

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
COMPUTAÇÃO**

Yuri Crotti

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PROTOCOLOS DE
TRANSMISSÃO PARA REDES DE SENSORES SEM FIO
APLICADAS À AGRICULTURA**

Araranguá

2017

Yuri Crotti

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PROTOCOLOS DE
TRANSMISSÃO PARA REDES DE SENSORES SEM FIO
APLICADAS À AGRICULTURA**

Monografia submetida ao Curso de Engenharia de Computação para a obtenção do Grau de Bacharelado em Engenharia de Computação.
Orientador: Prof. Dr. Analúcia Schiaffino Morales

Araranguá

2017

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

Crotti, Yuri

Avaliação de desempenho de protocolos de
transmissão para Redes de Sensores Sem Fio
aplicadas à agricultura / Yuri Crotti ; orientador,
Analúcia Schiaffino Morales, 2017.
146 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus
Araranguá, Graduação em Engenharia de Computação,
Araranguá, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia de Computação. 2. Redes de Sensores
Sem Fio. 3. Agricultura de Precisão. 4. Simulação.
I. Schiaffino Morales, Analúcia. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
de Computação. III. Título.

Yuri Crotti

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PROTOCOLOS DE
TRANSMISSÃO PARA RSSF APLICADAS À AGRICULTURA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado aprovado para a obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia de Computação” e aprovado em sua forma final pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Araranguá, 06 de dezembro de 2017.



Prof^a. Eliane Pozzebon, Dra.
Coordenadora do Curso

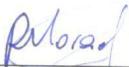
Banca Examinadora:



Prof^a. Analúcia Schiaffino Morales, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Gustavo Medeiros de Araújo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que iluminou meu caminho durante essa caminhada. À minha família, pela sua capacidade de acreditar em mim. À professora Analúcia Schiaffino Morales, pela paciência na orientação que tornaram possível a conclusão deste trabalho. Meus agradecimentos aos meus amigos e professores que fizeram parte da minha formação

*Cada sonho que você deixa pra trás, é um
pedaço do seu futuro que deixa de existir*

Steve Jobs

RESUMO

Com os avanços tecnológicos no Brasil e no mundo, nos últimos anos tem surgido ferramentas que auxiliam os agricultores nos processos de monitoramento e tomadas de decisões para as mais diversas culturas. Analisando este aumento da produção agrícola no decorrer dos anos, ficou evidente que o uso da tecnologia tem sido um dos grandes responsáveis por este crescimento. Dentro de agricultura de precisão, se destacam as ferramentas que possam auxiliar os agricultores na gestão da qualidade e expansão de sua produção. Diante dos avanços tecnológicos, as Redes de Sensores sem Fio surgiram como uma grande e promissora alternativa para o campo de monitoramento e análise de ambientes. As Redes de Sensores sem Fio têm basicamente como objetivo monitorar ambientes por meio de sensores, nos quais devem trabalhar de forma conjunta e interligadas através de ligações sem fios. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar, através de simulação computacional, três tipos de tecnologias de comunicação sem fio com potencial para serem aplicadas na agricultura de precisão. Com o auxílio de ferramentas de simulações para Rede de Sensores sem Fio, criou-se por meio de cenários virtuais testes de avaliação das tecnologias que implementam protocolos 802.15.4, 802.11ah e Lora. Os cenários criados se diferenciavam em relação as distâncias dos nós em relação ao receptor e densidade. Através de alguns parâmetros como Taxa de Perda de Pacotes, Eficiência e Latência, foi possível verificar qual a melhor tecnologia para emprego na agricultura em larga escala.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio. Agricultura de Precisão. Simulação. 802.15.4. 802.11ah. Lora

ABSTRACT

With the technological advances in Brazil and in the world, in the last few years tools have emerged that help farmers in the processes of monitoring and making decisions for the most diverse cultures. Analyzing this increase in agricultural production over the years, it became evident that the use of technology has been one of the main factors responsible for this growth. Within precision agriculture, we highlight the tools that can help farmers in quality management and expansion of their production. Before the technological advancements, wireless sensor networks have emerged as a large and promising alternative for the field monitoring and analysis environments. The Wireless Sensor Networks basically aim to monitor environments through sensors, in which they must work together and interconnected through wireless connections. Thus, the objective of this work was to evaluate, through computer simulation, three types of wireless communication technologies with potential to be applied in precision agriculture. With the aid of simulation tools for Wireless Sensor Networks, virtual evaluation scenarios were developed to evaluate the technologies that implement 802.15.4, 802.11ah and Lora protocols. The scenarios created were different in relation to the distances of the nodes in relation to the receiver and density. Through some parameters such as Packet Loss Rate, Efficiency and Latency, it was possible to verify the best technology for employment in large scale agriculture.

Keywords: Wireless Sensors Network. Precision Agriculture. Simulation. 802.15.4. 802.11ah. Lora

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Componentes de um Nó	29
Figura 2	Faixas de frequências com a respectiva atribuição de canais	31
Figura 3	Taxa de Dados e respectivas Frequências.....	31
Figura 4	Atribuição de canais do padrão 802.11ah.....	33
Figura 5	Ambiente de Desenvolvimento OMNet++	39
Figura 6	Ambiente de Simulação OMNet++	40
Figura 7	Talhão simulado	42
Figura 8	Sensores no Talhão	43
Figura 9	Cenário 1.....	43
Figura 10	Cenário 2.....	44
Figura 11	Cenário 3.....	44
Figura 12	Cenário 4.....	45
Figura 13	Módulo NRF24L01	49
Figura 14	Dragino LoRa Shield	51
Figura 15	F-Integrated RF IEEE 802.11ah.....	52
Figura 16	Comparativo TPP - Cenário 1	58
Figura 17	Comparativo Eficiência - Cenário 1	59
Figura 18	Comparativo Latência - Cenário 1	59
Figura 19	Comparativo TPP - Cenário 2	62
Figura 20	Comparativo Eficiência - Cenário 2	63
Figura 21	Comparativo Latência - Cenário 2	64
Figura 22	Comparativo TPP - Cenário 3	66
Figura 23	Comparativo Eficiência - Cenário 3	67
Figura 24	Comparativo Latência - Cenário 3	67
Figura 25	Comparativo TPP - Cenário 4	71
Figura 26	Comparativo Eficiência - Cenário 4	72
Figura 27	Comparativo Latência - Cenário 4	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Característica Módulo NRF24L01	49
Tabela 2	Dragino LoRa Shield	50
Tabela 3	F-Integrated RF IEEE 802.11ah	51
Tabela 4	Resultados 802.15.4 em relação a distância - Cenário 1.	57
Tabela 5	Resultados 802.11ah em relação a distância - Cenário 1	57
Tabela 6	Resultados Lora em relação a distância - Cenário 1	58
Tabela 7	Resultados 802.15.4 em relação a distância - Cenário 2.	60
Tabela 8	Resultados 802.11ah em relação a distância - Cenário 2	61
Tabela 9	Resultados Lora em relação a distância - Cenário 2	61
Tabela 10	Resultados 802.15.4 em relação a distância - Cenário 3.	64
Tabela 11	Resultados 802.11ah em relação a distância - Cenário 3	65
Tabela 12	Resultados Lora em relação a distância - Cenário 3	65
Tabela 13	Resultados 802.15.4 em relação a distância - Cenário 4.	69
Tabela 14	Resultados 802.11ah em relação a distância - Cenário 4	69
Tabela 15	Resultados Lora em relação a distância - Cenário 4	70
Tabela 16	Resultados 802.15.4 por Nodo - Cenário 1	83
Tabela 17	Resultados 802.15.4 por Nodo - Cenário 2	85
Tabela 18	Resultados 802.15.4 por Nodo - Cenário 3	88
Tabela 19	Resultados 802.15.4 por Nodo - Cenário 4	94
Tabela 20	802.15.4 Desvio Padrão	95
Tabela 21	Resultados 802.11.ah por Nodo - Cenário 1	99
Tabela 22	Resultados 802.11.ah por Nodo - Cenário 2	101
Tabela 23	Resultados 802.11.ah por Nodo - Cenário 3	104
Tabela 24	Resultados 802.11.ah por Nodo - Cenário 4	110
Tabela 25	802.11ah Desvio Padrão	111
Tabela 26	Resultados Lora por Nodo - Cenário 1	115
Tabela 27	Resultados Lora por Nodo - Cenário 2	117
Tabela 28	Resultados Lora por Nodo - Cenário 3	120
Tabela 29	Resultados Lora por Nodo - Cenário 4	126
Tabela 30	Lora Desvio Padrão	127
Tabela 31	Distância por Nodo - Cenário 1	131
Tabela 32	Distância por Nodo - Cenário 2	133

Tabela 33 Distância por Nodo - Cenário 3.....	136
Tabela 34 Distância por Nodo - Cenário 4.....	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RSSF	Redes de Sensores Sem Fio.....	19
AP	Agricultura de Precisão	20
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento ...	23
GPS	Global Positioning System	24
IoT	Internet of Things	25
ISM	Industrial, Scientific & Medical.....	30
CSMA	Carrier Sense Multiple Access.....	33
CA	Collision Avoidance	33
LPWAN	Low Power Wide Area Network	34
NED	Network Description	38
IETF	Internet Engineering Task Force.....	47
ITU	International Telecommunication Union	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.3 METODOLOGIA	21
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO	23
2.2 REDES DE SENSORES SEM FIO	24
2.2.1 Arquitetura das RSSFs	25
2.2.2 Tipos de aplicações	27
2.2.3 Composição das Redes de Sensores Sem Fio	27
2.2.4 Componentes de um Nó Sensor	28
2.2.5 Padrões de Comunicação para RSSF	29
2.2.5.1 IEEE 802.15.4	30
2.2.5.2 IEEE 802.11ah	32
2.2.5.3 LoRa	33
2.2.6 Uso de plataformas de simulação de RSSF na Agricultura	35
3 MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	37
3.2 DESCRIÇÃO DE SOFTWARE UTILIZADO	38
3.2.1 Framework Mixim	40
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO ..	41
3.4 PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÃO DE SINAL	45
3.5 SÍNTESE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS	48
3.5.1 Módulo NRF24L01	48
3.5.2 Dragino LoRa Shield	50
3.5.3 F-Integrated RF IEEE 802.11ah	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1 ANÁLISE PADRÃO 802.15.4	54
4.2 ANÁLISE PADRÃO 802.11.AH	54
4.3 ANÁLISE LORA	55
4.4 COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS	56
4.4.1 Cenário 1	56
4.4.2 Cenário 2	60
4.4.3 Cenário 3	63
4.4.4 Cenário 4	68

5 CONCLUSÃO	73
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.2 TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A - Resultados por nós Padrão 802.15.4 ...	83
APÊNDICE B - Resultados por nós Padrão 802.11.ah ..	99
APÊNDICE C - Resultados por nós Padrão Lora	115
APÊNDICE D - Distância dos nós	131

1 INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos no Brasil e mundialmente, nos últimos anos tem surgido ferramentas que auxiliam os agricultores nos processos de monitoramento e tomadas de decisões para o plantio de diversas culturas (MOREIRA, 2009). Muitas condições e parâmetros devem ser analisadas em um cultivo agrícola, uma fazenda é, tipicamente, uma junção de várias interações, tais como: máquinas, pessoas e culturas, etc. Interdependentes uns com os outros, eles buscam alcançar um objetivo específico, a maximização das colheitas e a busca da qualidade na produção agrícola.

Segundo a décima estimativa de 2017 para a safra nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas fornecidas pelo IBGE, a respeito de indicadores de produção agrícola, foram totalizados 30% a mais do que no ano de 2016, cerca de 55,8 milhões de toneladas a mais do que ano anterior, no quais foram totalizadas 241,6 milhões de toneladas. O arroz, o milho e a soja são os três principais produtos deste grupo que somados representam 93,8 das estimativa de produção e 87,9% da área a ser colhida. Em relação ao ano anterior, observa-se um acréscimo de 2,2% na área de soja, de 19,3% na área do arroz. No que se refere à produção, os aumentos são de 19,5% para soja, 16,2% para o arroz e 55,2% para o milho (IBGE, 2017).

Observando este aumento da produção agrícola brasileira e mundial, no decorrer dos anos ficou evidente que o uso da tecnologia tem sido um dos grandes responsáveis por este crescimento. A tecnologia pode ser empregada em diversos setores do agronegócio, sempre buscando proporcionar ao agricultor a expansão da sua produção e melhoria da qualidade.

Segundo (NAVARRO, 2017), o sucesso na produção agrícola brasileira não está somente relacionado a expansão de terras, mas sim pelo incremento e avanços tecnológicos ao longo dos últimos anos nessa área. Ainda de acordo com relatórios apresentados por este autor, a variável terra cresceu 18,1% em 1995, e 9,6% em 2006, já a tecnologia, aumentou 50,6% em 1995 e 68,1% em 2006. Observando à balança comercial agrícola no Brasil, dos anos de 1990 a 2013, houve um salto de US\$ 7 bilhões para US\$ 76 bilhões em receita.

Diante dos avanços tecnológicos, as RSSF surgiram como uma grande e promissora alternativa para o campo de monitoramento e análise de ambientes. As RSSF tem como objetivo monitorar ambientes por meio de sensores, nos quais devem trabalhar de forma conjunta e

interligadas através de ligações sem fios (DÍAZ et al., 2011).

Nos últimos anos, vem sendo realizados diversos estudos combinando a tecnologia RSSF na agricultura, destacando-se algumas áreas de aplicações, tais como as apresentadas em (OJHA; MISRA; RAGHUWANSHI, 2015):

- Agricultura de precisão;
- Sistema de gerenciamento de irrigação, utilizadas para otimizar o uso de água através da irrigação inteligente;
- Monitoramento de sistemas agrícolas;
- Controle de doenças e pragas em diferentes tipos de cultivo;
- Uso controlado de fertilizantes e pesticidas;
- Monitoramento e rastreamento de animais;
- Monitoramento de gases do efeito estufa;
- Rastreamento de ativos, onde é possível monitorar, rastrear e controlar veículos e sistemas de irrigação à distancia pelos fazendeiros; e,
- Controle remoto e diagnósticos de dispositivos agrícolas.

Destacam-se, entre as motivações para o desenvolvimento do presente trabalho, investigar o uso de RSSF como melhoria dos métodos tradicionais de agricultura, sendo um campo promissor em todo o Brasil e especificamente na região sul de Santa Catarina. Apesar das limitações deste tipo tecnologia, tais como, o uso de baterias, baixa capacidade de processamento e memória, os resultados de pesquisas neste setor são muito promissores.

Observando as ferramentas de monitoramento agrícola, nota-se que as RSSF se tornam uma grande alternativa para AP, pois apresentam algumas vantagens, tais como: alto nível de detalhe, baixo custo para coleta periódica de dados e por se tratar de uma tecnologia não intrusiva em sua implementação (MOREIRA, 2009), além de possibilitar escalonamento, monitoração de dados específicos, baixo custo na implementação.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar o desempenho de diferentes tipos de tecnologias de comunicação sem fio em uma rede de sensores para monitoração e controle aplicados a agricultura de precisão.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral seja alcançado os seguintes objetivos específicos foram elencados:

- Criar, por meio de *software* de simulação diferentes cenários de simulação para análise do problema;
- Identificar as principais métricas de desempenho através de pesquisa bibliográfica de trabalhos relacionados na área;
- Desenvolver os modelos, simular por períodos determinados através de métricas de estatística;
- Avaliar e validar os resultados obtidos no modelo simulado;
- Comparar os resultados dos diferentes tipos de protocolos.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho envolveu pesquisas bibliográficas, simulação e análise de resultados.

- Fazer a pesquisa bibliográfica exploratória sobre Redes de Sensores sem Fio e Agricultura de Precisão, considerando as características de frequência, distância e consumo de energia;
- Estudar e definir simuladores de redes sem fio: Nesta etapa serão estudado e definido qual o melhor simulador para este trabalho;
- Caracterizar o ambiente de simulação: Para que seja possível realização das simulações serão necessário a definições de alguns parâmetros do ambiente de simulação;

- Estudo e definição de métricas de avaliação: Para avaliar o desempenho da rede proposta serão necessário levar em consideração algumas métricas de desempenho;
- Definição de etapas da simulação: Nesta atividade deverão ser definidas as etapas de simulação, como incrementos de distancias entre componentes da rede, numero de medições realizadas e seus respectivos tempos de execução. Basicamente essa etapa definirá como as simulações serão executadas;
- Executar as simulações: Nesta etapa serão realizados os testes de simulação;

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre redes de sensores sem fio e agricultura de precisão. Foram analisados diversos artigos e dissertações nesta área, os principais trabalhos estão mencionados neste capítulo. A escolha dos protocolos foi feita a partir dos estudos aqui realizados.
- O Capítulo 3 descreve os detalhes dos materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo estão descritos a modelagem do experimento, os cenários simulados, as tomadas de decisão para a elaboração dos experimentos, bem como os aspectos de comunicação de cada dispositivo que foi empregado nos experimentos.
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos experimentos de simulação através de uma análise considerando o distanciamento entre os nós de cada protocolo simulado.

E por fim, seguem a conclusão, os trabalhos futuros e as referências bibliográficas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO

O termo *agricultura de precisão* surgiu há 30 anos, especificamente na Europa e nos Estados Unidos. Nessa época, algumas pessoas já apresentavam trabalhos onde demonstravam a utilidade de se gerenciar lavouras de forma detalhada e específica. Além do processo gerencial foram realizadas aplicações práticas de mapas de produtividade e taxas variáveis de aplicações de adubos para as culturas. Esses movimentos auxiliaram na criação das bases para prática de AP, na qual foi tema no Congresso de Internacional de Agricultura de Precisão (CIAP) no ano de 1980. Foi através de congressos, como o CIAP, que conseguiram afirmar a relevância nos meios técnicos e científico sobre o tema AP em âmbito mundial.

Já no Brasil, as atividades voltadas para AP surgiram de forma dispersa, nos anos de 1990 iniciaram-se as primeiras ações neste tema através da importação de máquinas agrícolas que realizavam colheitas com monitores de produção acoplados. Em 2000, começaram a aparecer máquinas, que realizavam aplicações com taxa variável de corretivos e adubos. Em relação a eventos, no Brasil aconteceu o primeiro simpósio sobre AP em 1996 na Universidade de São Paulo, Campus da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, a partir do surgimento de diversos eventos sobre AP resultou-se na formalização da AP pelo , em 2012.

Segundo a portaria N ° 852, criado pelo MAPA, definiu-se o termo Agricultura de Precisão como: “um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva, na qual visa o aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente” MAPA (2012). Sendo assim, AP representa a integração de sistemas de informação e tecnologias em um sistema de manejo, trabalhando com a premissa que as variabilidades de espaço e tempo influenciam nos rendimentos dos cultivos.

A definição de AP pode variar bastante, segundo Bramley e Tren-gove (2009), AP é um conjunto de tecnologias que promovem melhorias na gestão de sistemas de produção agrícolas, essas melhorias são baseadas no reconhecimento potencial de respostas das lavouras pode variar consideravelmente, mesmo em pequenas distâncias.

O uso de ferramentas na AP contribui para o aumento da qualidade e na diminuição das perdas na agricultura. Por meio de tais

ferramentas é possível obter informações para análise de parcelas subdivididas em pequenas áreas (informações geográficas georreferenciadas), relativos a irrigação, propriedades físicas do solo, necessidade de aplicação de defensivos. Quanto mais subdividida a propriedade rural, mais útil será a informação georreferenciada. O controle das variáveis que influenciam o cultivo depende do maior detalhamento das informações. Hoje em dia, diversas ferramentas estão disponíveis para utilização na AP. Segundo Lamparelli (2017), pode-se citar alguns sistemas como: , tecnologia de aplicação em taxa variável, sistemas de informações geográficas (SIG), monitores de colheitas e sensoriamento remoto.

