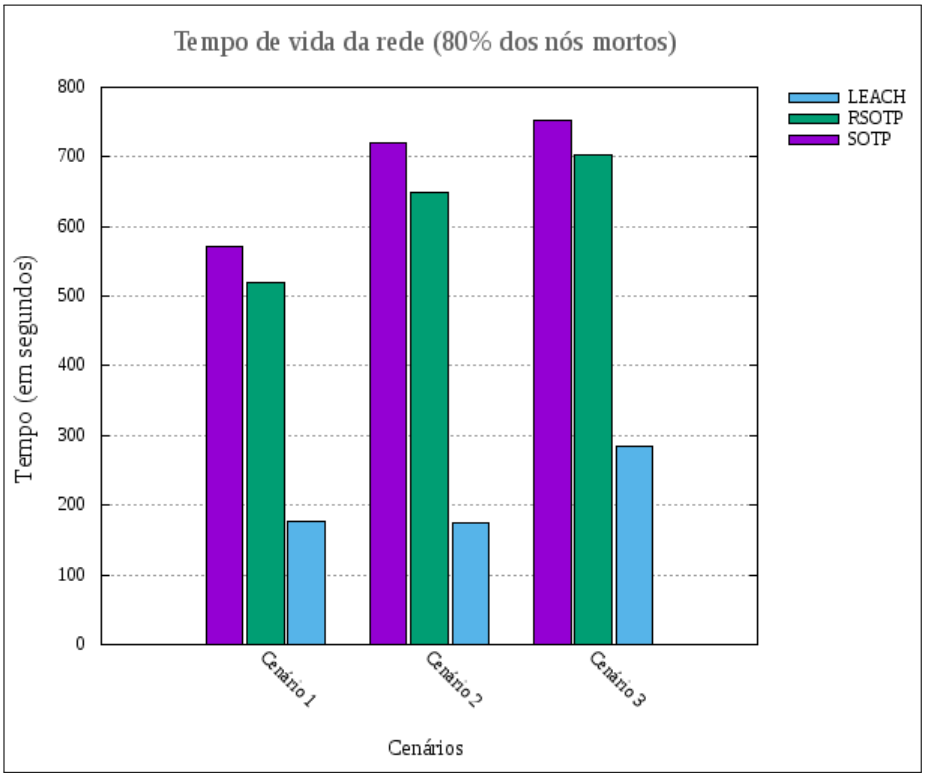
Os nós no LEACH morrem primeiro devido ao tempo de duração das rodadas, fase de formação dos *clusters* e eleição dos *cluster heads* e da taxa de dados gerados e transmitidos. Todos esses fatores contribuem significativamente na geração dos resultados obtidos pelo LEACH. Já no RSOTP, os nós morrem cedo devido ao fato de que o quadro se repete mais vezes em comparação ao SOTP. Com isso os períodos de transmissão e recepção dos nós acontecem com mais frequência, ocasionando um maior consumo de energia. Já o quadro no SOTP, por ser maior, acontece com menos frequência, resultando em tempos maiores em modo de baixo consumo (*sleep*) e em tempos menores de transmissão e recepção.

5.4.5 Tempo de Vida da Rede (80% dos Nós Mortos)

A Figura 29 apresenta o tempo de vida da rede, considerando 80% dos nós mortos alcançado pelos protocolos RSOTP, SOTP E LEACH em cada cenário. Nessa métrica, o protocolo SOTP também conseguiu obter resultados melhores em comparação ao RSOTP e ao LEACH, devido aos mesmos motivos apresentados na métrica anterior, subseção 5.4.4 deste

Capítulo.

Figura 29 – Tempo de vida da rede (80% de nós mortos) em cada Cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No cenário 1, o LEACH apresentou um tempo de 176.796s, o RSOTP um tempo de 520.664s, enquanto no SOTP um tempo de 572.111s. No cenário 2, o LEACH apresentou um tempo de 175.724s, o RSOTP um tempo de 649.023s e o SOTP um tempo de 719.789s. No cenário 3, o LEACH apresentou um tempo de vida maior em relação aos cenários 1 e 2, isso se deve pelos mesmos motivos apresentados na métrica anterior. O tempo de vida é de 285.085s. Já o RSOTP apresentou um tempo de 702.898s e o SOTP um tempo de 752.385s. As tabelas 16, 17 e 18 apresentam a média do tempo de vida da rede e os seus respectivos limites (inferior e superior) para cada protocolo em cada cenário.