2.2 REDES DE SENSORES SEM FIO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), ou Wireless Sensor Networks (WSN), em inglês, surgiram diante dos avanços tecnológicos nas áreas de comunicação e eletrônica, e fizeram que se tornasse possível o desenvolvimento de redes de baixo custo, baixa potência e com característica multi funcional. Sensores são dispositivos de baixo custo e se conectados em rede, podem ser empregados, tanto para sistemas de monitoramento quanto de controle (SRBINOVSKA et al., 2015).

É difícil comparar as RSSFs com as redes sem fio tradicionais, em primeiro lugar, porque são tipos de estruturas com propósitos muito diferentes, enquanto uma rede tradicional se destina a transmitir um volume de dados grande com um alcance determinado, as redes de sensores permitem uma maior flexibilidade na infraestrutura com a limitação de quantidade de dados e processamento. Segundo Raber et al. (2013), características como quantidade de sensores distribuídos, consumo de energia, mecanismos de autoconfiguração, e necessidade de auto-organização caso haja a falha ou perda de um nó são atribuídas às redes de sensores. Outras diferenças de RSSF e redes tradicionais, a destacar conforme Rackley (2007):

- Uma rede de sensores podem ter números elevados, o padrão utilizado pelas redes Zigbee permite até 64000 nodos em uma rede, flexibilizando a distribuição e densidade dos nodos;
- Os nodos sensores são propensos a falhas devido a deslocamentos indevidos conforme a sua utilização em ambientes abertos, tempo de vida das baterias, por se tratarem de recursos mais frágeis;
- A topologia de uma rede de sensores pode ser estacionária, móvel ou híbrida;

- Os nodos sensores possuem limitação de capacidade de processamento, de taxa de transferência de dados, de tempo de vida de bateria e de memória;

2.2.1 Arquitetura das RSSFs

A aplicação de uma rede de sensores influencia diretamente na definição da estrutura física e das funções da rede. Questões relacionadas a arquitetura e disposição dos nós (tipo de processador, memória, sensores empregados, fontes de energia), na quantidade de nós na rede, a distribuição planejada para a rede, a disposição dos nós no ambiente a ser monitorado ou controlado, na escolha dos protocolos de comunicação, nos tipos de dados que serão tratados, no tipo de serviço que será fornecido pela rede e conseqüentemente no tempo de vida dessa rede e de suas baterias. Até mesmo a forma adequada para a coleta dos dados irá depender do tipo de aplicação.

Em (RUIZ, 2003) são apresentadas uma série de classificações com relação às características das RSSFs de forma geral, considerando a configuração, o sensoriamento, a comunicação e o processamento. A classificação considerando os tipos de configuração, analisando a composição da RSSF, a sua organização, as questões de mobilidade, a densidade dos nós e sua distribuição, são conceitos importantes e empregados no presente trabalho.

Quando analisado a composição de uma RSSF para agricultura, é possível encontrar os dois tipos de redes, tanto as redes homogêneas, que são redes em que os nós apresentam a mesma capacidade de hardware, quanto as redes heterogêneas: que são as redes que apresentam nós com diferentes tipos de capacidades de hardware. Analisando os estudos pesquisados, a maioria são redes homogêneas, como por exemplo, os trabalhos de Pereira et al. (2014), Khattab, Abdelgawad e Yelmarthi (2016) e Moreira (2009) são apresentados RSSF com nós que possuem as mesmas capacidades de hardware, tendo apenas funcionalidades diferentes na rede. Diferente de Nakutis et al. (2015) que apresentam uma arquitetura heterogênea para o processo de automação de agricultura, envolvendo sensores e atuadores conectados a um *gateway* de Internet das Coisas (*Internet of Things* (IoT), em inglês).

Em relação a hierarquia das RSSF para a agricultura, grande parte dos trabalhos encontrados utilizam uma organização plana, onde os nós não estão organizados em grupos, e sim organizados de forma individual. No entanto, foram pesquisados ainda outros trabalhos que

utilizam a organização hierárquica. A organização hierárquica divide os nós em grupos com diferentes tipos de hierarquias, como é apresentado pelos autores Malik e Szwilski (2016) e Chen et al. (2013).

Quando classificada uma RSSF em relação a mobilidade, na agricultura existem muitos trabalhos onde os nós são móveis, esses trabalhos podem ser encontrados em RSSF para rastreamento de maquinários agrícolas (MÜLLER; RITTENSCHÖBER; SPRINGER, 2010), rastreamento de animais (KWONG et al., 2011) e atualmente muitos estudos estão sendo realizados com veículos aéreos não tripulados associados a RSSFs para agricultura (GONÇALVES et al., 2015). RSSF com mobilidade estática são encontradas em sistemas de monitoramento agrícolas em estufas como em (AHONEN; VIRRANKOSKI; ELMUSRATI, 2008) ou em alguns casos de monitoramento e controle de culturas em campos (VERMA; CHUG; GADRE, 2010).

Para classificação de uma RSSF em relação a densidade existem basicamente três tipos, redes onde os nós estão em uma baixa concentração por metro quadrado, como em (MOREIRA, 2009). Foram encontradas também redes com um nível de concentração ideal, essas redes são denominadas redes balanceadas. E por último em relação densidade, existem trabalhos com as redes densas, onde apresentam um alto número de nós concentrados por metro quadrado (GONÇALVES et al., 2015).

Por fim, em relação a distribuição dos nós na rede, é possível classificar como redes irregulares ou redes regulares. As redes regulares apresentam uma distribuição uniforme sobre a área monitorada, esse tipo de distribuição pode ser encontrada como no trabalho desenvolvido por Gonçalves et al. (2015). Já para redes irregulares onde os nós são distribuídos de forma não uniforme sobre a área monitorada foi encontrado no trabalho apresentado por Pereira et al. (2014).

Em relação as topologias para RSSFs, a maioria dos protocolos de roteamento e MAC estão focados em reduzir o consumo de energia do nó para aumentar a vida útil da rede e para evitar substituições frequentes da bateria, sendo assim, as topologias para RSSFs são menos variáveis do que para redes tradicionais. Em geral, as topologias comumente encontradas para aplicações agrícolas são malha, estrela e árvore (REINA et al., 2013). A definição do tipo de topologia para devidas aplicações dependem também das tecnologias utilizadas para a comunicação da rede. RSSF com tecnologias de longa distância (que utilizam a faixa de 900MHz) tendem a restringir as topologias em nós centralizadores. Já as tecnologias projetadas para o uso em 2,4GHz permitem diferentes tipos de topologias, como as citadas anteriormente.

2.2.2 Tipos de aplicações

Na agricultura de precisão existem diversos tipos de aplicações de monitoramento, tais como: monitoramento ambiental interno/externo, monitoramento de saúde e bem-estar, monitoramento energético, monitoramento de localização, automação de fábricas e processos, e monitoramento sísmico e estrutural. Ou aplicações de rastreamento, essas aplicações incluem rastreamento objetos, animais, humanos e veículos (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008). Dentro da agricultura, uma RSSF pode ser aplicada em diversos setores, agricultura protegida, campos e em animais. Na agricultura protegida tem sido realizados vários estudos combinando a tecnologia RSSF, como em (SRBINOVSKA et al., 2015; HWANG; YOE, 2011), esses estudos apresentam sistemas para monitoramento e controle de parâmetros das culturas. Em alguns casos de plantações em campo (PEREIRA et al., 2014; FLORES et al., 2016; KHATAB; ABDELGAWAD; YELMARTHI, 2016), experimentos tem sido realizados para estudos de aplicações de monitoramento e controle agrícola. Já em aplicações com animais podem ser destacadas, como o emprego de RSSF para a contagem e controle de gados (KWONG et al., 2011) e (HUIRCÁN et al., 2010) ou para o monitoramento de rebanhos de cabras (NETO et al., 2010).

Analisando uma RSSF como uma ferramenta para AP, destaca-se ela como uma alternativa para levantamento de dados das plantações tais como: temperatura, luz, umidade e PH, e também para atuar como aliado nos processos de irrigação e acionamento de bombas. Combinando esses dados com informações de GPS pode-se proporcionar um conhecimento preciso e atualizado do campo para gestão e tomadas de decisões (SILVA, 2008). Outros tipos de aplicações são construção de mapas sensoriais, onde podem ser obtidos dados em tempo real, organizando os nós em grade ou ainda aplicação em parreirais como apresentado em (LLORET et al., 2011) onde são monitorados temperatura, luminosidade, umidade do solo e umidade do ambiente.

2.2.3 Composição das Redes de Sensores Sem Fio

Uma RSSF pode ser composta pelos componentes descritos abaixo:

- **Nó:** O nó ou também conhecido na literatura como *node* e *mote*, são dispositivos autônomos equipados com capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação. Basicamente esse dispo-

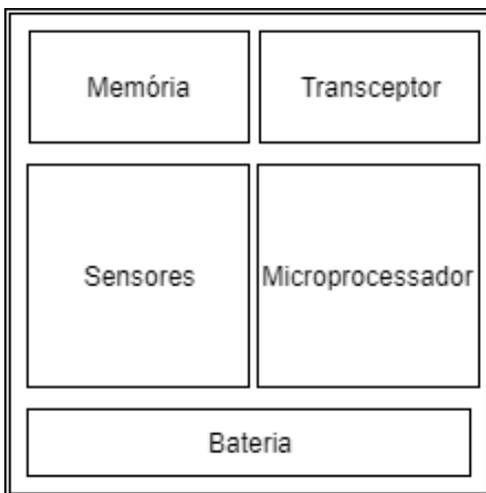
sitivo realiza o sensoriamento de alguma variável, converte essa variável para digital e envia esses dados por intermédio de um meio de comunicação;

- *Gateway*: Os *gateways*, são dispositivos parecidos com nós no hardware, são eles que encaminham as mensagens exploratórias para os nós da rede aguardando respostas. Também é papel do *gateway* encaminhar mensagens, por uma rede, até o computador do operador;
- *Aplicação*: É o dispositivo final que recebe as informações do *gateway* e disponibiliza para os usuários dependendo da aplicação final, essa aplicação pode ser em modo local ou até mesmo na Nuvem.

2.2.4 Componentes de um Nó Sensor

Como apresentado anteriormente, o principal elemento de RSSF são os nós sensores, de forma geral esse dispositivo é formado pelos seguintes componentes: *hardware* sensor, memória de armazenamento de dados, bateria de alimentação, microcontrolador de sinais e módulo transceptor, conforme apresenta a Figura 1.

Figura 1 – Componentes de um Nó



Fonte: do autor.

Para autores como (LOUREIRO et al., 2003) e (SANTOS, 2007), os componentes trabalham de forma integrada e conjunta para funcionamento geral. O *hardware* sensor é responsável por realizar a leitura de uma variável, que normalmente é analógica, realiza a conversão desta variável quando necessário. O tratamento destes dados é realizado pelo microcontrolador, onde prepara todos os dados para armazenar em uma memória as informações. Já o transceptor tem como tarefa realizar a transmissão dos dados por uma rede sem fio. Por fim a bateria de alimentação serve para alimentar todos os demais componentes do nó.

2.2.5 Padrões de Comunicação para RSSF

Os padrões de transmissão para RSSF são responsáveis por definir os formatos de troca de dados, a codificação de dados, as formas de endereçamento para dispositivos e o roteamento de pacotes (RAY, 2016). Além de descrever funções que incluem controle de sequência, controle de fluxo e retransmissão de pacotes perdidos.

É possível encontrar diversos protocolos de comunicação para RSSF, são diferenciados por algumas características, tais como frequên-

cia de funcionamento, taxa de transmissão, alcance de transmissão, consumo de energia e custo. Dentre esses, temos o já consagrado padrão IEEE 802.11, desenvolvido como uma alternativa ao padrão cabeado Ethernet. O protocolo Bluetooth, também é um padrão consagrado e muito utilizado nas redes sem fios *Personal Area Networks* (PAN). Outros protocolos mais recentes como IEEE 802.15.4, IEEE 802.11ah, Long Range (LoRa) (LORAALLIANCE, 2017), Sigfox (SIGFOX, 2017) e RPMA (INGENU, 2017) também surgiram como alternativas para uma comunicação sem fio eficiente sobre longas distâncias.

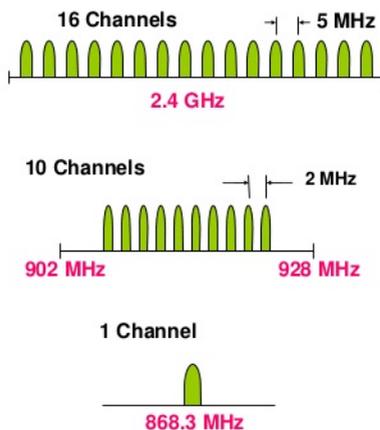
Como cada um dos padrões trabalha em faixas de frequências diferentes, novos padrões como IEEE 802.11ah e Lora ainda estão formalizando em qual banda ISM (*Industrial, Scientific & Medical*), irão operar em cada região. Para o padrão IEEE 802.11ah, existem varias bandas ISM disponíveis abaixo de 1GHz. O padrão Lora ainda utiliza bandas sem licença ISM em algumas regiões. Já o padrão IEEE 802.15.4 já tem definidas suas bandas ISM.

2.2.5.1 IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 define todas as especificações de comunicação da camada física e da camada de acesso ao meio para redes de comunicação sem fio que operam com baixa taxa de transmissão de dados. As principais características dos dispositivos que utilizam do padrão IEEE 802.15.4 são a baixa vazão de dados, reduzido consumo energético e baixo custo.

Em relação a camada física do padrão IEEE 802.15.4, ele trabalha sobre as bandas de frequência ISM. Com relação as faixas de frequências, o padrão IEEE 802.15.4 define 3 faixas de frequência que pode-se utilizar. No Brasil, é utilizada a frequência de 2,4GHz, onde são disponibilizados 16 canais para a banda de frequência. Já em grande parte de Europa a faixa de trabalho fica em 868 MHz, onde apenas um canal para banda de frequência. Nos Estados Unidos e Américas é utilizado a faixa de 915MHz com 10 canais para banda (MELO, 2017). A Figura 2 ilustra as divisões das frequência e seus canais do padrão IEEE 802.15.4.

Figura 2 – Faixas de frequências com a respectiva atribuição de canais



Fonte: (MELO, 2017)

A taxa de dados no padrão IEEE 802.15.4 pode variar de acordo com frequência utilizada. A Figura 3 apresenta a taxa de dados de acordo com frequência utilizada.

Figura 3 – Taxa de Dados e respectivas Frequências

Frequências	Taxa de Dados
2.4 – 2.4835 GHz	250 kbits/s
868 – 870 MHz	20 kbtis/s
902 – 928	40 kbtis/s

Fonte: do autor.

As faixas de frequência abaixo de 2.4 GHz utilizam como método de transmissão *Direct Sequence Spread Spectrum*, que reduz o consumo de energia devido à baixa potência utilizada na transmissão de dados. A faixa de 2.4 GHz apresenta modulação por mudança na fase da portadora do tipo *Offset Quadrature Phase Shift Keying*. As outras duas faixas de frequência utilizam modulação do tipo *Binary Phase Shift Keying*, o tipo mais simples de PSK.

De acordo com (FAZZANARO, 2016), quanto maior a frequência

utilizada maior será a taxa de dados que será transmitidas e também será maior o numero de canais disponíveis. Porém, quanto maior a frequência a ser utilizada, mais propenso a comunicação estará sujeita a interferências durante as transmissões.

No padrão 802.15.4 o controle de acesso ao meio é controlado através de mecanismos de prevenção e colisão, definidos pelo protocolo CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Segundo Melo (2017), quando um nó deseja fazer transmissão ele envia um sinal de aviso, por tempo suficiente para que todos os componentes da rede o recebam. Só então os dados são transmitidos. Se durante uma transmissão um sinal de aviso for detectado o emissor interrompe o envio da mensagem, reiniciando a tentativa de transmissão após um período aleatório.

2.2.5.2 IEEE 802.11ah

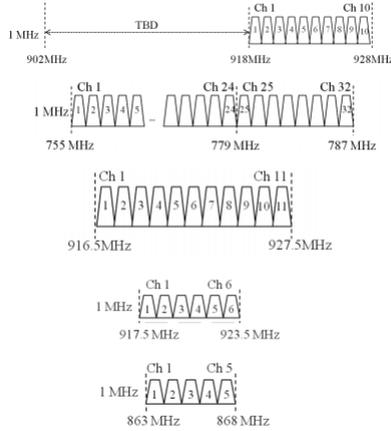
Com o rápido crescimento de aplicações em RSSF, surgiram novas redes sem fio operando em frequências próximas de 900MHz. Destaca-se o padrão IEEE 802.11ah, desenvolvido pelo grupo IEEE 802.11, possui como objetivo criar normas para redes sem fio operando em frequências abaixo de 1GHz. As redes 802.11ah também pretendem oferecer uma faixa de transmissão melhorada comparada com as outras redes 802.11 que operam na faixa de frequência 2,4GHz e 5GHz.

As camadas PHY e MAC do padrão IEEE 802.11ah deverão suportar as aplicações em rede de larga escala, cobrindo os aspectos que possam melhorar o desempenho dessas redes. A camada PHY é baseada na camada PHY do padrão IEEE 802.11ac, com taxas e bandas sendo um décimo das projetadas para o padrão IEEE 802.11ac.

As faixas de frequências de 1 GHz disponíveis para 802.11ah dependem muito dos países em que irão trabalhar, alguns espectros já foram definidos, como nos Estados Unidos, Coreia do Sul, China, Europa, Japão e Singapura. Nos Estados Unidos as faixas permitidas para 802.11ah estão entre 902MHz e 928MHz, na Coreia do Sul a faixa já fica com início 917.5MHz e fim 923.5MHz. No Japão a frequência de trabalho fica entre 916.5 MHz e 927.5 MHz, a faixa de frequência Europa fica em 863 MHz e 868 MHz (AUST; PRASAD; NIEMEGER, 2012). No Brasil, o padrão irá coincidir com bandas usadas por operadoras de serviço móvel de telefonia, sendo assim necessário um ajuste nas faixas de conflito, assim como acontece em uma parcela da faixa dos Estados Unidos que está reservado para TV.

A Figura 4 ilustra as divisões das frequência e seus canais do padrão IEEE 802.11ah.

Figura 4 – Atribuição de canais do padrão 802.11ah



Fonte: do autor.

A taxa de dados no padrão IEEE 802.11ah pode variar de acordo com a frequência utilizada. Segundo (SEOK, 2016), o padrão IEEE 802.11ah permite vários modos de taxa de dados, a baixa (a partir de 150 Kbps) e modos de taxa mais alta (até 346 Mbps). Em relação às topologias suportadas pelo padrão 802.11ah, estão elas as topologias estrela e árvore.

No padrão 802.11ah, a camada MAC além de permitir a identificação dos nós sensores em uma RSSF, também dispõe de um mecanismo CSMA - CA (*Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance*), para evitar a colisão de dados entre os nós na rede, durante a transmissão dos dados.

2.2.5.3 LoRa

O padrão LoRa foi desenvolvido por uma organização sem fins lucrativos chamada LoRa Alliance. A LoRa Alliance inclui mais de 200 empresas, surgiu a partir de junho de 2016. O padrão LoRa se encaixa no tipo de tecnologia denominada rede de área ampla de baixa

potência (em inglês, *Low Power Wide Area Network*(LPWAN), esses tipos de redes permitem uma comunicação sem fio eficiente através de distâncias muito longas, que variam de 5a 20km.