O protocolo proposto, RSOTP, apresentou um percentual de 9% abaixo do tempo de vida do SOTP e 66.05% acima do tempo de vida do LEACH, no cenário 1. No cenário 2, o RSOTP apresentou um percentual de 9.83% abaixo do tempo do SOTP e 72.93% acima do tempo do LEACH. E no cenário 3, o RSOTP apresentou um percentual de 6.58% abaixo do tempo do SOTP e 59.44% acima do tempo do LEACH.

Tabela 16 – Resultados do Tempo de Vida da Rede (80% de nós mortos) no Cenário 1.

Protocolo	Tempo de Morte	Limite Inferior	Limite Superior
LEACH	176.8s	171.2s	182.1s
RSOTP	520.6s	495s	538.8s
SOTP	572.1s	567.4s	579.8s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Resultados do Tempo de Vida da Rede (80% de nós mortos) no Cenário 2.

Protocolo	Tempo de Morte	Limite Inferior	Limite Superior
LEACH	175.7s	167.1s	181.6s
RSOTP	649s	634.1s	671.4s
SOTP	719.8s	710s	731s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Resultados do Tempo de Vida da Rede (80% de nós mortos) no Cenário 3.

Protocolo	Tempo de Morte	Limite Inferior	Limite Superior
LEACH	285.1s	227.1s	364.2s
RSOTP	702.9s	693.6s	706.2s
SOTP	752.4s	745.2s	759.8s

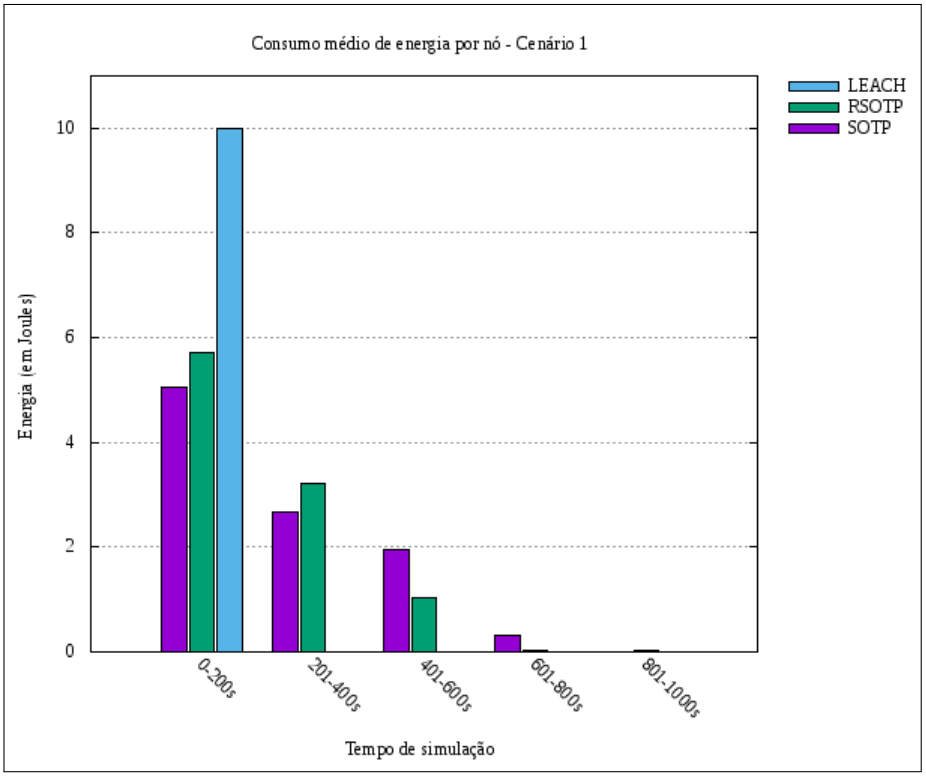
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.6 Consumo Médio de Energia por Nó

As Figuras 30, 31 e 32 apresentam o consumo médio de energia dos protocolos RSOTP, SOTP e LEACH no cenário 1, 2 e 3, respectivamente. Nos três cenários é possível verificar que o protocolo SOTP apresentou um menor consumo de energia por nó em comparação ao LEACH e ao RSOTP durante o período de tempo de 0-200s. Isso se deve ao fato do protocolo RSOTP, ao reutilizar intervalos de transmissão e, consequentemente, precisar de um tamanho de quadro menor que o SOTP, os intervalos de tempo se repetem com mais frequência, ocasionando um consumo maior de energia para o nó. Em contrapartida, como o tamanho do quadro no SOTP é maior em comparação ao RSOTP, os intervalos se repetem menos vezes durante esse período de tempo, resultando em um menor consumo.