LoRa é considerada a camada física, enquanto que o termo LoRaWAN é um protocolo de ligação de dados de nível MAC para uma rede de alta capacidade e baixa potência, a qual o LoRa Alliance está padronizando para redes de área ampla de baixa potência. O protocolo LoRaWAN é otimizado para sensores de baixo custo, com bateria e inclui diferentes classes de nós para otimizar o *tradeoff* entre a latência da rede e a vida útil da bateria.

Segundo Bor et al. (2016), os dispositivos Lora disponíveis hoje podem operar entre 137MHz a 1020MHz. Em alguns países, já estão definidos os espectros em que as redes Lora poderão atuar. Nos Estados Unidos, por exemplo, as faixas permitidas estão entre 433MHz e 915MHz, a faixa de frequência na Europa fica em 433 MHz e 915 MHz. No Brasil, segundo relatório da (ABINC, 2016) ainda não existe na especificação atual um plano de frequências oficialmente atribuído. O plano de frequências Europeu é totalmente incompatível com a faixa de frequências no Brasil, já o americano pode ser usado em parte no Brasil respeitando-se as recomendações da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), tendo em vista que a faixa compreendida entre as frequências de 907,5 a 915 MHz não poderão ser utilizadas por pertencerem a um grupo de telecomunicação.

A camada física LoRa usa uma forma de modulação do espectro espalhado. O esquema de modulação LoRa usa pulsos modulados em frequência linear de banda larga. O nível de frequência aumenta ou diminui ao longo do tempo é usado para codificar os dados a serem transmitidos, ou seja, uma forma de modulação de chirp. Esta forma de modulação permite que os sistemas LoRa demodulam sinais que são 20dB abaixo do piso de ruído quando a desmodulação é combinada com correção de erro direta, FEC. Isso significa que o orçamento do link para um sistema LoRa pode fornecer uma melhoria de mais de 25dB quando comparado a um sistema FSK tradicional (POOLE, 2017).

Em relação as topologias suportadas pela tecnologia LoRa, apenas a topologia estrelas pode ser empregada pelo Lora. Em relação a taxa de dados, em uma rede LoRa pode variar de 0.3 kbps até 50 kbps.

2.2.6 Uso de plataformas de simulação de RSSF na Agricultura

O uso de tecnologias no setor agricultura está crescendo de forma considerável, a inclusão está sempre buscando melhorias em produção e gerenciamento. Levando em conta os impactos que a inclusão tecnológica está fazendo na produção agrícola, muitos países vem incentivando pesquisas e desenvolvimento de tecnologias e aplicações voltadas para agricultura. Alguns trabalhos no meio científico propuseram um sistema com redes de sensores para resolver qualquer demanda do meio agrícola.

Em alguns trabalhos publicados, como em (PEREIRA et al., 2014), os autores propõem uma aplicação utilizando uma rede RSSF para controladores lógicos programáveis em conjunto com inversores de frequências voltados para um sistema de irrigação, esta arquitetura é desenvolvida utilizando ZigBee (IEEE 802.15.4), Modbus-RTU e Compobus para a comunicação dos dispositivos e sensores. Já em (KHATTAB; ABDELGAWAD; YELMARTHI, 2016), os autores propõem uma arquitetura de IoT baseada em nuvem, na qual é aplicado em uma possível solução para agricultura de precisão, para comunicação foram utilizados os módulos nRF24L01. Em (GUTIÉRREZ et al., 2014), os autores apresentam um sistema de gerenciamento de nós de sensores sem fio em uma estufa. Para comunicação entre os componentes das redes foram utilizados XBee Pro S2 como transceptor, para umidade de solo foram utilizados os sensores VH400 e para temperatura do solo DS1822 como sensor de temperatura.

Foram encontrados trabalhos que utilizam simulações de RSSF para agricultura, como por exemplo, (RABER et al., 2013), onde os autores propuseram um estudo sobre RSSF e protocolos hierárquicos, a fim de auxiliar na decisão de qual protocolo melhor atende as necessidades exigidas para um estudo de caso. Para tal estudo foram utilizados o simulador NS-2 e algoritmos de Leach e Leach-c para roteamento e em uma área de 9 ha foi possível observar o melhor resultado. Em (FAZZANARO, 2016) é realizado um estudo de protocolos voltados para o agronegócio, nele os autores utilizam o simulador OmNet++ para avaliar protocolos em uma determinada área com apenas um nodo coordenador e um nodo cliente. Já com outro foco na agricultura, os autores (GONÇALVES et al., 2015) apresentam um estudo de RSSF voltada para aplicação de uma nova técnica de pulverização. Com o auxílio de uma ferramenta de simulação OmNet++ os autores avaliaram o desempenho da RSSF tendo em vista que fazem uso da opção de mobilidade para si-

mular um Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) como um componente da rede.

Observando grande parte dos trabalhos, fica evidente que grande parte dos estudos estão relacionados a algum tipo de aplicação final utilizando RSSF, há muito espaço para melhorar em relação implantação da rede de sensores sem fio no setor agrícola para cenários em campos com larga escala e funcionamento em tempo real. Analisando as metodologias dos autores, fica claro que poucos utilizam de sistemas de simulação para desenvolvimento e validação de suas redes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

As ferramentas de simulação são importantes para a fase de avaliação de arquiteturas e protocolos a ser empregados em um projeto de maneira geral. Estes ambientes de desenvolvimento permitem modelar uma rede de dispositivos arbitrária especificando o comportamento dos elementos da rede, bem como os enlaces de comunicação (JABEEN; NAWAZ, 2015). As ferramentas de simulação se tornam essenciais quando há a necessidade de implementar um grande número de sensores em uma rede, tendo em vista que sem o uso da simulação isso se tornaria dispendioso e difícil. Quanto maior a escala de testes de utilização dos dispositivos mais importante se torna o uso destas ferramentas.

Entre os principais simuladores para RSSF pesquisados, destacam-se:

- Cooja: O Cooja é um simulador para os sistemas operacionais Contiki. Este simulador é implementado em Java, mas permite a programação dos nós na linguagem C. Além disso, o simulador COOJA permite a exportação de código para a plataforma de hardware. É muito útil para os desenvolvedores testar e implantar seus próprios aplicativos e protótipos com a melhor compensação entre tempo de desenvolvimento e flexibilidade de hardware (BEDNARCZYK et al., 2016). Vale ressaltar que um nó simulado no Cooja é um sistema Contiki real compilado e executado.
- Tossim: O TinyOS Simulator, ou mais conhecido como Tossim, é um simulador baseado em eventos discretos que fornece alta fidelidade, escalabilidade completa e estabelece a ponte entre os algoritmos e implementação. Com o Tossim um grande número de nós podem ser simulados de uma só vez, na abstração do Tossim, a rede é um grafo orientado no qual cada vértice é um nó e cada aresta (enlace) tem uma probabilidade de erro de bit. O simulador fornece um conjunto de serviços que permitem interação com aplicativos externos (DERHAB; OUNINI; REMLI, 2012). A grande vantagem do Tossim é que o código usado para simulação também pode ser executado no nó real, reduzindo assim o esforço para reescrever o código e também permitindo uma melhor comparação entre resultados experimentais e de simulação.

- ns-2/ns-3: Com a sua primeira versão desenvolvida por meados de 1989, ele foi baseado no Real Network Simulator. Sua primeira versão foi desenvolvida na Universidade de Berkley, o ns-2 é um simulador de eventos discretos para rede de computadores de código aberto. As simulações para ns-2 são compostas por código em C++ e Tcl. O código é utilizado para modelar o comportamento dos nós, enquanto o script controlam a simulação e especificam aspectos adicionais, como a topologia da rede. Já ns-3 teve sua primeira versão lançada em 2008, tem a mesma premissa de seu antecessor, com melhorias na arquitetura do núcleo, integração de software, modelos e componentes do ns-2, porém não suporta mais scripts Tcl.

A seção a seguir é dedicada a descrever o software escolhido para os experimentos no presente projeto. O OMNet++ é um simulador de eventos discretos que possui um catálogo de modelos de simulação ou *frameworks* disponíveis que abrangem diversos protocolos e redes de dispositivos agilizando o processo de modelagem e a respectiva criação dos experimentos.

3.2 DESCRIÇÃO DE SOFTWARE UTILIZADO

Semelhante a grande partes dos simuladores citados na seção anterior, o OMNet++ é um simulador de eventos discretos, no qual fornece amostras e bibliotecas (ou *frameworks*) que podem ajudar a criar facilmente uma variedade de simulações de rede sensores inteligentes. OMNeT++ oferece uma IDE baseada no Eclipse, um ambiente de execução gráfica e uma série de outras ferramentas. Existem extensões para simulação em tempo real, emulação de rede, integração de banco de dados, integração de sistemas, entre outras funções (SANTOS et al.,).

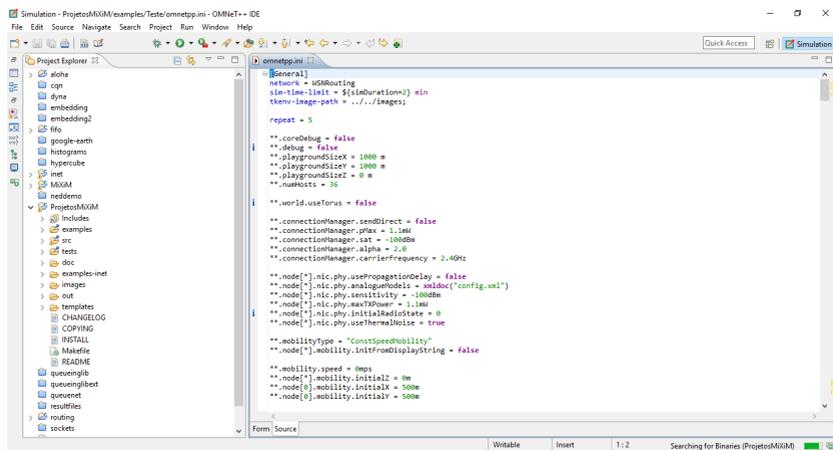
O OMNet++ possui uma linguagem própria, ela é chamada de NED, essa linguagem representa a descrição da rede que será simulada pelo usuário. O usuário escreve por meio da NED a estrutura de um modelo de simulação, esse modelo é composto por módulos simples ou até mesmo módulos compostos. Esses módulos que compõem a rede podem ser programados utilizando a linguagem de programação C++.

Os módulos simples são os componentes bases no modelo de simulação, eles podem ser estendidos (ou especializados) por subclasses. Já os módulos compostos agrupam outros módulos em uma unidade maior. Um módulo composto pode ter portas e parâmetros como um

módulo simples, mas nenhum comportamento ativo está associado a ele. Tanto o módulo simples quanto o composto contam com algoritmos internos que permitem calcular, medir o tempo e analisar se há existência de pacotes corrompidos, para possíveis reenvios (FAZZANARO, 2016).

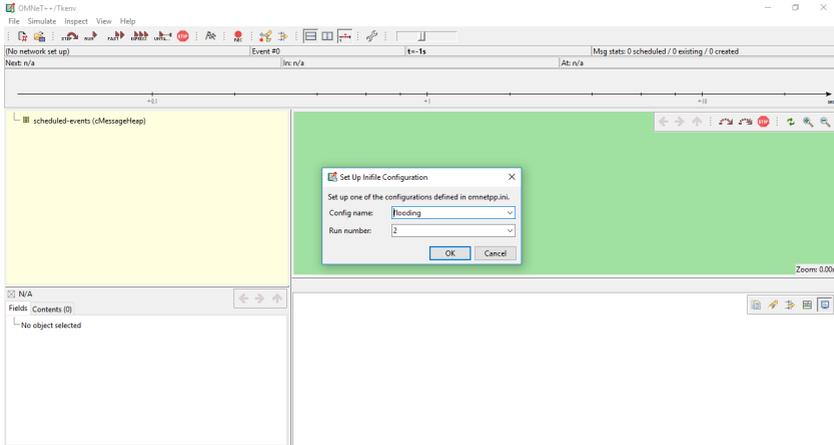
O ambiente para o desenvolvimento da rede a ser simulada pode ser observado na Figura 5, é neste ambiente onde encontra-se todos os arquivos do projeto proposto. Quando iniciado as simulações o OMNet++ oferece um segundo ambiente onde é realizado as simulações, é a partir desse ambiente que serão gerados os dados quantitativos e qualitativos sobre as simulações executadas. A Figura 6 apresenta o ambiente onde são executadas as simulações.

Figura 5 – Ambiente de Desenvolvimento OMNet++



Fonte: do autor.

Figura 6 – Ambiente de Simulação OMNet++



Fonte: do autor.

Para facilitar as implementações das redes desenvolvidas no OMNet++ alguns projetos de *frameworks* foram desenvolvidos, esses *frameworks* tem como objetivo abstrair a implementação de alguns módulos bases e algumas funcionalidades. Os *frameworks* mais conhecidos para OMNet++ são MiXim, INET e Castalia. O *framework* utilizado neste trabalho para implementação da rede proposta foi o MiXim.

3.2.1 Framework Mixim

O *framework* MiXiM é uma estrutura de modelagem para OMNet++ criada para redes móveis e fixas sem fio (redes de sensores sem fio, redes de área corporativa, redes ad hoc, redes veiculares). Em relação ao funcionamento o MiXiM pode ser dividido em duas partes: a estrutura base e as bibliotecas de protocolos. O MiXiM é projetado para suportar a simulação de redes com mais de 1000 nós, portanto, tem um baixo consumo de memória e sua estrutura modular permite a adaptação do nível de detalhe e assim, o tempo de execução (Köpke et al., 2008).

O MiXiM apresenta extensões únicas, como suporte 3D com modelo para paredes e obstáculos que influenciam a mobilidade e a atenuação de sinais de rádio, diferentes frequências e transmissão mídia

(ondas de rádio, ultra-som), suporte multi-canal completo no espaço e na frequência e muitos protocolos MAC.

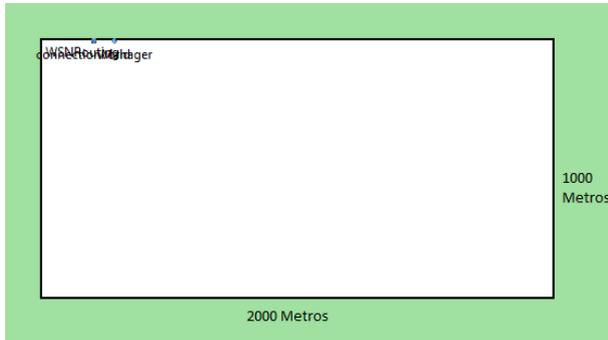
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Para atingir os objetivos do presente trabalho foi necessário o levantamento das informações dos ambientes de simulação. Essas informações são essenciais para configuração dos arquivos de simulação no OMnet++. Para cada um dos padrões avaliados foram criados projetos no simulador com arquivos "omnetpp.ini" que descrevem o ambiente no qual as simulações ocorreriam.

Os arquivos foram configurados de acordo com os parâmetros apresentados a seguir:

- Área de Cobertura: As áreas de simulações determinadas para os testes de simulações levou-se em conta o tamanho padrão utilizadas em certas culturas, tais como arroz, milho e soja, existem culturas tais como a de cana de açúcar cujos talhões são criados contornando as curvas de nível e com comprimento ideal para preencher a capacidade de um transbordo. Em algumas regiões, com terrenos acidentados, estes talhões são determinados conforme a capacidade das colheitadeiras. A partir de conversas com produtores rurais obteve-se como tamanho padrão para talhões (entende-se por talhões, a porção de terreno destinado ao cultivo) valores de 1000 metros de comprimento e 2000 metros de largura, cerca de 2 km^2 (200 hectares). A Figura 7 apresenta um exemplo de um talhão com 200 hectares.

Figura 7 – Talhão simulado



Fonte: do autor.

- **Topologia de Rede:** Com base nas características dos padrões avaliados aqui neste trabalho, foi definido a topologia estrela para simulações. Esta topologia foi escolhida por ser uma topologia possível a todos os padrões.
- **Nós Utilizados:** Nos experimentos realizados foi definido um nó central como coordenador e o restantes dos nós como nós comum. Figura 8 apresenta um exemplo das estrutura e disposição dos nós no talhão.
- **Carga Utilizada:** Tendo em vista que durante a simulação serão enviados pacotes do nó coordenador para os demais nós da rede na forma de *broadcast*, desta forma, foi preciso definir a quantidade de dados transmitidos nas simulações. Para o volume de dados definiu-se que o nó coordenador 100 pacotes com tamanho de 200 *bytes* cada. Definiu-se esse numero de pacotes baseados nos trabalhos (BRAHMA, 2011),(DÍAZ; GONZÁLEZ-BAYON; SÁNCHEZ, 2016) e (BHUSE; GUPTA, 2005).
- **Caracterização do Cenário:** Os cenários elaborados foram todos caracterizados de acordo com os ambientes visitados, no caso são ambientes externos simulando talhões de fazendas. Não se levou em consideração para caracterização dos cenários intempéries, tais como: vento forte, temporal, seca, calor tórrido e nevasca.

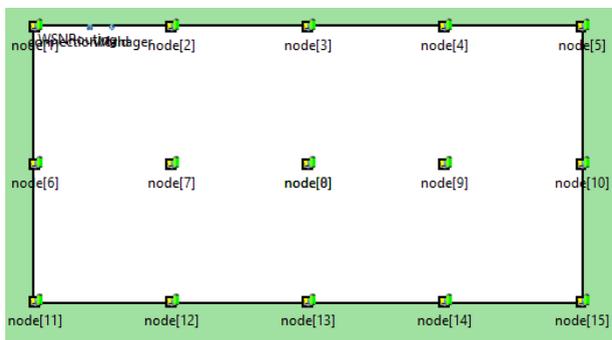
Figura 8 – Sensores no Talhão



Fonte: do autor.

Foram definidos quatro cenários para simulações dos padrões analisados. No cenário 1, para todos os padrões é proposto um cenário de baixa densidade de nodos, ou seja, com poucos nodos para o tamanho padrão do talhão. Portanto, foram distribuídos 15 nós comuns com distâncias entre eles de 500 metros latitudinal e longitudinal. A Figura 9 apresenta a disposição dos nós no cenário 1.

Figura 9 – Cenário 1



Fonte: do autor.

No cenário 2, o experimento considera uma situação mais densa para os nodos. Neste caso, foram distribuídos 66 nós comuns com distâncias entre eles de 200 metros latitudinal e longitudinal. A Figura 10

apresenta a disposição dos nós no cenário 2.

Figura 10 – Cenário 2



Fonte: do autor.

Já no cenário 3, foram aplicados mais nodos, representando uma situação ainda mais densa em termos de nodos, distribuindo 121 nós comuns com distâncias entre eles de 200 metros latitudinal e 100 metros longitudinal. A Figura 11 apresenta a disposição dos nós no cenário 3.

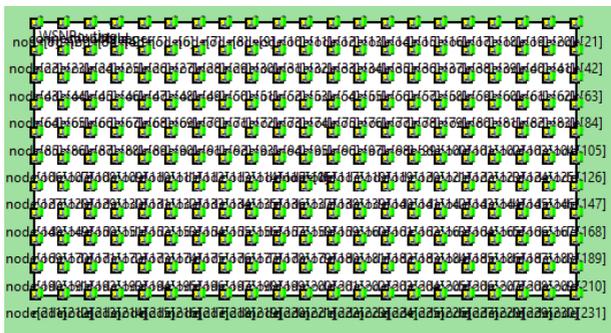
Figura 11 – Cenário 3



Fonte: do autor.

Por último, o cenário 4 foram distribuídos foi o teste de maior densidade em termos de nodos, com 231 nós comuns com distâncias entre eles de 50 metros latitudinal e longitudinal. A Figura 12 apresenta a disposição dos nós no cenário 4.

Figura 12 – Cenário 4



Fonte: do autor.

Em cada um dos cenários, o nodo emissor está localizado na posição central do talhão (500m e 1000m). Já as distâncias e localizações de cada nodo nos cenários 1,2,3 e 4 podem ser observadas no Apêndice D.

Para aplicação proposta neste trabalho, levou-se em consideração as características elencadas por (RUIZ, 2003). Em relação composição do nós, todos os nós possuem o mesmo hardware para comunicação em cada um dos cenários estudados. Para hierarquia dos nós, todos os nós todos eles eram organizados de forma individual. Para característica de mobilidade, todos os nós eram estáticos e possuem uma disposição regular por se tratar de uma aplicação de monitoramento para AP. As densidades dos nós variou-se entre os cenários por baixa, balanceadas e alta. Por último, para definição da topologia levou-se em consideração as limitações das tecnologias estudadas neste trabalho, sendo assim, se fez necessário a utilização de uma topologia estrela. Todas as características apresentadas nesses trabalho são voltadas para culturas planares como arroz, milho, cana, entre outras.

3.4 PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÃO DE SINAL

Segundo Fazzanaro (2016) e Tilak, Abu-Ghazaleh e Heinzelman (2002), as métricas para avaliar o desempenho de redes de sensores mais utilizadas são: eficiência da comunicação, taxa de perda de pacotes (TPP), latência, intensidade de sinal e a perda no espaço livre.

Neste trabalho, levou-se em consideração a análise das seguin-

tes métricas: eficiência da transmissão, taxa de perda de pacotes e a latência. A partir dessas análises serão avaliadas as tecnologias de transmissão que implementam os padrões 802.15.4, 802.11ah e Lora. As demais métricas não foram incluídas na análise por apresentarem melhor resultados em experimentos reais e não simulados.

A eficiência da comunicação entre dois pontos pode ser calculado por:

$$Ef = \frac{Rn}{Sn} \quad (3.1)$$

Onde Rn é número de mensagens recebidas pelo nó e Sn é a soma das mensagens enviadas pelo emissor.

A eficiência em uma RSSF se torna importante, tendo em vista que é a partir dela verifica-se a qualidade e se a rede realiza de maneira correta as suas funções de transmissão.

Já a latência, é uma demora entre o momento em que algo é iniciado e o momento em que um dos seus efeitos começa ou se torna detectável. Basicamente a latência é um atraso de tempo transmitido por cada elemento envolvido na transmissão de dados. Segundo (FAZ-ZANARO, 2016) a latência entre dois pontos pode ser calculada por :

$$Latência = TP + TT + TF + RP \quad (3.2)$$

Onde:

- Tempo de propagação (TP) é calculado a partir da equação 3.3, na qual utiliza-se a distância entre os pontos e a velocidade da propagação do sinal.

$$Tempo\ de\ Propagação = \frac{Distância}{Velocidade\ de\ Propagação} \quad (3.3)$$

- Tempo de transmissão (TT) é calculado por meio da equação 3.4, onde é considerado o tamanho da mensagem e a largura de banda do canal de transmissão.

$$Tempo\ de\ Transmissão = \frac{Tamanho\ da\ mensagem}{Largura\ de\ banda} \quad (3.4)$$

- Tempo de fila (TF) é tempo em que uma mensagem leva para processada quando chega ao receptor.

- Retardo do processamento (RP) é o tempo para analisar os dados recebidos, verificar o conteúdo do pacote, retirar as informações que não serão necessárias e processar o conteúdo.

Analisando a equação da latência, observa-se que ela depende de diversas variáveis, as variáveis que influenciam e podem ser configuradas no simulador são o tamanho dos pacotes e a quantidade dos pacotes transmitidos. As demais variáveis não puderam ser configuradas no simulador, pois ele trata internamente esses tipos de configurações.

Para taxa de pacotes perdidos utiliza-se a equação 3.5 para o cálculo.

$$TPP = TPT - TPRS \quad (3.5)$$

Onde TPT é o total de pacotes transmitidos pelo emissor e $TPRS$ é o total de pacotes recebidos com sucesso pelo receptor.

Seguindo as recomendações de alguns órgãos, tais como *Internet Engineering Task Force* (IETF), um dos órgãos responsáveis por desenvolver e promover os protocolos do padrão Internet, e o *International Telecommunication Union* (ITU) que atua como um fórum e coordena assuntos técnicos e políticos relacionados às redes e serviços globais de telecomunicações, tem-se a referência para o nível aceitável de perda de pacotes, que é de 10% e o atraso médio tolerável, que segundo estes órgãos deve ficar inferior a 450 ms (IETF, 2012; UNION, 2013).

Para obter maior resultados consideráveis nas simulações foram empregados alguns métodos estatísticos, tais como:

- Média: É definida como o valor que mostra para onde se concentram os dados de uma distribuição como o ponto de equilíbrio das frequências em um histograma.
- Desvio padrão: O desvio padrão representa grau de variação de um conjunto de elementos.
- Coeficiente de determinação (R2): O coeficiente de determinação R2 é umas das forma de avaliar a qualidade do ajuste do modelo. Basicamente, este coeficiente indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados coletados.
- Probabilidade de significância (valor-p): Também conhecido como nível descritivo do teste, é a probabilidade de que a estatística do teste (como variável aleatória) tenha valor extremo em relação ao valor observado (estatística) quando a hipótese é verdadeira.

Esses métodos foram aplicados nas métricas de avaliação utilizadas nos ambientes de simulação.

3.5 SÍNTESE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS

Para avaliar as tecnologias propostas tiveram que ser levantados alguns parâmetros de módulos de transmissão. Esses parâmetros são essenciais para configurações dos arquivos de de simulação, tendo em vista que as simulações baseiam-se em características como:

- Frequência de funcionamento;
- Taxa de transmissão dos dados;
- Potência de transmissão; e,
- Sensibilidade.

3.5.1 Módulo NRF24L01

Para implementação do padrão IEEE 802.15.4 foi utilizado o módulo de transmissão NRF24L01. O módulo NRF24L01 é um componente eletrônico, desenvolvido para enviar e receber informações entre dispositivos, normalmente é utilizado em plataformas de desenvolvimento como, Arduino, Raspberry PI, ARM, AVR, PIC. O Módulo NRF24L01 também integra ao seu funcionamento amplificadores de PA e LNA, esses amplificadores são amplificadores de potência (PA) e amplificador de baixo ruído (LNA), basicamente esses amplificadores servem para amplificar sua potência para transmissão e recepção de sinais. A Tabela 1 apresenta em síntese as características do módulo utilizada para simulação e a figura 13 apresenta o Módulo NRF24L01.

Tabela 1 – Característica Módulo NRF24L01

Tensão de alimentação	1.9V - 3.6V
Alcance	até 1,5km
Taxa de dados	250kbps
Frequência de operação	2,4GHz 2,524GHz
Sensibilidade	-95dBm
Potência	110mW

Fonte: do autor.

Figura 13 – Módulo NRF24L01



Fonte: (SILVA, 2015)

3.5.2 Dragino LoRa Shield

O Dragino LoRa *Shield* é um dispositivo eletrônico para comunicação sem fio, ele pode ser utilizado como *Shield* para algumas plataformas como Arduino e Rapsberry Pi. O Dragino LoRa *Shield* é baseado nos chips Semtech SX1276 / SX1278, visa aplicativos de redes de sensores sem fio profissionais, como sistemas de irrigação, medição inteligente, cidades inteligentes, e assim por diante (DRAGINOTECHNOLOGY, 2017).

A Tabela 2 apresenta em síntese as características do Dragino LoRa Shield.

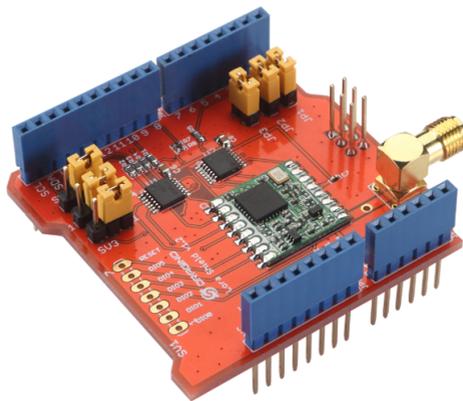
Tabela 2 – Dragino LoRa Shield

Tensão de alimentação	3.3v - 5v
Alcance	até 1,5km
Taxa de dados	300 kbps
Frequência de operação	915MHz
Sensibilidade	-148 dBm
Potência	110mW

Fonte: do autor.

A Figura 14 apresenta o Dragino LoRa Shield.

Figura 14 – Dragino LoRa Shield



Fonte: (DRAGINOTECHNOLOGY, 2017)

3.5.3 F-Integrated RF IEEE 802.11ah

Essa dispositivo para transmissão dados no IEEE 802.11ah foi proposto por (BA et al., 2017), neste trabalho foi desenvolvido um transceptor de RF compatível com IEEE 802.11ah com um receptor de conversão direta e totalmente digital.

A Tabela 3 apresenta em síntese as características do dispositivo proposto por (BA et al., 2017)

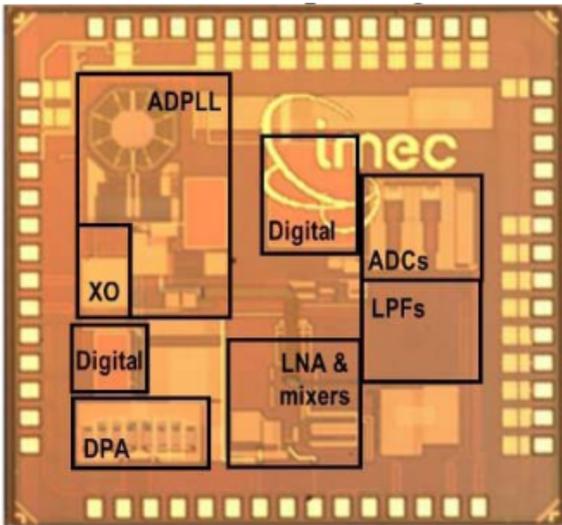
Tabela 3 – F-Integrated RF IEEE 802.11ah

Tensão de alimentação	3.3v - 5v
Alcance	até 1,5km
Taxa de dados	300 kbps
Frequência de operação	915MHz
Sensibilidade	até -104 dBm
Potência	200mW

Fonte: do autor.

A figura 15 apresenta F-Integrated RF IEEE 802.11ah

Figura 15 – F-Integrated RF IEEE 802.11ah



Fonte: (BA et al., 2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentadas as análises dos resultados referentes às simulações realizadas com os três padrões de transmissão, atuando em quatro cenários elaborados para a simulação das RSSF. Como apresentado anteriormente, as métricas utilizadas foram: eficiência da transmissão, taxa de perda de pacotes e a latência.

Com a finalidade de obter resultados mais precisos e condizentes, foram realizadas 600 simulações no total, chegou-se a esse valor de simulação utilizando os métodos estatísticos apresentados anteriormente para validação modelo. Para cada padrão foram realizadas 50 simulações em cada um dos cenários. Ao final dos testes os dados foram condensados em uma planilha onde foram calculadas as médias dos dados coletados.

Após os procedimentos feitos na área de desenvolvimento do software OMNet++, para que fosse possível a realização das simulações, o software fornece ao usuário uma área específica para executar a simulação desejada. Para obtenção dos dados de cada resultado dos testes, o software OMNet++ criou um arquivo chamado "nomedasi-mulação.sca", contendo dados relevantes ao experimento propriamente dito. Porém, esses dados precisaram ser tratados para extrair deles somente informações específicas que foram exportadas para uma planilha do Microsoft Excel.

Os resultados e discussões das simulações foram organizados do seguinte modo:

- Subcapítulo Análise Padrão 802.15.4: serão analisados e discutidos os resultados do Padrão 802.15.4.
- Subcapítulo Análise Padrão 802.11.ah: serão analisados e discutidos os resultados do Padrão 802.11.ah.
- Subcapítulo Análise Padrão Lora: serão analisados e discutidos os resultados do Padrão LoRa.
- Subcapítulo Análise Comparativa entre Padrões: serão analisados e discutidos os resultados comparando todos os padrões estudados neste trabalho.

4.1 ANÁLISE PADRÃO 802.15.4

Primeiramente, foram analisados os resultados obtidos através da simulação fazendo uso da tecnologia de transmissão Módulo NRF24L01. Como o objetivo era determinar quais das tecnologias apresentassem os melhores resultados para as métricas, efetuou-se 50 simulações para cada cenário e após isso, as informações foram tabuladas. Foram totalizadas cerca de 200 simulações para tecnologia de transmissão NRF24L01 e carga de 100 pacotes por simulação.

Os resultados obtidos por nodo na tecnologia 802.11.4 para os cenários simulados podem ser observados na Apêndice A. No cenário 1 com 15 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 11 pacotes, a eficiência da rede ficou em 88,50% e latência ficou em 28,97 ms. Para o cenário 2 com cerca de 66 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 8 pacotes, a eficiência da rede ficou em 91,78% e latência ficou em 10,04 ms. Já no cenário 3 com 121 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 8 pacotes, a eficiência da rede ficou em 92,10% e latência ficou em 10,04 ms. Por último, no cenário 4 com 231 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 7 pacotes, a eficiência da rede ficou em 92,89% e latência ficou em 10,04 ms.

Analisando os resultados obtidos para tecnologia que implementa o padrão 802.15.4, pode-se observar que para o cenário 1 se obteve os piores resultados em relação taxa de perda de pacotes, eficiência e latência. Esses valores piores se deram devido nós no cenário 1 estarem mais afastados e com uma densidade menor em relação aos outros cenários. Para os cenários 2, 3 e 4 os resultados já foram mais satisfatórios e melhores em relação ao cenário 1, nesses cenários os valores de taxa de perda de pacotes ficaram entre 8 e 7 pacotes, a eficiência ficou próximo a 92% e latência de 10,04 ms.

4.2 ANÁLISE PADRÃO 802.11.AH

Também efetuou-se 50 simulações para cada cenário e após isso, as informações foram tabuladas. Foram totalizadas cerca de 200 simulações para tecnologia de transmissão F-Integrated RF IEEE 802.11ah, com carga de 100 pacotes por simulação.

Os resultados obtidos por nodo na tecnologia 802.11ah para os cenários simulados podem ser observados na Apêndice B. No cenário 1 com 16 nós, valores das médias para taxa de perda de pacotes foram

de 13 pacotes, a eficiência da rede ficou em 86,97% e latência ficou em 7,15ms. Para o cenário 2 com cerca de 66 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 9 pacotes, a eficiência da rede ficou em 90,85% e latência ficou em 6,06 ms. Já no cenário 3 com 121 nós, valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 9 pacotes, a eficiência da rede ficou em 91,20% e latência ficou em 5,97 ms. Por último, no cenário 4 com 231 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 8 pacotes, a eficiência da rede ficou em 92,06% e latência ficou em 5,92 ms.

Analisando os resultados obtidos para tecnologia que implementa o padrão 802.11.ah, pode-se observar que para o cenário 1 também se obteve os piores resultados em relação taxa de perda de pacotes, eficiência e latência. Para os cenários 2, 3 e 4 os resultados já foram mais satisfatórios e melhores em relação ao cenário 1, nesses cenários os valores de taxa de perda de pacotes ficaram entre 8 e 9 pacotes, a eficiência ficou próximo a 92%. Já para a latência, houve uma leve baixa no cenários 2,3,4 simulados, os valores de latência ficaram entre 5,92 e 6,06 ms.

4.3 ANÁLISE LORA

Por último, foram analisados os resultados obtidos através da simulação fazendo uso da tecnologia de transmissão Dragino LoRa Shield. Foram totalizadas cerca de 200 simulações para tecnologia de transmissão Dragino LoRa Shield, com 50 simulações para cada cenário e com carga de 100 pacotes por simulação.

Os resultados obtidos por nodo na tecnologia Lora para os Cenários simulados podem ser observados na Apêndice C. No cenário 1 com 16 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 13 pacotes, a eficiência da rede ficou em 86,50% e latência ficou em 8,91 ms. Para o cenário 2 com cerca de 66 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 0 pacotes, a eficiência da rede ficou em 99,84% e latência ficou em 8,90 ms. Já no cenário 3 com 121 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 1 pacote, a eficiência da rede ficou em 99,48% e latência ficou em 8,93 ms. Por fim, no cenário 4 com 231 nós, os valores das médias para taxa de perda de pacotes foram de 2 pacote, a eficiência da rede ficou em 97,87% e latência ficou em 8,90 ms.

Analisando os resultados obtidos para tecnologia que implementa o padrão Lora, pode-se observar que para o cenário 1 se obteve os piores

resultados em relação taxa de perda de pacotes, eficiência. Para os cenários 2, 3 e 4 os resultados já foram mais satisfatórios e melhores em relação ao cenário 1, nesses cenários os valores de taxa de perda de pacotes ficaram entre 1 e 2 pacotes, a eficiência ficou próximo a 99%. Nesta tecnologia os valores de latência ficaram iguais em todos os cenários.

4.4 COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS

Para facilitar e melhorar a análise de quais tecnologias apresentaram melhores resultados, efetuou-se uma análise comparativa das tecnologias e suas médias em relação as distâncias. Em cada cenário é possível comparar as métricas em cada uma das tecnologias.

4.4.1 Cenário 1

Para o cenário 1, os nós foram separados em 3 categorias por distâncias. Na primeira categoria foram separados os nós que estão 0 até 500 metros do emissor, esta categoria contém 5 nós. A segunda categoria foram separados os nós que estão de 500 até 100 metros do emissor, esta categoria contém 6 nós. Já a terceira categoria foram separados os nós que estão acima de 1000 metros do emissor, esta categoria contém 5 nós.

Os resultados da tecnologia que implementa o padrão 802.15.4 no cenário 1 que são apresentados na Tabela 4. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 1, e assim com uma eficiência 98,60% e uma latência de 20,32ms. Para os valores que ficaram em uma distância intermediária, a taxa de perda pacotes teve um leve aumento, ficando em 11 pacotes. A eficiência desses nós na distância intermediária ficou em 89,05% com uma latência de 33,15 ms. Já para o grupo de nós que ficaram mais distante a taxa de perda de pacotes praticamente dobrou, ficando em 25 pacotes, com eficiência de 75% e latência de 33,54ms.

Já para a tecnologia que implementa o padrão 802.11.ah no cenário 1, os resultados são apresentados na Tabela 5. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 2, e assim com uma eficiência 98,40% e uma latência de 5,61 ms. Para os valores que ficaram em uma distância intermediária, a taxa de perda pacotes teve um aumento, fi-

Tabela 4 – Resultados 802.15.4 em relação a distância - Cenário 1

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 500 metros	5	1	98,60	20,32
de 500 até 1000 metros	6	11	89,05	33,15
acima de 1000 metros	5	25	75	33,54

Fonte: do autor.

cando em 12 pacotes. A eficiência desses nós na distância intermediária ficou em 87,52% com uma latência de 8,07 ms. Para o grupo de nodos que ficaram mais distante a taxa de perda de pacotes acima do dobrou, ficando em 28 pacotes, com eficiência de 71,65% e latência de 7,68ms.

Tabela 5 – Resultados 802.11ah em relação a distância - Cenário 1

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 500 metros	5	2	98,4	5,61
de 500 até 1000 metros	6	12	87,52	8,07
acima de 1000 metros	5	28	71,65	7,68

Fonte: do autor.

Por último no cenário 1, para a tecnologia que implementa o padrão Lora, os resultados são apresentados na Tabela 6. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 2, e assim com uma eficiência 98,02% e uma latência de 8,90 ms. Para os valores que ficaram em uma distância intermediária a taxa de perda pacotes teve um aumento, ficando em 7 pacotes. A eficiência desses nós na distância intermediária ficou em 93,40% com uma latência de 8,90 ms. Para o grupo de nós que ficaram mais distante a taxa de perda de pacotes se manteve próximo ao grupo anterior, ficando em 5 pacotes, com eficiência de 95,18% e latência de 8,90 ms.