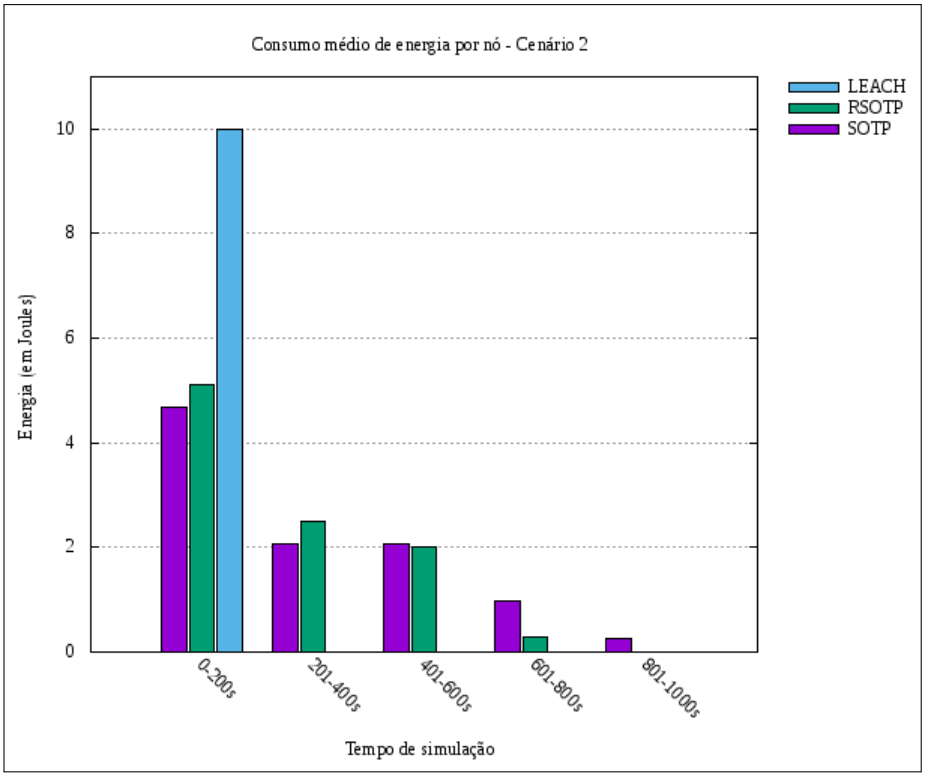
O LEACH é um protocolo probabilístico e distribuído, ou seja, os *cluster heads* são eleitos de forma aleatória, podendo haver rodadas com mais ou menos *cluster heads*. Assim, LEACH pode realizar uma clusterização ruim, com muitos ou menos *cluster heads*. Eles podem

Figura 30 – Consumo médio de energia no Cenário 1.



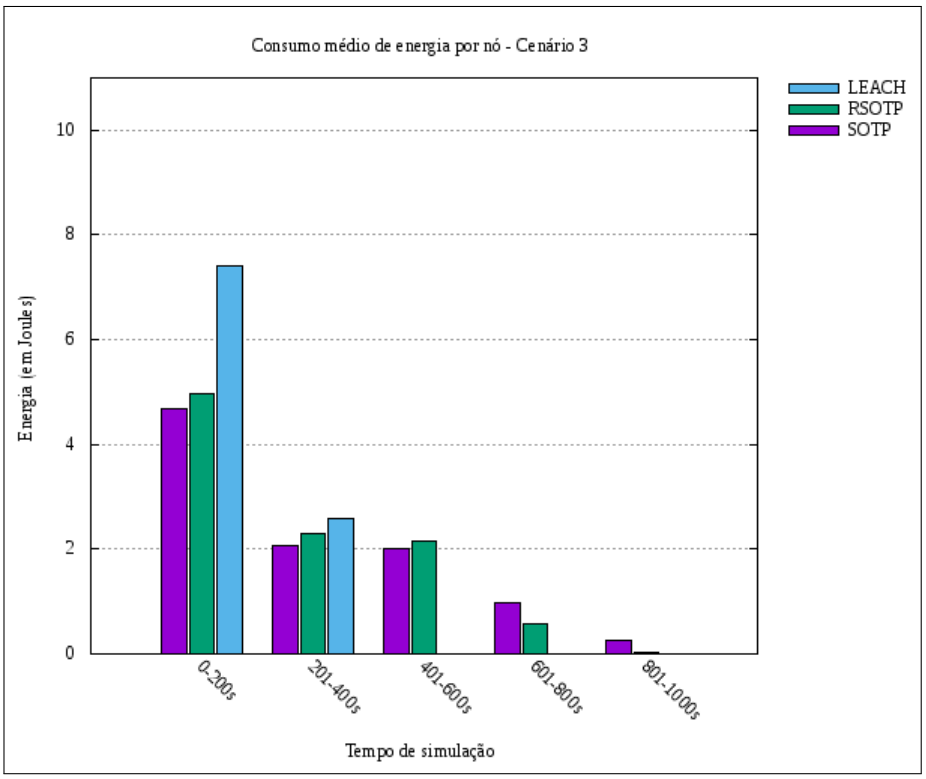
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Consumo médio de energia no Cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Consumo médio de energia no Cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

estar bem próximos ou bem distantes dos nós, o que contribui para um maior consumo de energia.

Outro fator a se considerar é o tamanho do quadro no LEACH ser dinâmico, essa variação do tamanho do quadro para cada *cluster* resulta em um maior consumo de energia por parte dos nós, pois um quadro menor pode gerar uma maior taxa de dados a serem transmitidos. Nos cenários 1 e 2, os nós no protocolo LEACH consomem totalmente a energia de suas baterias, somente no primeiro período de tempo (0-200s). Já no cenário 3, todos os nós só morrem no segundo período de tempo (201-400s). Isso acontece porque a taxa de dados gerados e transmitidos é menor comparada a taxa dos nós nos cenários 1 e 2.

Nos cenários 1 e 2, a partir do período de tempo de 401-600s, e no cenário 3, a partir do período de 601-800s, os nós no protocolo RSOTP consomem menos energia em comparação ao SOTP, isso se deve ao fato de que os nós no protocolo RSOTP começam a morrer mais cedo em comparação aos nós do protocolo SOTP, devido ao motivos já relatados no parágrafo anterior. Com isso a média de consumo de energia no protocolo diminui.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Essa dissertação teve como objetivo aprimorar o escalonamento em uma rede de sensores através do reuso dos intervalos de transmissão a fim de oferecer uma boa performance em relação a escabilidade, eficiência na coleta de dados pela estação base e evitar o desperdício de tempo. A partir deste aprimoramento foi desenvolvido um novo protocolo TDMA baseado em coloração de grafos, o RSOTP. Para alcançar este objetivo foi utilizado uma modelagem para o problema de coloração de grafos através do grafo de conflitos gerado pela estação base.

Os protocolos RSOTP, SOTP e LEACH foram validados através de simulações no simulador de rede OMNeT++/Castalia. O objetivo foi comparar os três protocolos e analisar e verificar os resultados obtidos. As simulações foram realizadas em três cenários e os resultados foram comparados através das seguintes métricas: aproveitamento dos slots, quantidade de dados recebidos pela estação base, eficiência de coleta, morte do primeiro nó, tempo de vida da rede (80% de nós mortos) e o consumo médio de energia por nó.

Através dos resultados obtidos, observou-se que o protocolo proposto apresentou bons resultados tanto para uma rede menos densa (Cenário 1) como para uma mais densa (Cenário 3), proporcionando ganho nas métricas relacionadas ao aproveitamento dos slots (intervalos), quantidade de dados recebidos pela estação base (BS) e à eficiência de coleta da estação base. Na métricas que medem o tempo de morte do primeiro nó, o tempo de vida da rede e o consumo médio de energia por nó, o protocolo RSOTP apresentou resultados inferiores em comparação ao protocolo SOTP e melhores em relação ao LEACH. Porém, o RSOTP se mostrou mais eficiente que estes protocolos, pois conseguiu transmitir para a estação base uma maior quantidade de dados.