Analisando os resultados obtidos no Cenário 1 de forma comparativa, pode-se observar na Figura 16 que para taxa de perda de pacotes os resultados para os nós que estavam em até 500 metros do emissor foram praticamente iguais nos 3 padrões. Já para os nós que estavam entre 500 até 1000 metros o melhor resultado foi com o padrão Lora, nele a taxa de perda de pacote foi de 7 pacotes, nos demais padrões foram de 11 pacotes para 802.15.4 e 12 pacotes para 802.11.ah. Para

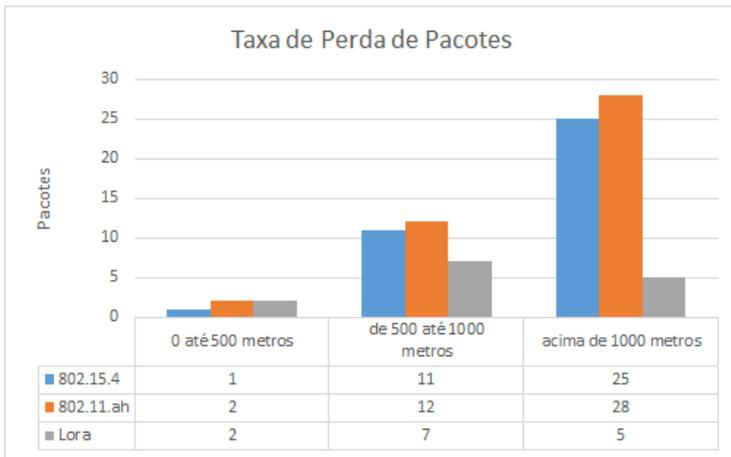
Tabela 6 – Resultados Lora em relação a distância - Cenário 1

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 500 metros	5	2	98,02	8,90
de 500 até 1000 metros	6	7	93,40	8,90
acima de 1000 metros	5	5	95,18	8,90

Fonte: do autor.

os nós que ficavam com distância acima 1000 metros, o melhor resultado novamente foi obtido pelo padrão Lora com 5 pacotes e os demais 802.15.4 com 25 pacotes e 802.11.ah com 28 pacotes.

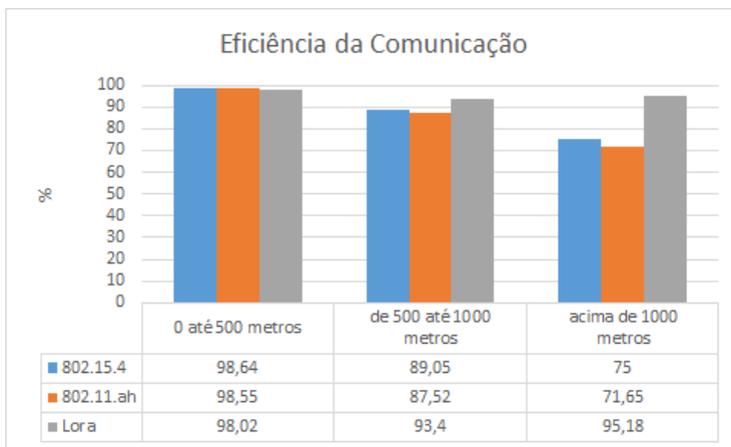
Figura 16 – Comparativo TPP - Cenário 1



Fonte: do autor.

Em relação a eficiência das redes, a Figura 17 apresenta os resultados de forma comparativa. Na primeira categoria de distância os valores de eficiência foram praticamente iguais nos 3 padrões. Nos nós que estavam entre 500 até 1000 metros o melhor resultado foi com o padrão Lora, nele a taxa de perda de pacote foi de 93,4%, nos demais padrões foram de 89,05% para 802.15.4 e 87,50% para 802.11.ah.

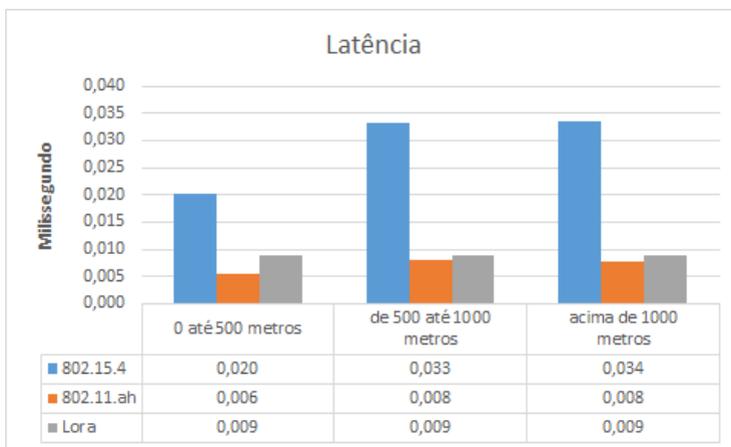
Figura 17 – Comparativo Eficiência - Cenário 1



Fonte: do autor.

Analisando a latência em cada um dos padrões, a Figura 18 apresenta os resultados de forma comparativa. Os valores de latência praticamente não alteram conforme em relação a distância. O padrão que obteve a menor latência foi o 802.11.ah, seguindo o padrão Lora também obteve uma latência baixa. Já o padrão 802.15.4 ficou com o pior valor de latência.

Figura 18 – Comparativo Latência - Cenário 1



Fonte: do autor.

4.4.2 Cenário 2

No Cenário 2, os nós foram separados em 4 categorias por distâncias. A primeira categoria foram separados os nós que estão de 0 até 400 metros do emissor, esta categoria contém 12 nós. Na segunda categoria foram separados os nós que estão de 400 até 500 metros do emissor, esta categoria contém 30 nós. Para terceira categoria foram separados os nós que estão de 800 até 1000 metros do emissor, esta categoria contém 12 nós. Por último, na quarta categoria foram separados os nós que estão de acima 1000 metros do emissor, esta categoria contém 12 nós.

Os resultados da tecnologia que implementa o padrão 802.15.4 no cenário 2 que são apresentados na Tabela 7. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 0, e assim uma eficiência 99,84% e latência de 10,04ms. Para os valores que ficaram em uma distância um pouco maior, a taxa de perda de pacotes ficou em 4 pacotes, com eficiência de 96,05 % e latência 10,04ms. Já para o terceiro grupo de nós, a taxa de perda de pacotes ficou com 13 pacotes, com eficiência de 86,73% e latência de 10,04ms. Por último, os nós mais distantes do emissor ficaram com uma taxa de perda de pacotes de 21 pacotes, eficiência de 78,04% e latência 10,04ms.

Tabela 7 – Resultados 802.15.4 em relação a distância - Cenário 2

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 400 metros	12	0	99,84	10,04
de 400 até 800 metros	30	4	96,05	10,04
de 800 até 1000 metros	12	13	86,73	10,04
acima de 1000 metros	12	21	78,04	10,04

Fonte: do autor.

Já para a tecnologia que implementa o padrão 802.11.ah no cenário 2, os resultados são apresentados na Tabela 8. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 0, e assim com uma eficiência 99,85% e uma latência de 0,95ms. Para os valores que ficaram em uma distância um pouco maior, a taxa de perda de pacotes ficou em 4 pacotes, com eficiência de 96,82% e latência 6,93ms. Já para o terceiro grupo de nós, a taxa de perda de pacotes ficou com 15 pacotes, eficiên-

cia de 85,10% e latência de 7,62ms. Por último, os nós mais distantes do emissor ficaram com uma taxa de perda de pacotes de 25 pacotes, e eficiência de 75,13% e latência 7,50ms.

Tabela 8 – Resultados 802.11ah em relação a distância - Cenário 2

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 400 metros	12	0	99,85	0,95
de 400 até 800 metros	30	4	95,82	6,93
de 800 até 1000 metros	12	15	85,10	7,62
acima de 1000 metros	12	25	75,13	7,50

Fonte: do autor.

Por último no cenário 2, para a tecnologia que implementa o padrão Lora, os resultados são apresentados na Tabela 9. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 0, e assim com eficiência 100% e latência de 8,89 ms. Para os valores que ficaram em uma distância um pouco maior, a taxa de perda de pacotes ficou também com 0 pacotes, com eficiência de 100 % e latência 8,89ms. Já para o terceiro grupo de nós, a taxa de perda de pacotes ficou novamente em 0 pacotes, com eficiência de 100% e latência de 8,89ms. Os nós mais distantes do emissor ficaram com uma taxa de perda de pacotes de 1 pacote, eficiência de 99% e latência 8,89ms.

Tabela 9 – Resultados Lora em relação a distância - Cenário 2

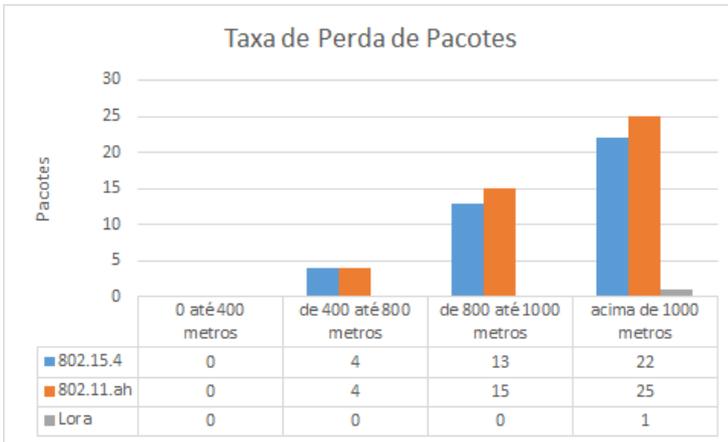
Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 400 metros	12	0	100	8,89
de 400 até 800 metros	30	0	100	8,89
de 800 até 1000 metros	12	0	100	8,89
acima de 1000 metros	12	1	99	8,89

Fonte: do autor.

Analisando os resultados obtidos no Cenário 2 de forma comparativa, pode-se observar na Figura 19 que para taxa de perda de pacotes os resultados para os nós que estavam em até 400 metros do emissor foram praticamente iguais nos 3 padrões. Já para os nós que estavam entre 400 até 800 metros o melhor resultado foi com o padrão Lora, nele a taxa de perda de pacote foi de 0 pacote, nos demais padrões foram de

7 pacotes para 802.15.4 e 802.11.ah. Para os nós que estavam entre 800 até 1000 metros, o melhor resultado novamente foi obtido pelo padrão Lora com 0 pacote e os demais 802.15.4 com 13 pacotes e 802.11.ah com 15 pacotes. Já os nós que ficavam com distância acima 1000 metros, o melhor resultado foi obtido pelo padrão Lora com 1 pacote e os demais 802.15.4 com 21 pacotes e 802.11.ah com 25 pacotes.

Figura 19 – Comparativo TPP - Cenário 2

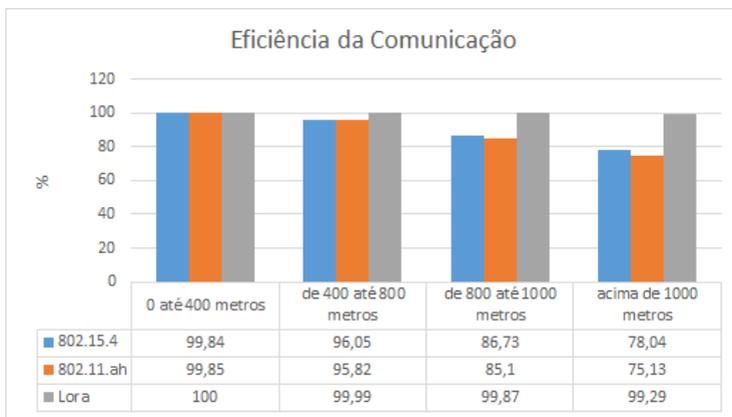


Fonte: do autor.

Observando a eficiência, conforme apresenta a Figura 20, resultados para os nós que estavam em até 400 metros do emissor foram praticamente iguais nos 3 padrões, eles ficaram com praticamente 100%. Já para os nós que estavam entre 400 até 800 metros o melhor resultado foi com o padrão Lora, nele a eficiência ainda permaneceu em 100%, nos demais padrões foram de 96,05% para 802.15.4 e 95,82% para 802.11.ah. Para os nós que estavam entre 800 até 1000 metros, o melhor resultado novamente foi obtido pelo padrão Lora com 100% de eficiência e os demais 802.15.4 com 86,73% e 802.11.ah com 85,10%. Já os nós que ficavam com distância acima 1000 metros, o melhor resultado foi obtido pelo padrão Lora com 99% e os demais 802.15.4 com 78,04% pacotes e 802.11.ah com 75,13%.

Já para a latência em cada um dos padrões, a Figura 21 apresenta os resultados de forma comparativa. Os valores de latência praticamente não alteram conforme em relação a distância. O padrão que

Figura 20 – Comparativo Eficiência - Cenário 2



Fonte: do autor.

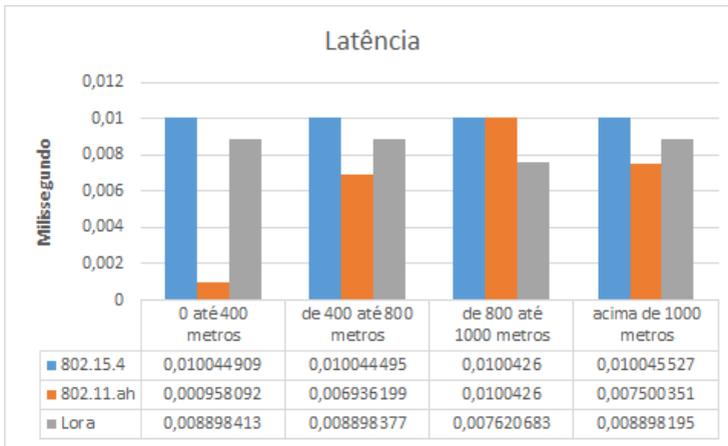
obteve a menor latência foi o 802.11.ah com valores 0,95ms, 6,93ms, 10,04ms e 7,50ms conforme aumentava distancia dos nós em relação ao emissor. O padrão Lora também obteve uma latência baixa, a latência se manteve 8,89ms, 8,89ms, 7,62ms e 8,89ms. O padrão 802.15.4 ficou com o pior valor de latência com 10,04ms em todas as distâncias.

4.4.3 Cenário 3

No Cenário 3, os nós foram separados em 4 categorias por distâncias. A primeira categoria foram separados os nós que estão de 0 até 300 metros do emissor, esta categoria contém 12 nós. Na segunda categoria foram separados os nós que estão de 300 até 600 metros do emissor, esta categoria contém 30 nós. Para terceira categoria foram separados os nós que estão de 600 até 900 metros do emissor, esta categoria contém 12 nós. Por último, na quarta categoria foram separados os nós que estão de acima 900 metros do emissor, esta categoria contém 12 nós.

Os resultados da tecnologia que implementa o padrão 802.15.4 no cenário 3 são apresentados na Tabela 10. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 0, e assim com uma eficiência 99,94% e uma latência de 10,04 ms. Para os valores que ficaram em uma distância

Figura 21 – Comparativo Latência - Cenário 2



Fonte: do autor.

um pouco maior, a taxa de perda de pacotes ficou em 1 pacote, com eficiência de 98,50% e latência 10,04 ms. Já para o terceiro grupo de nós, a taxa de perda de pacotes ficou com 9 pacotes, com eficiência de 91,39% e latência de 10,04 ms. Por último, os nós mais distantes do emissor ficaram com uma taxa de perda de pacotes de 21 pacotes, eficiência de 78,04% e latência 10,04ms.

Tabela 10 – Resultados 802.15.4 em relação a distância - Cenário 3

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 300 metros	12	0	99,94	10,04
de 300 até 600 metros	30	1	98,50	10,04
de 600 até 900 metros	12	9	91,39	10,04
acima de 900 metros	12	21	79,24	10,04

Fonte: do autor.

Já para a tecnologia que implementa o padrão 802.11.ah no cenário 3, os resultados são apresentados na Tabela 11. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 0, e assim com uma eficiência 99,95% e uma latência de 0,45ms. Para os valores que ficaram em uma

distância um pouco maior, a taxa de perda de pacotes ficou em 2 pacotes, com eficiência de 98,39% e latência 5,57ms. Já para o terceiro grupo de nós, a taxa de perda de pacotes ficou com 9 pacotes, com eficiência de 90,49% e latência de 7,80ms. Por último, os nós mais distantes do emissor ficaram com uma taxa de perda de pacotes de 23 pacotes, eficiência de 76,64% e latência 7,26ms.

Tabela 11 – Resultados 802.11ah em relação a distância - Cenário 3

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 300 metros	12	0	99,94	0,45
de 300 até 600 metros	30	2	98,39	5,57
de 600 até 900 metros	12	9	90,49	7,80
acima de 900 metros	12	23	76,64	7,26

Fonte: do autor.

Por último no cenário 3, para a tecnologia que implementa o padrão Lora, os resultados são apresentados na Tabela 12. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 0, e assim com eficiência 100% e latência de 8,91 ms. Para os valores que ficaram em uma distância um pouco maior, a taxa de perda de pacotes ficou também com 1 pacotes, com eficiência de 99% e latência 8,90ms. Já para o terceiro e quarto grupo de nós, a taxa de perda de pacotes ficou novamente com 1 pacote, com eficiência de 99% e latência de 8,91 e 8,97ms.

Tabela 12 – Resultados Lora em relação a distância - Cenário 3

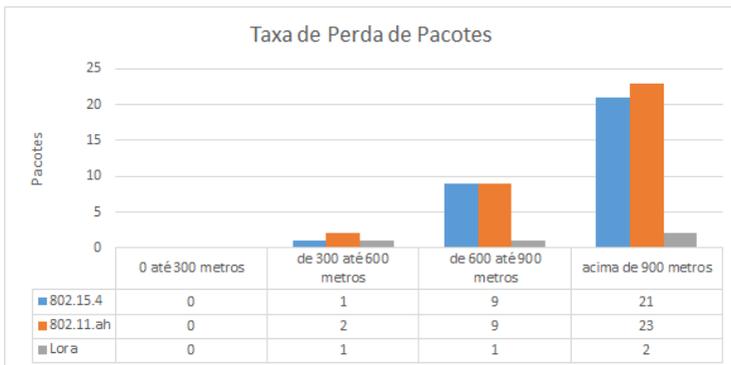
Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 300 metros	12	0	100	8,91
de 300 até 600 metros	30	1	99	8,90
de 600 até 900 metros	12	1	99	8,91
acima de 900 metros	12	1	99	8,97

Fonte: do autor.

Analisando os resultados obtidos no Cenário 3 de forma comparativa, pode-se observar na Figura 22 que para taxa de perda de pacotes para os nós que estavam em até 300 metros do emissor foram praticamente iguais nos 3 padrões, todos os padrões tiveram 0 pacotes de perda. Já para os nós que estavam entre 300 até 600 metros os me-

lhores resultados foram com os padrões Lora e 802.15.4, neles a taxa de perda de pacote foi de 1 pacote, para o padrão 802.11.ah a taxa ficou de 2 pacotes. Nos nós que estavam de 600 até 900 metros, foi obtido pelo padrão Lora novamente 1 pacote e os demais 802.15.4 e 802.11.ah com 9 pacotes. Para os nós que ficavam com distância acima 900 metros, o melhor resultado foi obtido pelo padrão Lora com 1 pacote e os demais 802.15.4 com 21 pacotes e 802.11.ah com 23 pacotes.