Assim, pode-se que concluir que o protocolo RSOTP atingiu o objetivo pelo o qual foi desenvolvido. O protocolo proporciona escabilidade, possibilitando a inserção de mais nós na rede, gerando um aumento do fluxo de dados. E é eficiente na coleta de dados captados pela estação base, mesmo apresentando um consumo de energia maior que o protocolo SOTP.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho, a partir do estudo realizado e do desenvolvimento do protocolo RSOTP, trouxe algumas contribuições, as quais podemos destacar:

- Definição e aplicação de um critério para a escolha do nó pai e, consequentemente, na construção da árvore de roteamento.

- Criação de uma heurística para ordenar a entrada dos nós no processo de registro.
- Fórmulas referentes à sincronização do relógio dos sensores e da estação base, no que tange o sincronismo do nó em relação aos modos de operação (TX, RX e *SLEEP*) sem atrapalhar as transmissões dos demais sensores.
- Implementação de um algoritmo de coloração dos nós que possibilitou o reuso de intervalos TX já utilizados por outros sensores.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, pretende-se aplicar o mecanismo de adaptação de falhas encontrado em (WANG *et al.*, 2006), no RSOTP. O mecanismo não foi utilizado nas implementações porque o foco do trabalho era medir a escabilidade e a eficiência de coleta que o protocolo proposto podia oferecer. Além de adicionar esse mecanismo, pretende-se melhorar o RSOTP em relação ao consumo de energia das baterias dos sensores, já que o protocolo apresentou resultados inferiores. Com isso, espera-se aumentar o tempo de vida da rede e tornar o protocolo ainda mais eficiente em relação ao fluxo de dados gerados pelos sensores e à coleta de dados captados pela estação base.

Por fim, comparar o RSOTP com os protocolos apresentados no Capítulo 3, o protocolo TDMA-CA e o protocolo SOFLEE. Estes protocolos também fazem reutilização dos intervalos de transmissão, assim a comparação com estes protocolos é importante para medir a eficiência do protocolo proposto quanto ao objetivo pelo qual o RSOTP foi desenvolvido.

REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. A survey on sensor networks. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 40, n. 8, p. 102–114, ago. 2002. Disponível em: <http://itec.hust.edu.cn/~liuwei/2012/2012fall-comnet/papers/02_survey%20on%20sensor%20network.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2016.

AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. **Computer Networks**, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 393–422, dez. 2002. Disponível em: <http://contech.suv.ac.kr/contech/courses/11h2wsn/Wireless%20sensor%20networks_a%20survey-ComputerNetworks2002.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2016.

AMARAL, D. **O problema da árvore geradora mínima (AGM)**. 2007. Disponível em: <http://danielamaral.wikidot.com/o-problema-da-arvore-geradora-minima-agm>. Acesso em: 16 jun. 2015.

BAIAO, N. **Switching news network Angola (SNN Angola)**. 2010. Disponível em: <https://snnangola.wordpress.com/page/12/?app-download=ios>. Acesso em: 18 jun. 2015.

BECHELANE, C. O. **Uma abordagem para minimização de consumo de energia em redes de sensores sem fio com sorvedouros móveis**. 2009. 93 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/SLSS-7XGGKA/carlaoliveirabechelane.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 abr. 2016.

BHARGHAVAN, V.; DEMERS, A.; SHENKER, S.; ZHANG, L. Macaw: a media access protocol for wireless lan's. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, ACM, v. 24, n. 4, p. 212–225, out. 1994. Disponível em: <http://people.inf.elte.hu/toke/halozatokII-jegyzet/haloII-2009-tavasz/15-744,%20Spring%202008%20Computer%20Networks%20Carnegie%20Mellon/papers/macaw.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2016.

BOULIS, A. **Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks**. v. 3.2, Australia, 2011. 120 p.

CAMPOS, L. R. d. S. **Roteamento em redes de sensores sem fios com base em aprendizagem por reforço**. 2011. 55 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do do Rio Grande do Norte, Natal, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15451/1/LeonardoRSC_DISSERT.pdf>. Acesso em: 15 maio 2016.