Figura 22 – Comparativo TPP - Cenário 3

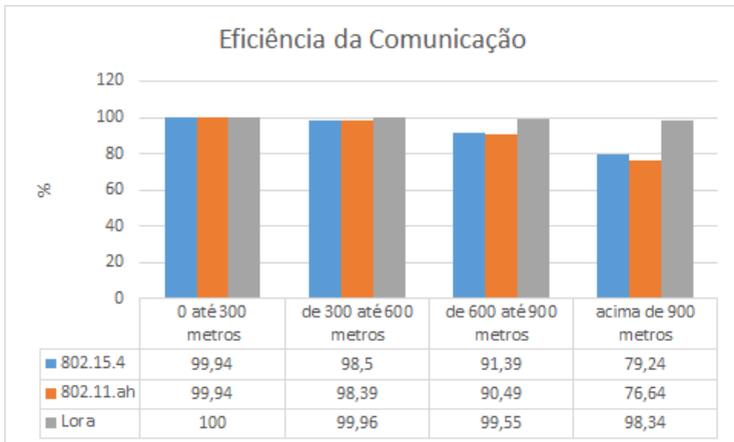


Fonte: do autor.

Observando a eficiência, conforme a Figura 23, resultados para os nós que estavam em até 300 metros do emissor foram praticamente iguais nos 3 padrões, eles ficaram com praticamente 100%. Já para os nós que estavam entre 300 até 600 metros os melhores resultados foram com os padrões Lora e 802.15.4, neles a eficiência foi de aproximadamente 99%. Para os nós que estavam entre 600 até 900 metros, o melhor resultado foi obtido pelo padrão Lora com 99% de eficiência e os demais 802.15.4 com 91,39% e 802.11.ah com 90,49%. Já os nós que ficaram com distância acima 900 metros, o melhor resultado foi obtido pelo padrão Lora com 99% e os demais 802.15.4 com 79,24% pacotes e 802.11.ah com 76,64%.

Já para a latência em cada um dos padrões, a Figura 24 apresenta os resultados de forma comparativa. Os valores de latência praticamente não alteram conforme em relação a distância. O padrão que obteve a menor latência foi o 802.11.ah com valores 0,45ms, 5,57ms, 7,80ms e 7,26ms conforme aumentava distancia dos nós em relação ao emissor. O padrão Lora também obteve uma latência baixa, a latência

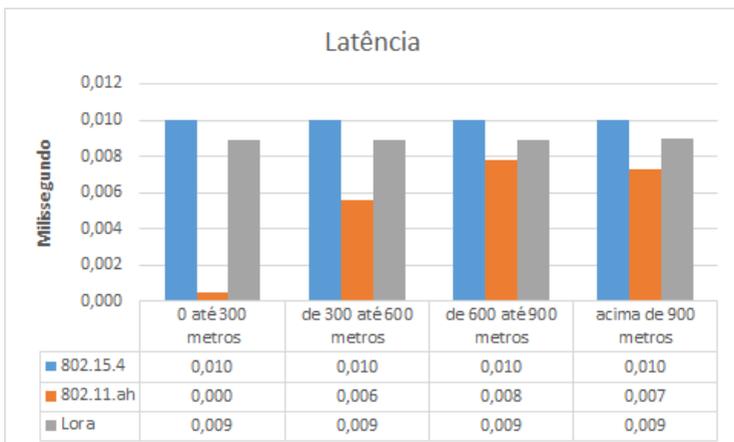
Figura 23 – Comparativo Eficiência - Cenário 3



Fonte: do autor.

se manteve 8,91ms, 8,90ms, 8,91ms e 8,97ms. O padrão 802.15.4 ficou com o pior valor de latência com 10,04ms em todas as distâncias.

Figura 24 – Comparativo Latência - Cenário 3



Fonte: do autor.

4.4.4 Cenário 4

No Cenário 4, os nós foram separados em 6 categorias por distâncias. A primeira categoria foram separados os nós que estão de 0 até 200 metros do emissor, esta categoria contém 13 nós. Na segunda categoria foram separados os nós que estão de 200 até 400 metros do emissor, contendo 36 nós. Para terceira categoria foram separados os nós que estão de 400 até 600 metros do emissor, contendo cerca de 62 nós.

Na quarta categoria foram separados os nós que estão de 600 até 800 metros do emissor, esta categoria contém 48 nós. Já na quinta categoria, foram separados os nós que estão de 800 até 1000 metros do emissor, esta categoria contém 48 nós. Por último, na sexta categoria foram separados os nós que estão de acima 1000 metros do emissor, contendo cerca de 24 nós.

Os resultados da tecnologia que implementa o padrão 802.15.4 no cenário 3 que são apresentados na Tabela 13. Analisando os resultados, temos que para os nós mais próximos ao emissor tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 0, com eficiência 99,99% e latência de 10,04ms. Para os valores que ficaram em uma distância um pouco maior, a taxa de perda de pacotes ficou em 1 pacote, com eficiência de 99,75 % e latência 10,04ms.

Já para o terceiro grupo de nós, a taxa de perda de pacotes ficou com 2 pacotes com eficiência de 98,08% e latência de 10,04 ms. Na quarta categoria, a taxa de perda de pacotes ficou com 7 pacotes com eficiência de 93,32% e latência de 10,04 ms. E na quinta categoria, a taxa de perda de pacotes ficou com 14 pacotes com eficiência de 85,85% e latência de 10,04ms. Por último, os nós mais distantes do emissor ficaram com uma taxa de perda de pacotes de 21 pacotes, eficiência de 78,62% e latência 10,04ms.

Já para a tecnologia que implementa o padrão 802.11.ah no cenário 4, os resultados são apresentados na Tabela 14. Analisando os resultados, temos que para os nós mais próximos ao emissor, no primeiro e segundo grupo tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 0, e assim com uma eficiência 100% e latência de 0,43 e 14,49 ms. Para os valores que ficaram em uma distância um pouco maior, a taxa de perda de pacotes ficou em 2 pacotes, com eficiência de 98% e latência 62,92ms.

Já para o quarto grupo de nós, a taxa de perda de pacotes ficou com 7 pacotes com eficiência de 92,66 % e latência de 7,87 ms. E na quinta categoria, a taxa de perda de pacotes ficou com 16 pacotes, com

Tabela 13 – Resultados 802.15.4 em relação a distância - Cenário 4

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 200	13	0	99,99	10,04
de 200 até 400	36	1	99,07	10,04
de 400 até 600	62	2	98,08	10,04
de 600 até 800	48	7	92,32	10,04
de 800 até 1000	48	14	85,85	10,04
acima de 1000	24	21	78,62	10,04

Fonte: do autor.

eficiência de 84,07% e latência de 7,61 ms. Por último, os nós mais distantes do emissor ficaram com uma taxa de perda de pacotes de 24 pacotes, eficiência de 75,79% e latência 7,60ms.

Tabela 14 – Resultados 802.11ah em relação a distância - Cenário 4

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 200	13	0	100	0,43
de 200 até 400	36	0	100	1,44
de 400 até 600	62	2	98	6,29
de 600 até 800	48	7	92,66	7,87
de 800 até 1000	48	16	84,07	7,61
acima de 1000	24	24	75,79	7,605

Fonte: do autor.

Por último no cenário 4, para a tecnologia que implementa o padrão Lora, os resultados são apresentados na Tabela 12. Analisando os resultados temos que para os nós mais próximos ao emissor, no primeiro, segundo e terceiro grupo tiveram uma taxa de perda de pacotes igual a 0, e assim a eficiência fica em 100% e a latências com 8,89 ms. Já para o quarto grupo de nós, a taxa de perda de pacotes ficou com 1 pacote, com eficiência de 99% e latência de 8,89ms. E na quinta categoria, a taxa de perda de pacotes ficou com 4 pacotes com eficiência de 95,69% e latência de 8,89 ms. Por último, os nós mais distantes do emissor ficaram com uma taxa de perda de pacotes de 10 pacotes, eficiência de 90,15% e latência 8,89ms.

Analisando os resultados obtidos no Cenário 4 de forma comparativa, pode-se observar na Figura 25 que para taxa de perda de

Tabela 15 – Resultados Lora em relação a distância - Cenário 4

Distância (Metros)	nós	TPP	Ef (%)	Lat (ms)
0 até 200	13	0	100	8,89
de 200 até 400	36	0	100	8,89
de 400 até 600	62	0	100	8,89
de 600 até 800	48	1	99	8,89
de 800 até 1000	48	4	95,69	8,89
acima de 1000	24	10	90,15	8,89

Fonte: do autor.

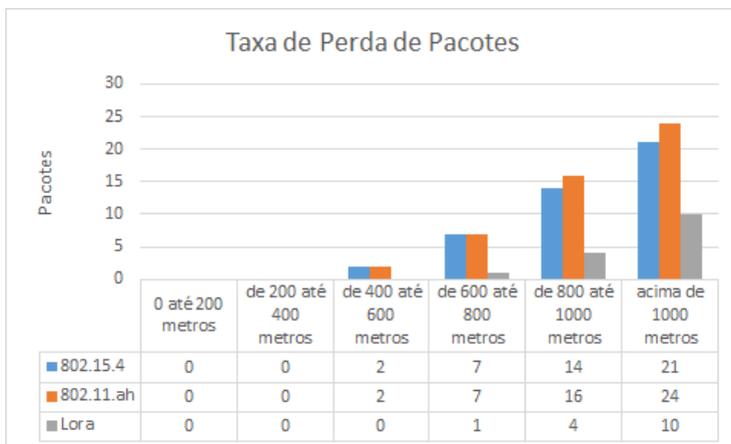
pacotes os resultados para os nós que estavam em até 200 metros do emissor foram iguais nos 3 padrões, a taxa de perda de pacotes foi de 0 pacotes. Já para os nós que estavam entre 200 até 400 metros os melhores resultados foram com o padrão 802.11ah e Lora, neles a taxa de perda de pacote foram de 0 pacote, no padrão 802.15.4 a taxa foi de 1 pacote. Para os nós que estavam entre 400 até 600 metros, o melhor resultado foi obtido pelo padrão Lora com 0 pacote e os demais ficaram com 98% de eficiência.

Os nós que estavam de 600 até 800 metros, a taxa de perda de pacotes melhor foi obtido pelo padrão Lora com 1 pacote e os demais ficaram com 7 pacotes em ambos. Já para os nós que estavam entre 800 até 1000 metros o melhor resultado foi novamente com o padrão Lora, nele a taxa de perda de pacotes foi 4 pacotes e nos demais padrões foram de 14 pacotes para 802.15.4 e 16 pacotes para 802.11ah. Por último, o nós que ficavam com distância acima 1000 metros, o melhor resultado foi obtido pelo padrão Lora com 10 pacotes e os demais 802.15.4 com 21 pacotes e 802.11.ah com 24 pacotes.

Observando a eficiência em cada uma das tecnologias, conforme a Figura 26, os resultados para os nós que estavam em até 200 metros do emissor foram iguais nos 3 padrões, ficaram em aproximadamente 100%. Já para os nós que estavam entre 200 até 400 metros os melhores resultados foram com o padrão 802.11ah e Lora, neles a eficiência foram de 100%, no padrão 802.15.4 a eficiência foi de 99%. Para os nós que estavam entre 400 até 600 metros, o melhor resultado foi obtido pelo padrão Lora com 100% e os demais ficaram com 2 pacotes em ambos.

Os nós que estavam de 600 até 800 metros, a melhor eficiência foi obtida pelo padrão Lora com 99% e os demais ficaram com 92%. Já para os nós que estavam entre 800 até 1000 metros o melhor resultado foi

Figura 25 – Comparativo TPP - Cenário 4

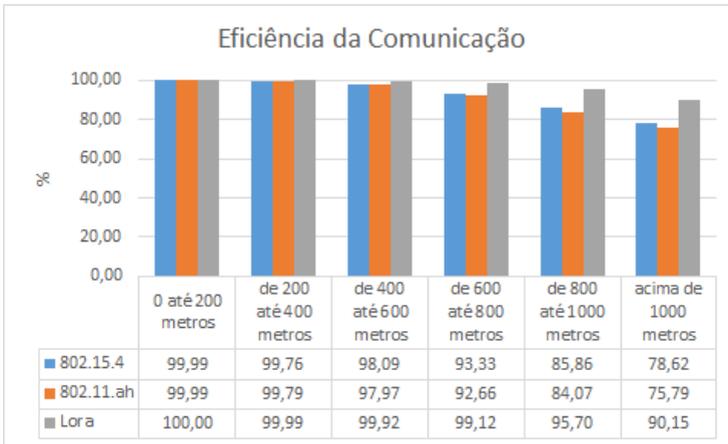


Fonte: do autor.

novamente com o padrão Lora, nele a eficiência foi 95,69 % e nos demais padrões foram de 85,85% para 802.15.4 e 84,07% para 802.11ah. Por último, o nós que ficavam com distância acima 1000 metros, o melhor resultado foi obtido pelo padrão Lora com 90,15% e os demais 802.15.4 com 78,52% e 802.11.ah com 75,79% .

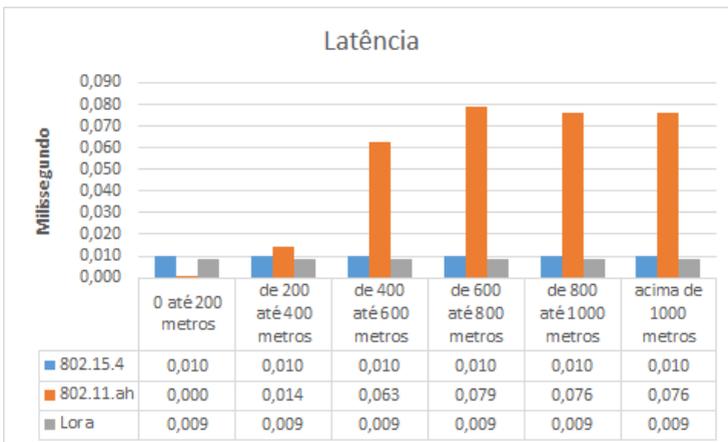
Já para a latência em cada um dos padrões, a Figura 27 apresenta os resultados de forma comparativa. Os valores de latência praticamente não alteram conforme em relação a distância. O padrão que obteve a menor latência foi o 802.11.ah com valores 0,43ms, 1,44ms, 6,29ms, 7,87ms e 7,61ms e 7,60 conforme aumentava distancia dos nós em relação ao emissor. O padrão Lora também obteve uma latência baixa, a latência se manteve 8,89ms. O padrão 802.15.4 ficou com o pior valor de latência com 10,04ms em todas as distâncias.

Figura 26 – Comparativo Eficiência - Cenário 4



Fonte: do autor.

Figura 27 – Comparativo Latência - Cenário 4



Fonte: do autor.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os estudos teóricos e práticos realizados pelo Trabalho de Conclusão de Curso, acredita-se que o uso de tecnologias de comunicação sem fio são plenamente viáveis para a melhoria de produção agrícola. Especificamente, de acordo com os resultados obtidos por meio das simulações realizadas utilizando o software OMNet++ conclui-se que os objetivos propostos foram atingidos.

Após as análises dos resultados obtidos, conclui-se que todas as tecnologias tem a capacidade de implementação em uma RSSF, pode-se afirmar que se o proprietário rural necessitar de uma tecnologia capaz de monitorar em tempo real sua lavoura, este tem à sua disposição as RSSF que são capazes de cobrirem áreas externas com área total de 200 hectares.

Através da investigação e dos testes realizados com os padrões de comunicação de ampla cobertura para redes de nós sem fio, conclui-se que as simulações executadas através do software OMNet++ demonstraram a eficácia dessa ferramenta para esse fim. As métricas como, eficiência, taxa de perda de pacotes e latência foram suficientes para estabelecer quais das tecnologias investigadas ofereceu melhor desempenho.

Com base nas simulações realizadas, verificou-se que a tecnologia LoRa mostrou-se mais eficaz e estável nas métricas de taxa de perda de pacotes e eficiência do que as tecnologias 802.11ah e 802.15.4, em grande parte dos cenários pode-se notar essa diferença entre as tecnologias. Em relação a latência, verificou-se que a tecnologia 802.11ah mostrou-se mais eficaz do que as tecnologias LoRa e 802.15.4.

Ainda fazendo uma análise do contexto pesquisado destaca-se que esta área de estudos é promissora e que há muito o que ser desenvolvido.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros, a realização de novas simulações computacionais aplicando aos cenários elementos climatológicos e geográficos com a finalidade de demonstrar o comportamento das tecnologias 802.15.4, 802.11ah e LoRa, em uma RSSF diante de um

ambiente mais próximo da realidade em campo.

E também sugere-se, a criação de ambientes de testes experimentais com as tecnologias 802.15.4, 802.11ah e LoRa, de forma a comparar e validar os resultados simulados no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

ABINC. *RELATÓRIO DO GRUPO DE TRABALHO ABINC DE TECNOLOGIAS LPWAN*. [S.l.], 2016.

AHONEN, T.; VIRRANKOSKI, R.; ELMUSRATI, M. Greenhouse monitoring with wireless sensor network. In: *2008 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 403–408.

AUST, S.; PRASAD, R. V.; NIEMEGERERS, I. G. M. M. IEEE 802.11ah: Advantages in standards and further challenges for sub 1 GHz wi-fi. In: *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2012. <<https://doi.org/10.1109/icc.2012.6364903>>.

BA, A. et al. A 4mw-rx 7mw-tx ieee 802.11ah fully-integrated rf transceiver. In: *2017 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 232–235.

BEDNARCZYK, W. et al. Cooja testbed for assessment of broadcast mechanism efficiency in clustered wireless sensor networks. In: *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1065–1069.

BHUSE, V.; GUPTA, A. K. Dpdsn: Detection of packet-dropping attacks for wireless sensor networks. In: . [S.l.: s.n.], 2005.

BOR, M. C. et al. Do LoRa low-power wide-area networks scale? In: *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems - MSWiM*. ACM Press, 2016. <<https://doi.org/10.1145/2988287.2989163>>.

BRAHMA, D. *Design and Simulation of Wireless Sensor Network scenario for underground coal mines*. Dissertação (Mestrado) — National Institute of Technology Rourkela, 2011.

BRAMLEY, R.; TRENGOVE, S. Lessons from nearly 20 years of precision agriculture research, development and adoption as a guide to its appropriate application. *Engenharia Agrícola, Crop and Pasture Science*, v. 60, n. 3, p. 197–207, jun 2009.

CHEN, Z. et al. A clustering protocol for wireless sensor networks based on energy potential field. *The Scientific World Journal*, Hindawi Limited, v. 2013, p. 1–7, 2013. <<https://doi.org/10.1155/2013/829861>>.

DERHAB, A.; OUNINI, F.; REMLI, B. Mob-tossim: An extension framework for tossim simulator to support mobility in wireless sensor and actuator networks. In: *2012 IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 300–305. ISSN 2325-2936.

DÍAZ, Á.; GONZÁLEZ-BAYON, J.; SÁNCHEZ, P. Security estimation in wireless sensor network simulator. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, World Scientific Pub Co Pte Lt, v. 25, n. 07, p. 1650067, jul 2016.

DÍAZ, S. E. et al. A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier BV, v. 76, n. 2, p. 252–265, may 2011. <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.004>>.

DRAGINOTECHNOLOGY. *Lora Shield*. may 2017. <<http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lorashieldy>>.

FAZZANARO, P. L. *Avaliação dos Protocolos Zigbee e IEEE 802.11ah através de simulação computacional para aplicações no agronegócio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, 2016.

FLORES, K. O. et al. Precision agriculture monitoring system using wireless sensor network and raspberry pi local server. In: *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. [S.l.]: IEEE, 2016.

GONÇALVES, L. B. L. et al. Influence of mobility models in precision spray aided by wireless sensor networks. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 574, n. 1, p. 012153, 2015.

GUTIÉRREZ, J. et al. Automated irrigation system using a wireless sensor network and gprs module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 63, n. 1, p. 166–176, Jan 2014. ISSN 0018-9456.