CHENG, M.; YIN, L. Transmission scheduling in sensor networks via directed edge coloring. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS,. [S.l.], 2007. Glasgow, SCO, 2007. **Anais eletrônicos...** Glasgow, SCO: IEEE, 2007. Disponível em: <http://adiwijaya.staff.telkomuniversity.ac.id/wp-content/uploads/sites/56/2013/10/005-Scheduling-problem.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2016.

CUNHA, F. D.; CUNHA, Í.; LOUREIRO, A. A.; OLIVEIRA, L. B. Uma nova abordagem para acesso ao meio em redes de sensores sem fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUIÍDOS, 31., BRASíLIA, DF. [S.l.], 2007. **Anais eletrônicos...** Brasília, DF: SBC, 2007. Disponível em: <http://ce-resd.facom.ufms.br/sbrc/2013/artigo-01.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2016.

DAM, T. V.; LANGENDOEN, K. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In: PROCEEDINGS OF THE 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS,. [S.l.], 2003. **Anais eletrônicos...** Los Angeles-California, USA: AGM, 2003. Disponível em: <http://ube.ege.edu.tr/~erciyes/UBI532/yagiz_paper.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2016.

DEMIRKOL, I.; ERSOY, C.; ALAGOZ, F. *et al.* Mac protocols for wireless sensor networks: a survey. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 44, n. 4, p. 115–121, abr. 2006. Disponível em: <http://www.meshell.ch/documents/basn/Report/Bibliography/IlkerDEMIRKOL_COMMAG.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2016.

FAINA, L. F. **Redes wireless e móveis**. 2013. Disponível em: <http://www.facom.ufu.br/~faina/BCC_Crs/GBC066-2014-2S/DL/ArqTCPIP-Ch06.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2015.

GAJJAR, S.; SARKAR, M.; DASGUPTA, K. Self organized, flexible, latency and energy efficient protocol for wireless sensor networks. **International Journal of Wireless Information Networks**, v. 21, n. 4, p. 290–305, dez. 2014.

GANDHAM, S.; DAWANDE, M.; PRAKASH, R. Link scheduling in wireless sensor networks: distributed edge-coloring revisited. **Journal of Parallel and Distributed Computing**, Elsevier, v. 68, n. 8, p. 1122–1134, ago. 2008. Disponível em: <http://www.utdallas.edu/~ravip/papers/shashiinfocom2005.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2016.

GHOSH, S.; KONAR, A. **Call Admission Control in Mobile Cellular Networks**. [S.l.]: Berlin-Heidelberg, GER: Springer, 2013. 62 p.

GOMES, R. **Redes de computadores - introdução**. 2012. Disponível em: <http://www.dsc.ufcg.edu.br/~reinaldo/computer_networks_files/01_INTRODUCAO_2pp.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2015.

HEINZELMAN, W. B.; CHANDRAKASAN, A. P.; BALAKRISHNAN, H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 1, n. 4, p. 660–670, dez. 2002. Disponível em: <http://suraj.lums.edu.pk/~muneeb/course/papers/11_leach_twc02.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2016.

HUANG, P.; XIAO, L.; SOLTANI, S.; MUTKA, M. W.; XI, N. The evolution of mac protocols in wireless sensor networks: A survey. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 15, n. 1, p. 101–120, abr. 2002. Disponível em: <http://dekst.awardspace.com/publication/mac_survey.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2016.

IITG. **Multiple access techniques**. 2015. Disponível em: <http://www.iitg.ernet.in/scifac/qip/public_html/cd_cell/chapters/a_mitra_mobile_communication/chapter8.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2015.

KANAGASABAI, A. **Broadcast scheduling for tdma in wireless multi-hop networks**. 2013. Disponível em: <http://www.site.uottawa.ca/~zhuan045/CSI5169/Broadcast%20Scheduling%20for%20TDMA.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2015.

KHAN, M. A.; KHAN, A.; SHAH, S. K.; ABDULLAH, A. An energy efficient color based topology control algorithm for wireless sensor networks. **Scientific Research Publishing**, IEEE, v. 5, n. 1, p. 1–7, dez. 2013. Disponível em: <http://file.scirp.org/pdf/WSN_2013013010250125.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2016.