HUIRCÁN, J. I. et al. Zigbee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields. *Computers and Electronics in*

Agriculture, v. 74, n. 2, p. 258 – 264, 2010. ISSN 0168-1699. <[http : //www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169910001584](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169910001584)>.

HWANG, J.; YOE, H. Study on the context-aware middleware for ubiquitous greenhouses using wireless sensor networks. *Sensors*, MDPI AG, v. 11, n. 12, p. 4539–4561, apr 2011.

IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola. Informações mensais sobre previsão e acompanhamento de safras agrícolas, com estimativas de produção, rendimento médio e áreas plantadas e colhidas, tendo como unidade de coleta os municípios. 2017.

IETF. *Applicability Statement for RFC 2544: Use on Production Networks Considered Harmful*. [S.l.], nov 2012.

INGENU. *What is RPMA*. may 2017. <[https : //www.ingenu.com/technology/](https://www.ingenu.com/technology/)>.

JABEEN, F.; NAWAZ, S. In-network wireless sensor network query processors: State of the art, challenges and future directions. *Information Fusion*, Elsevier BV, v. 25, p. 1–15, sep 2015.

KHATTAB, A.; ABDELGAWAD, A.; YELMARTHI, K. Design and implementation of a cloud-based IoT scheme for precision agriculture. In: *2016 28th International Conference on Microelectronics (ICM)*. [S.l.]: IEEE, 2016.

KÖPKE, A. et al. Simulating wireless and mobile networks in omnet++ the mixim vision. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008. (Simutools '08), p. 71:1–71:8. ISBN 978-963-9799-20-2.

KWONG, K. H. et al. Implementation of herd management systems with wireless sensor networks. *IET Wireless Sensor Systems*, v. 1, n. 2, p. 55–65, June 2011. ISSN 2043-6386.

LAMPARELLI, R. A. C. *Agricultura de precisão*. may 2017. <[http : //www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana - de - acucar/arvore/CONTAG0172711200516719.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG0172711200516719.html)>.

LLORET, J. et al. A wireless sensor network for vineyard monitoring that uses image processing. *Sensors*, MDPI AG, v. 11, n. 12, p. 6165–6196, jun 2011.

- LORAALLIANCE. *LoRa Alliance Technology*. may 2017. <[http : //www.lora – alliance.org/What – Is – LoRa/Technology](http://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology)>.
- LOUREIRO, A. A. et al. Redes de sensores sem fio. In: SN. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*. [S.l.], 2003. p. 179–226.
- MALIK, H.; SZWILSKI, A. Towards monitoring the water quality using hierarchal routing protocol for wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*, Elsevier BV, v. 98, p. 140–147, 2016. <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.022>>.
- MAPA. Portaria n 852 - art. 1 criar a comissão brasileira de agricultura de precisão – cbap. set. 2012.
- MELO, P. *Padrão IEEE 802.15.4 - A base para as especificações Zigbee, WirelessHart e MiWi*. aug 2017. <[https : //www.embarcados.com.br/padrao – ieee – 802 – 15 – 4/](https://www.embarcados.com.br/padrao-ieee-802-15-4/)>.
- MOREIRA, M. A. *Rede de sensores para aplicação em agricultura : Um estudo de Caso*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- MÜLLER, G.; RITTENSCHOBBER, T.; SPRINGER, A. A wireless sensor network using energy harvesting for agricultural machinery. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, v. 127, n. 3, p. 39–46, Mar 2010.
- NAKUTIS, . . et al. Remote agriculture automation using wireless link and iot gateway infrastructure. In: *2015 26th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 99–103. ISSN 1529-4188.
- NAVARRO, Z. *Avanço da tecnologia explica sucesso da produção agropecuária brasileira*. mar 2017. <[http : //www.gazetadopovo.com.br/agronegocio/agricultura/avanco – da – tecnologia – explica – sucesso – da – producao – agropecuaria – brasileira – e7o9gqm527jdu9vpwsb9ze4ot](http://www.gazetadopovo.com.br/agronegocio/agricultura/avanco-da-tecnologia-explica-sucesso-da-producao-agropecuaria-brasileira-e7o9gqm527jdu9vpwsb9ze4ot)>.
- NETO, J. M. R. de S. et al. Propagation measurements and modeling for monitoring and tracking in animal husbandry applications. In: *2010 IEEE Instrumentation Measurement Technology Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1181–1185. ISSN 1091-5281.
- OJHA, T.; MISRA, S.; RAGHUWANSHI, N. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. v. 118, 10 2015.

PEREIRA, P. et al. Agricultura de precisão com rede de sensores sem fio. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação, v. 4, n. 2, p. 19–27, oct 2014.

POOLE, I. *LoRa Physical Layer RF Interface*. aug 2017. <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/lora/rf-interface-physical-layer.php>>.

RABER, A. et al. Aplicação de redes de sensores sem fio (rssf) na agricultura. *EATI - Encontro Anual de Tecnologia da Informação*, 2013.

RACKLEY, S. Chapter 1 - introducing wireless networking. In: RACKLEY, S. (Ed.). *Wireless Networking Technology*. Oxford: Newnes, 2007. p. 1 – 5.

RAY, P. A survey on internet of things architectures. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Elsevier BV, oct 2016. <<https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2016.10.003>>.

REINA, D. G. et al. The role of ad hoc networks in the internet of things: A case scenario for smart environments. In: *Internet of Things and Inter-cooperative Computational Technologies for Collective Intelligence*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 89–113.

RUIZ, L. B. *MANNA: A Management Architecture for Wireless Sensor Networks*. Tese (Doutorado) — Computer Science Department of the Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil, December 2003.

SANTOS, B. et al. *Internet das Coisas: da Teoria à Prática*. [S.l.].

SANTOS, S. T. dos. *Redes de sensores sem fio em monitoramento e controle*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2007.

SEOK, Y. *IEEE 802.11AH (WI-FI IN 900 MHZ LICENSE-EXEMPT BAND) FOR IOT APPLICATION*. aug 2016. <<https://www.standardsuniversity.org/e-magazine/august-2016-volume-6/ieee-802-11ah-wi-fi-900-mhz-license-exempt-band-iot-application/>>.

SIGFOX. *Sig Fox Technology*. may 2017. <<http://www.sigfox.com>>.

SILVA, A. *Comunicação wireless com o módulo NRF24L01*. jan 2015. <<http://buildbot.com.br/blog/comunicacao-wireless-com-o-modulo-nrf24l01/>>.

SILVA, M. da. *Rede de sensores para aplicação em agricultura: Um estudo de caso*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

SRBINOVSKA, M. et al. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier BV, v. 88, p. 297–307, feb 2015.

TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N. B.; HEINZELMAN, W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, ACM, New York, NY, USA, v. 6, n. 2, p. 28–36, abr. 2002. ISSN 1559-1662. <<http://doi.acm.org/10.1145/565702.565708>>.

UNION, I. S. *Recommendation G. 114 - One Way Transmission Time*. may 2013. <<http://www.itu.int/rec/T-RECG.114-200305-I/en>>.

VERMA, S.; CHUG, N.; GADRE, D. V. Wireless sensor network for crop field monitoring. In: *2010 International Conference on Recent Trends in Information, Telecommunication and Computing*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 207–211.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, Elsevier BV, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, aug 2008. <<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>>.

APÊNDICE A - Resultados por nós Padrão 802.15.4

A.1 802.15.4 CENÁRIO 1

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	25	74,94	33,98
2	7	93,22	38,57
3	2	98,20	24,42
4	7	93,28	34,37
5	25	74,94	37,29
6	20	80,42	29,08
7	2	98,12	29,03
8	0	99,98	0,20
9	1	98,68	19,39
10	19	81,48	34,95
11	25	75,00	29,96
12	7	92,84	36,55
13	2	98,26	28,55
14	7	93,08	25,41
15	25	75,12	32,94
Média Total	11	88,50	28,98

Tabela 16 – Resultados 802.15.4 por Nodo - Cenário 1

A.2 802.15.4 CENÁRIO 2

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	25	74,68	10,04
2	18	82,46	10,05
3	10	90,22	10,05
4	4	95,50	10,04
5	2	97,62	10,05
6	2	98,06	10,04
7	2	97,78	10,04
8	5	95,12	10,04
9	10	90,14	10,04
10	17	83,10	10,04
11	26	73,82	10,07
12	21	78,54	10,04
13	12	87,80	10,04

14	5	94,72	10,04
15	2	97,66	10,04
16	0	99,62	10,05
17	0	99,90	10,04
18	0	99,70	10,04
19	2	98,34	10,05
20	6	94,38	10,04
21	13	87,22	10,04
22	21	78,54	10,04
23	20	80,46	10,06
24	11	88,82	10,05
25	4	95,58	10,04
26	1	99,44	10,04
27	0	100,00	10,04
28	0	100,00	10,04
29	0	100,00	10,04
30	1	99,12	10,05
31	4	96,46	10,05
32	11	89,04	10,04
33	19	80,50	10,05
34	19	80,58	10,05
35	11	89,42	10,04
36	4	96,00	10,04
37	1	99,16	10,05
38	0	99,98	10,04
39	0	100,00	10,04
40	0	99,96	10,04
41	1	99,34	10,04
42	4	95,98	10,05
43	10	89,58	10,04
44	19	80,96	10,04
45	21	79,28	10,04
46	13	87,44	10,05
47	6	94,42	10,04
48	2	98,20	10,04
49	0	99,60	10,05
50	0	99,84	10,05
51	0	99,70	10,04
52	2	98,24	10,05

53	6	94,00	10,04
54	13	87,22	10,03
55	21	79,04	10,04
56	25	74,98	10,04
57	16	84,28	10,04
58	9	90,62	10,04
59	4	95,70	10,05
60	2	97,56	10,05
61	2	98,18	10,04
62	2	97,56	10,05
63	5	95,04	10,04
64	8	91,50	10,05
65	16	84,44	10,04
66	25	75,18	10,04
Média Total	8	91,78	10,04

Tabela 17 – Resultados 802.15.4 por Nodo - Cenário 2

A.3 802.15.4 CENÁRIO 3

Nodo	TTP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	26,00	74,48	10,04
2	16,00	83,80	10,04
3	10,00	90,42	10,04
4	5,00	95,34	10,05
5	3,00	97,42	10,04
6	1,00	98,52	10,04
7	2,00	97,74	10,04
8	5,00	95,38	10,04
9	10,00	90,16	10,04
10	17,00	82,96	10,05
11	24,00	76,26	10,04
12	23,00	77,30	10,05
13	15,00	85,42	10,05
14	7,00	92,70	10,05
15	3,00	97,12	10,04
16	1,00	98,84	10,04
17	1,00	99,22	10,04

18	1,00	99,06	10,04
19	3,00	97,14	10,04
20	8,00	92,28	10,04
21	14,00	86,40	10,04
22	23,00	77,26	10,05
23	22,00	78,44	10,04
24	12,00	87,94	10,04
25	6,00	94,10	10,04
26	2,00	97,92	10,04
27	0,00	99,64	10,04
28	0,00	99,96	10,04
29	0,00	99,68	10,04
30	2,00	98,26	10,04
31	5,00	94,58	10,04
32	13,00	86,88	10,05
33	21,00	78,94	10,04
34	20,00	79,52	10,05
35	11,00	89,20	10,04
36	5,00	95,18	10,04
37	1,00	99,18	10,04
38	0,00	99,94	10,04
39	0,00	100,00	10,04
40	0,00	99,90	10,04
41	1,00	99,06	10,04
42	5,00	95,06	10,04
43	11,00	88,82	10,05
44	21,00	79,28	10,04
45	19,00	80,56	10,05
46	11,00	89,30	10,04
47	4,00	95,82	10,04
48	1,00	99,38	10,04
49	0,00	100,00	10,04
50	0,00	100,00	10,04
51	0,00	100,00	10,04
52	0,00	99,50	10,04
53	5,00	95,48	10,04
54	10,00	89,88	10,04
55	19,00	81,22	10,04
56	19,00	80,54	10,04

57	10,00	90,06	10,04
58	4,00	96,12	10,05
59	1,00	99,36	10,04
60	0,00	100,00	10,04
61	0,00	100,00	10,04
62	0,00	99,98	10,04
63	1,00	99,30	10,04
64	4,00	96,44	10,04
65	10,00	90,24	10,04
66	19,00	81,36	10,05
67	20,00	80,46	10,04
68	11,00	88,98	10,04
69	4,00	96,48	10,04
70	1,00	99,18	10,04
71	0,00	99,94	10,04
72	0,00	100,00	10,04
73	0,00	99,98	10,04
74	1,00	99,28	10,04
75	4,00	96,00	10,04
76	11,00	89,44	10,04
77	20,00	80,34	10,04
78	19,00	81,08	10,05
79	12,00	88,26	10,04
80	4,00	95,76	10,04
81	1,00	99,06	10,04
82	0,00	99,88	10,04
83	0,00	100,00	10,04
84	0,00	99,90	10,04
85	1,00	98,92	10,04
86	5,00	95,42	10,05
87	12,00	87,86	10,04
88	21,00	78,92	10,03
89	20,00	79,62	10,04
90	13,00	87,48	10,04
91	6,00	93,58	10,04
92	1,00	98,62	10,04
93	0,00	99,64	10,04
94	0,00	99,96	10,04
95	0,00	99,66	10,04

96	2,00	98,00	10,04
97	6,00	93,88	10,04
98	13,00	87,38	10,04
99	22,00	78,02	10,04
100	23,00	76,90	10,03
101	14,00	85,74	10,05
102	8,00	92,40	10,04
103	3,00	96,90	10,05
104	1,00	98,96	10,04
105	1,00	99,28	10,04
106	1,00	98,80	10,04
107	3,00	96,92	10,04
108	7,00	92,56	10,04
109	15,00	85,10	10,04
110	23,00	77,30	10,05
111	26,00	74,32	10,05
112	16,00	83,86	10,04
113	10,00	89,96	10,04
114	4,00	95,62	10,04
115	2,00	97,84	10,04
116	2,00	98,34	10,04
117	2,00	97,80	10,04
118	4,00	95,50	10,05
119	10,00	90,34	10,04
120	17,00	82,86	10,04
121	25,00	74,70	10,04
Média Total	8,00	92,10	10,04

Tabela 18 – Resultados 802.15.4 por Nodo - Cenário 3

A.4 802.15.4 CENÁRIO 4

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	25	75,18	10,04
2	21	79,28	10,04
3	17	83,46	10,05
4	13	87,26	10,05
5	10	90,36	10,04

6	7	93,30	10,04
7	4	95,70	10,04
8	3	96,88	10,04
9	2	97,58	10,04
10	2	98,14	10,04
11	2	98,24	10,04
12	2	98,26	10,04
13	2	97,76	10,04
14	3	96,96	10,04
15	5	95,42	10,04
16	6	93,52	10,04
17	9	90,96	10,04
18	13	87,28	10,04
19	16	84,22	10,04
20	20	80,14	10,05
21	25	75,18	10,04
22	23	77,24	10,03
23	19	81,26	10,04
24	14	86,10	10,05
25	10	90,14	10,04
26	7	92,52	10,04
27	5	95,48	10,04
28	3	96,94	10,04
29	2	98,34	10,04
30	1	98,92	10,04
31	1	99,30	10,04
32	1	99,44	10,04
33	1	99,14	10,04
34	1	99,18	10,04
35	2	98,26	10,04
36	3	97,04	10,04
37	5	95,12	10,04
38	7	92,80	10,04
39	10	90,20	10,04
40	14	86,12	10,04
41	18	81,82	10,05
42	23	77,16	10,04
43	21	79,30	10,05
44	17	83,16	10,04

45	12	87,54	10,04
46	9	90,96	10,03
47	6	94,16	10,04
48	3	96,88	10,04
49	2	98,34	10,04
50	1	99,00	10,04
51	0	99,68	10,04
52	0	99,84	10,04
53	0	99,80	10,04
54	0	99,76	10,04
55	0	99,66	10,04
56	1	99,38	10,04
57	1	98,58	10,04
58	3	96,58	10,04
59	6	94,42	10,04
60	9	91,24	10,04
61	12	87,96	10,04
62	17	83,36	10,04
63	22	78,22	10,05
64	20	79,72	10,04
65	16	84,40	10,04
66	11	88,84	10,04
67	8	91,88	10,04
68	5	95,28	10,04
69	3	97,46	10,04
70	1	99,24	10,04
71	0	99,54	10,04
72	0	99,92	10,04
73	0	99,94	10,04
74	0	100,00	10,04
75	0	99,98	10,04
76	0	99,90	10,04
77	0	99,74	10,04
78	1	98,92	10,04
79	2	98,02	10,04
80	5	95,00	10,04
81	8	92,34	10,04
82	12	88,46	10,04
83	16	84,36	10,04

84	20	80,16	10,03
85	19	81,08	10,04
86	15	85,44	10,05
87	11	89,36	10,04
88	6	93,50	10,04
89	4	95,96	10,04
90	2	97,96	10,04
91	1	99,28	10,04
92	0	99,76	10,04
93	0	100,00	10,04
94	0	100,00	10,04
95	0	100,00	10,04
96	0	100,00	10,04
97	0	99,98	10,04
98	0	99,84	10,04
99	1	99,18	10,04
100	2	97,92	10,04
101	4	95,92	10,04
102	7	92,82	10,04
103	10	89,60	10,04
104	15	85,32	10,05
105	20	79,84	10,05
106	19	80,82	10,04
107	14	85,64	10,04
108	10	89,88	10,04
109	6	93,62	10,04
110	4	96,10	10,04
111	2	97,90	10,04
112	1	99,16	10,04
113	0	99,84	10,04
114	0	100,00	10,04
115	0	100,00	10,04
116	0	100,00	10,04
117	0	99,98	10,04
118	0	99,96	10,04
119	0	99,90	10,04
120	1	99,24	10,04
121	2	98,42	10,04
122	3	96,72	10,04

123	6	93,72	10,04
124	10	89,70	10,04
125	15	85,12	10,04
126	19	80,78	10,04
127	19	81,16	10,03
128	14	85,94	10,04
129	10	89,88	10,05
130	7	92,90	10,04
131	4	96,20	10,04
132	2	97,98	10,04
133	1	99,40	10,04
134	0	99,86	10,04
135	0	99,92	10,04
136	0	100,00	10,04
137	0	100,00	10,04
138	0	100,00	10,04
139	0	100,00	10,04
140	0	99,68	10,04
141	1	99,30	10,04
142	2	98,12	10,04
143	4	96,12	10,04
144	7	92,50	10,04
145	11	89,42	10,04
146	14	85,54	10,04
147	20	80,32	10,04
148	20	79,62	10,04
149	15	84,78	10,04
150	11	88,74	10,04
151	8	92,28	10,04
152	4	95,64	10,04
153	3	97,32	10,04
154	1	98,72	10,04
155	0	99,64	10,04
156	0	99,90	10,04
157	0	99,98	10,04
158	0	99,98	10,04
159	0	99,96	10,04
160	0	99,90	10,04
161	1	99,48	10,04

162	1	98,72	10,04
163	3	97,40	10,04
164	5	95,24	10,04
165	8	92,44	10,04
166	12	88,30	10,04
167	15	84,68	10,04
168	20	79,66	10,05
169	22	77,88	10,04
170	17	82,76	10,03
171	13	87,38	10,04
172	9	90,76	10,05
173	6	93,60	10,04
174	4	96,22	10,04
175	1	98,56	10,04
176	1	99,04	10,04
177	0	99,64	10,04
178	0	99,80	10,04
179	0	99,88	10,04
180	0	99,74	10,04
181	0	99,56	10,04
182	1	98,96	10,04
183	2	98,14	10,04
184	3	96,82	10,04
185	7	93,02	10,04
186	9	91,18	10,05
187	13	87,14	10,04
188	16	83,68	10,04
189	22	78,10	10,05
190	23	76,88	10,04
191	19	81,04	10,05
192	14	86,06	10,04
193	10	89,68	10,04
194	7	92,98	10,04
195	5	94,96	10,04
196	3	97,12	10,04
197	2	98,24	10,04
198	1	99,00	10,04
199	1	99,38	10,04
200	1	99,32	10,04