KIOSKEA.NET. **Transmissão de dados - a transmissão analógica**. 2010. Disponível em: <http://br.ccm.net/contents/685-transmissao-de-dados-a-transmissao-analogica>. Acesso em: 18 jun. 2015.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de computadores e a internet**. [S.l.]: 5ª edição, São Paulo: Pearson, 2010.

LU, G.; KRISHNAMACHARI, B.; RAGHAVENDRA, C. S. An adaptive energy-efficient and low-latency mac for data gathering in wireless sensor networks. In: PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING SYMPOSIUM, 2004. PROCEEDINGS. 18TH INTERNATIONAL. [S.l.], 2004. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://gdauto.gdut.edu.cn/lab1/lwfy_files/-An%20Adaptive%20Energy-Efficient%20and%20Low-Latency%20MAC%20for%20Data%20Gathering%20in%20Wireless%20Sensor%20Networks.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2016.

LUMSDAINE, A.; GREGOR, D. **Sequential vertex coloring**. 2004. Disponível em: <http://www.boost.org/doc/libs/1_57_0/libs/graph/doc/sequential_vertex_coloring.html>. (Acesso em: 27 jun. 2015).

PAL, P.; CHATTERJEE, P. A survey on tdma-based mac protocols for wireless sensor network. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, n. 6, p. 219–230, jun. 2014. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/98b0/b2be4935f0ae44800838c685da3c99c69959.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2016.

PUC-MG. **Spread spectrum**. 2000. Disponível em: <http://ftp-acd.puc-campinas.edu.br/pub/professores/ceatec/branquinho/WLAN/ss.doc>. Acesso em: 21 jun. 2015.

RAHMANI, S.; KHADEMZADEH, A.; MOGHADAM, A. M. E. Time slot allocation algorithm based on tdma protocol in wireless sensor networks. **Journal of Advances in Computer Research**, v. 4, n. 4, p. 61–71, nov. 2013. Disponível em: <http://jacr.iausari.ac.ir/article_4235_be54ba9b992c168fbb13e83bc44e8f97.pdf>. Acesso em: 13 set. 2016.

RAJENDRAN, V.; OBRACZKA, K.; GARCIA-LUNA-ACEVES, J. J. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. **Wireless Networks, Springer-Verlag New York, Inc.**, v. 12, n. 1, p. 63–78, fev. 2006.

RAMANATHAN, S.; LLOYD, E. L. Scheduling algorithms for multi-hop radio networks. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, ACM, v. 22, n. 4, p. 211–222, out. 1992.

ROCHA, L. S. **Algorithmic aspects of graph colouring heuristics**. 2012. 130 p. Tese (Doutorado) — Universidade de Nice - Sophia Antipolis, França, 2012.

SDU. **Multiple access techniques for wireless communications**. 2012. Disponível em: <http://course.sdu.edu.cn/G2S/eWebEditor/uploadfile/20121224165841213.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2015.

STOJMENOVIC, I. **Handbook of wireless networks and mobile computing**. [S.l.]: New York: John Wiley & Sons, 2003.

TAVARES, P. L. **Redes de sensores sem-fio**. 2002. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/grad/02_2/Redes%20de%20sensores/Redes%20de%20Sensores%20Sem-fio.htm>. Acesso em: 06 jun. 2015.

UEYAMA, J. **Redes de computadores – camada de enlace e redes locais**. 2013. Disponível em: <http://wiki.icmc.usp.br/images/5/59/Rc-enlace2013.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2015.

VARGA, A. **OMNeT++ user manual**. v. 4.6, 2014. 428 p.

WANG, Y.; HENNING, I.; LI, X.; HUNTER, D. Sotp: a self-organized tdma protocol for wireless sensor networks. In: CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING,. [S.l.], 2006. **Anais...** Ottawa, CA: IEEE, 2006. p. 1108–1111.

WU, D.; WANG, G.-Y.; LI, X.-L. Distributed tdma scheduling protocol based on conflict-free for wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTING AND INTEGRATED SYSTEMS (ICISS),. [S.l.], 2010. **Anais...** Guilin, CHN: IEEE, 2010. p. 876–879.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. **Computer Networks**, Elsevier, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, ago. 2008. Disponível em: <http://wiki-castelldefels.cimne.upc.edu/images/2/20/Wireless_sensor_network_survey.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2016.