201	1	99,46	10,04
202	1	98,76	10,04
203	2	98,08	10,04
204	3	97,16	10,04
205	5	94,76	10,04
206	7	92,98	10,04
207	11	89,28	10,04
208	15	85,48	10,04
209	18	81,68	10,05
210	22	77,70	10,04
211	24	76,06	10,04
212	21	79,10	10,04
213	16	83,70	10,04
214	12	87,86	10,04
215	9	90,86	10,04
216	7	93,06	10,04
217	5	94,84	10,04
218	4	96,14	10,04
219	2	98,08	10,04
220	2	97,76	10,04
221	2	98,08	10,04
222	2	97,92	10,04
223	2	97,76	10,04
224	3	96,86	10,04
225	5	95,00	10,04
226	7	92,78	10,04
227	10	90,02	10,04
228	13	86,50	10,04
229	16	83,60	10,04
230	20	80,20	10,04
231	24	76,02	10,04
Média Total	7	92,89	10,04

Tabela 19 – Resultados 802.15.4 por Nodo - Cenário 4

A.5 802.15.4 DESVIO PADRÃO

TPP (σ)	Eficiência (σ)	Latência (σ)	
------------------	-------------------------	-----------------------	--

Cenário 1	9,838	9,818	0,009
Cenário 2	8,044	8,031	0,000
Cenário 3	8,975	8,953	0,003
Cenário 4	8,224	8,233	0,029

Tabela 20 – 802.15.4 Desvio Padrão

APÊNDICE B - Resultados por nós Padrão 802.11.ah

B.1 802.11.AH CENÁRIO 1

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	28	72,38	7,70
2	7	92,57	8,54
3	2	98,37	6,93
4	8	92,43	8,23
5	28	71,59	7,35
6	22	77,98	7,85
7	2	98,10	6,58
8	0	99,98	0,18
9	2	98,06	8,18
10	22	77,59	7,70
11	29	71,43	7,66
12	8	92,49	8,23
13	2	98,27	6,21
14	8	92,08	7,88
15	29	71,22	8,03
Média Total	13	86,97	7,15

Tabela 21 – Resultados 802.11.ah por Nodo - Cenário 1

B.2 802.11.AH CENÁRIO 2

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	29	70,56	7,87
2	19	80,60	6,88
3	10	89,82	7,55
4	5	94,86	6,71
5	3	97,32	8,02
6	2	98,34	6,99
7	3	97,30	7,32
8	5	94,94	7,05
9	11	89,48	7,73
10	20	80,42	7,18
11	28	71,96	7,20
12	24	76,14	8,04
13	13	86,88	7,40

14	6	94,24	7,91
15	2	98,08	6,06
16	0	99,76	1,82
17	0	99,96	0,36
18	0	99,70	1,98
19	2	98,16	5,93
20	6	94,12	7,75
21	14	85,90	8,08
22	23	76,52	7,18
23	21	79,06	6,97
24	12	88,34	7,91
25	4	95,80	7,85
26	1	99,44	3,77
27	0	100,00	0,00
28	0	100,00	0,00
29	0	99,98	0,18
30	1	99,38	3,58
31	4	96,40	7,57
32	11	88,92	7,73
33	22	77,94	7,19
34	22	77,56	7,90
35	12	87,68	8,39
36	4	96,24	7,84
37	1	99,20	3,83
38	0	99,98	0,18
39	0	100,00	0,00
40	0	99,98	0,18
41	1	99,20	3,97
42	4	95,54	7,17
43	12	88,26	8,41
44	22	78,28	6,84
45	24	75,92	7,51
46	14	85,76	6,73
47	5	94,50	7,68
48	2	98,18	7,14
49	0	99,54	2,55
50	0	99,84	1,43
51	0	99,66	1,87
52	2	98,22	7,36

53	6	93,82	7,90
54	15	85,44	8,24
55	25	75,22	7,56
56	29	70,82	7,34
57	19	81,40	7,00
58	10	89,92	8,73
59	5	94,82	8,07
60	3	97,26	8,04
61	2	98,12	6,47
62	3	96,90	6,86
63	5	95,16	7,34
64	10	90,06	7,87
65	18	81,62	7,50
66	28	71,62	8,41
Média Total	9	90,85	6,06

Tabela 22 – Resultados 802.11.ah por Nodo - Cenário 2

B.3 802.11.AH CENÁRIO 3

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	28	72,12	7,36
2	19	81,06	7,68
3	10	89,52	7,92
4	6	94,44	8,05
5	2	97,66	6,84
6	2	98,10	6,96
7	3	97,36	7,35
8	5	94,80	8,22
9	10	89,84	7,53
10	19	80,88	6,49
11	29	71,24	7,68
12	26	74,04	6,82
13	16	84,14	7,87
14	7	92,70	7,39
15	3	96,66	6,50
16	1	98,94	5,02
17	1	99,44	4,09

18	1	98,96	5,04
19	3	96,80	8,06
20	9	91,40	7,54
21	16	84,02	7,38
22	25	74,54	7,57
23	24	76,40	7,35
24	15	84,98	7,20
25	6	93,56	7,72
26	2	97,92	7,02
27	0	99,80	1,44
28	0	99,90	0,89
29	0	99,68	2,50
30	2	98,00	7,39
31	7	93,32	7,37
32	14	86,08	7,57
33	24	75,86	7,00
34	22	77,62	7,87
35	13	87,18	8,43
36	5	95,40	6,35
37	1	98,74	5,40
38	0	99,94	0,54
39	0	100,00	0,00
40	0	99,92	0,71
41	1	98,70	6,41
42	5	94,92	7,71
43	13	87,18	7,91
44	23	77,20	7,19
45	22	77,90	6,44
46	12	88,14	8,01
47	4	95,52	7,23
48	1	99,24	4,37
49	0	99,98	0,18
50	0	100,00	0,00
51	0	99,98	0,18
52	1	99,36	3,79
53	4	95,76	7,57
54	12	88,10	7,93
55	22	78,44	6,98
56	22	78,40	7,15

57	11	88,90	8,24
58	4	95,96	8,39
59	1	99,36	3,59
60	0	100,00	0,00
61	0	100,00	0,00
62	0	100,00	0,00
63	1	99,44	3,23
64	4	96,44	8,05
65	12	88,40	7,90
66	22	78,06	7,53
67	21	78,50	7,51
68	11	88,60	7,75
69	4	95,94	7,54
70	1	99,10	5,06
71	0	100,00	0,00
72	0	100,00	0,00
73	0	100,00	0,00
74	1	99,40	3,77
75	4	95,62	7,71
76	11	88,56	7,57
77	22	78,14	7,38
78	23	77,40	7,55
79	12	87,62	8,21
80	5	95,22	7,91
81	1	98,82	5,78
82	0	99,90	0,89
83	0	100,00	0,00
84	0	99,96	0,36
85	1	98,86	6,10
86	5	94,66	8,05
87	13	87,12	7,68
88	22	77,98	7,23
89	24	75,78	6,65
90	14	85,88	8,55
91	7	93,16	8,07
92	2	97,96	6,80
93	0	99,64	2,71
94	0	99,78	1,46
95	0	99,74	2,15

96	2	97,74	6,68
97	6	93,54	8,10
98	14	86,06	7,69
99	23	76,60	6,47
100	27	73,26	7,35
101	17	83,12	7,20
102	8	92,28	8,39
103	4	96,22	7,89
104	1	99,32	4,47
105	1	99,46	2,71
106	1	99,00	4,75
107	3	96,74	7,85
108	8	92,06	8,55
109	16	84,12	6,22
110	26	74,24	7,70
111	28	72,02	7,68
112	19	81,40	7,67
113	10	89,72	8,42
114	5	94,78	8,57
115	2	97,64	7,55
116	2	98,14	6,49
117	2	97,72	8,39
118	5	94,60	7,83
119	10	89,80	8,58
120	18	82,06	7,19
121	28	71,62	7,36
Média Total	9	91,20	5,97

Tabela 23 – Resultados 802.11.ah por Nodo - Cenário 3

B.4 802.11.AH CENÁRIO 4

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	28	71,68	7,34
2	23	77,24	6,66
3	18	81,58	7,88
4	14	85,62	7,90
5	11	88,74	8,57

6	7	92,58	8,10
7	5	94,64	7,70
8	4	96,46	7,40
9	3	97,46	7,38
10	2	97,88	7,17
11	2	98,08	6,15
12	2	98,14	7,40
13	3	96,98	7,54
14	4	96,24	7,20
15	5	94,54	7,43
16	8	91,80	8,42
17	11	89,12	7,57
18	14	86,48	7,90
19	18	81,82	6,86
20	23	76,74	7,23
21	30	70,22	7,35
22	27	73,48	7,53
23	21	78,52	7,37
24	17	83,26	7,54
25	12	88,06	7,88
26	8	91,54	8,05
27	5	94,64	7,91
28	3	97,20	7,52
29	2	98,08	6,99
30	1	99,02	4,70
31	1	99,12	4,69
32	1	99,48	2,90
33	1	99,46	3,27
34	1	98,86	5,42
35	2	98,30	6,48
36	3	97,08	6,99
37	5	94,68	7,72
38	8	91,60	7,56
39	12	88,30	7,75
40	16	84,18	7,49
41	20	79,84	8,08
42	26	74,10	8,08
43	24	75,72	7,69
44	19	80,56	7,53

45	14	86,10	7,75
46	10	89,88	8,09
47	6	94,22	8,07
48	4	96,10	6,89
49	2	98,14	6,66
50	1	99,32	3,78
51	0	99,66	2,34
52	0	99,84	1,25
53	0	99,86	1,07
54	0	99,92	0,55
55	0	99,52	3,23
56	1	99,40	3,92
57	2	98,02	7,32
58	3	96,74	8,05
59	6	93,82	7,72
60	10	89,88	7,70
61	14	85,78	8,26
62	19	81,00	7,68
63	24	76,26	7,24
64	23	77,08	7,53
65	17	83,18	7,88
66	13	86,88	7,87
67	8	92,06	7,95
68	5	94,70	8,02
69	3	97,24	6,83
70	1	98,94	4,89
71	0	99,58	2,71
72	0	99,90	0,89
73	0	99,98	0,18
74	0	100,00	0,00
75	0	99,98	0,18
76	0	99,92	0,72
77	0	99,70	1,79
78	1	98,76	5,40
79	2	97,58	7,17
80	5	94,90	7,05
81	8	91,74	8,59
82	12	88,14	7,56
83	17	82,52	8,06

84	22	78,34	7,68
85	22	77,56	8,04
86	17	82,96	8,21
87	11	89,28	7,72
88	7	92,52	8,24
89	4	95,62	7,36
90	2	97,94	7,51
91	1	99,24	4,66
92	0	99,92	0,71
93	0	100,00	0,00
94	0	100,00	0,00
95	0	99,98	0,18
96	0	100,00	0,00
97	0	99,98	0,18
98	0	99,76	1,62
99	1	99,38	3,26
100	2	97,92	6,25
101	4	95,52	7,21
102	7	92,52	8,42
103	11	89,12	8,26
104	17	82,92	7,19
105	21	78,54	7,60
106	22	78,32	7,03
107	16	83,70	7,68
108	12	88,06	8,24
109	7	92,62	7,72
110	4	96,12	8,22
111	2	98,48	6,83
112	0	99,50	4,12
113	0	99,86	1,07
114	0	99,98	0,18
115	0	100,00	0,00
116	0	100,00	0,00
117	0	100,00	0,00
118	0	100,00	0,00
119	0	99,90	0,89
120	1	99,36	4,47
121	2	97,94	7,20
122	4	96,10	7,69

123	8	92,36	8,04
124	12	88,40	8,40
125	16	83,66	6,99
126	22	78,42	6,87
127	22	77,68	6,84
128	16	83,66	7,18
129	12	88,40	7,26
130	8	91,84	7,76
131	4	95,74	7,17
132	2	98,08	7,52
133	1	99,44	3,63
134	0	99,82	1,61
135	0	99,96	0,18
136	0	100,00	0,00
137	0	100,00	0,00
138	0	99,98	0,18
139	0	99,98	0,18
140	0	99,82	1,45
141	1	99,46	4,11
142	2	98,26	6,98
143	4	95,90	7,56
144	7	92,62	8,41
145	12	87,76	7,87
146	17	82,58	6,32
147	23	77,34	7,31
148	23	77,06	8,21
149	17	83,28	8,08
150	12	87,58	8,08
151	8	92,20	8,21
152	5	94,58	8,24
153	3	97,10	7,71
154	1	99,04	5,36
155	0	99,70	2,00
156	0	99,80	1,63
157	0	99,98	0,18
158	0	99,98	0,02
159	0	100,00	0,00
160	0	99,94	0,53
161	0	99,68	2,14

162	1	98,78	5,38
163	2	97,74	7,71
164	5	95,32	7,74
165	9	91,38	8,25
166	13	87,38	7,90
167	17	82,52	7,24
168	21	78,70	8,06
169	25	75,16	8,23
170	18	81,64	6,83
171	14	85,80	7,70
172	10	90,24	8,55
173	6	93,76	8,74
174	4	96,34	8,41
175	2	97,94	7,04
176	1	99,02	5,57
177	0	99,80	1,61
178	0	99,86	1,25
179	0	99,82	1,27
180	0	99,82	1,11
181	0	99,58	2,55
182	1	99,12	4,89
183	2	98,02	7,03
184	4	96,16	7,01
185	5	94,68	7,37
186	10	90,42	8,41
187	14	85,92	8,23
188	20	79,94	6,85
189	25	75,40	7,87
190	25	74,66	7,68
191	20	80,20	7,88
192	15	84,54	7,88
193	12	88,44	8,08
194	8	91,80	8,08
195	5	95,00	7,73
196	3	96,62	6,83
197	2	98,36	5,95
198	1	99,12	5,21
199	1	99,32	3,77
200	1	99,36	3,64

201	1	99,34	3,61
202	1	99,04	5,21
203	2	97,62	6,37
204	3	96,52	7,52
205	5	94,66	7,75
206	9	91,44	8,07
207	12	88,18	7,42
208	16	84,06	7,55
209	20	79,76	7,03
210	26	74,48	7,90
211	27	72,86	8,23
212	24	76,02	7,15
213	19	81,24	7,70
214	15	85,04	7,74
215	10	89,60	7,72
216	7	92,80	6,92
217	6	94,38	7,52
218	3	96,68	7,05
219	2	97,74	5,94
220	2	97,98	7,18
221	2	98,28	6,27
222	2	98,06	7,54
223	3	97,36	7,16
224	4	96,12	7,33
225	5	95,18	6,88
226	8	92,10	7,38
227	11	89,48	7,73
228	14	85,90	8,25
229	18	81,52	7,50
230	23	77,38	7,36
231	28	71,74	7,89
Média Total	8	92,06	5,92

Tabela 24 – Resultados 802.11.ah por Nodo - Cenário 4

B.5 802.11AH DESVIO PADRÃO

TPP (σ)	Eficiência (σ)	Latência (σ)	
------------------	-------------------------	-----------------------	--

Cenário 1	11,218	11,252	0,002
Cenário 2	8,934	8,971	0,003
Cenário 3	8,975	8,953	0,003
Cenário 4	8,224	8,233	0,029

Tabela 25 – 802.11ah Desvio Padrão

APÊNDICE C - Resultados por nós Padrão Lora

C.1 LORA CENÁRIO 1

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	10	89,95	8,91
2	13	87,46	8,91
3	1	98,92	8,91
4	0	99,92	8,91
5	1	99,20	8,90
6	13	87,08	8,90
7	8	92,22	8,91
8	0	100,00	8,91
9	0	100,00	8,91
10	0	99,88	8,90
11	7	92,54	8,90
12	14	86,14	8,91
13	1	99,00	8,91
14	0	99,92	8,91
15	1	99,06	8,91
Média Total	13	86,50	8,91

Tabela 26 – Resultados Lora por Nodo - Cenário 1

C.2 LORA CENÁRIO 2

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	1	98,78	8,90
2	0	99,78	8,90
3	0	99,94	8,90
4	0	99,98	8,90
5	0	100,00	8,90
6	0	100,00	8,90
7	0	100,00	8,90
8	0	100,00	8,90
9	0	99,98	8,90
10	0	99,78	8,90
11	1	99,00	8,90
12	1	99,34	8,90
13	0	100,00	8,90

14	0	99,98	8,90
15	0	100,00	8,90
16	0	100,00	8,90
17	0	100,00	8,90
18	0	100,00	8,90
19	0	100,00	8,90
20	0	99,98	8,90
21	0	99,86	8,90
22	1	99,34	8,90
23	0	99,68	8,90
24	0	99,86	8,90
25	0	100,00	8,90
26	0	100,00	8,90
27	0	100,00	8,90
28	0	100,00	8,90
29	0	100,00	8,90
30	0	100,00	8,90
31	0	100,00	8,90
32	0	99,98	8,90
33	1	99,48	8,90
34	0	99,54	8,90
35	0	99,98	8,90
36	0	100,00	8,90
37	0	100,00	8,90
38	0	100,00	8,90
39	0	100,00	8,90
40	0	100,00	8,90
41	0	100,00	8,90
42	0	100,00	8,90
43	0	99,94	8,90
44	0	99,58	8,90
45	0	99,56	8,90
46	0	99,86	8,90
47	0	100,00	8,90
48	0	100,00	8,90
49	0	100,00	8,90
50	0	100,00	8,90
51	0	100,00	8,90
52	0	100,00	8,90

53	0	99,98	8,90
54	0	99,82	8,90
55	1	99,28	8,90
56	1	99,08	8,90
57	0	99,64	8,90
58	0	99,98	8,90
59	0	100,00	8,90
60	0	100,00	8,90
61	0	100,00	8,90
62	0	100,00	8,90
63	0	100,00	8,90
64	0	99,94	8,90
65	0	99,72	8,90
66	1	98,92	8,90
Média Total	0	99,84	8,90

Tabela 27 – Resultados Lora por Nodo - Cenário 2

C.3 LORA CENÁRIO 3

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	9	90,50	8,91
2	1	99,08	8,91
3	0	99,76	8,91
4	0	100,00	8,91
5	0	100,00	8,91
6	0	100,00	8,91
7	0	99,98	8,91
8	0	100,00	8,91
9	0	99,96	8,91
10	0	99,84	8,91
11	0	99,50	8,91
12	1	99,32	8,91
13	1	99,48	8,91
14	0	99,98	8,91
15	0	100,00	8,91
16	0	100,00	8,91
17	0	100,00	8,91

18	0	100,00	8,91
19	0	99,98	8,91
20	0	99,98	8,91
21	0	99,86	8,91
22	1	99,40	8,91
23	1	99,36	8,91
24	0	99,74	8,91
25	0	100,00	8,91
26	0	100,00	8,91
27	0	100,00	8,91
28	0	100,00	8,91
29	0	100,00	8,91
30	0	100,00	8,91
31	1	98,98	8,91
32	1	98,86	8,91
33	1	98,62	8,91
34	1	98,54	8,91
35	1	98,94	8,91
36	0	100,00	8,91
37	0	100,00	8,91
38	0	100,00	8,91
39	0	100,00	8,91
40	0	100,00	8,91
41	0	100,00	8,91
42	0	100,00	8,91
43	0	99,92	8,91
44	1	99,36	8,91
45	0	99,66	8,91
46	0	99,96	8,91
47	0	99,98	8,91
48	0	100,00	8,91
49	0	100,00	8,91
50	0	100,00	8,91
51	0	100,00	8,91
52	0	100,00	8,91
53	0	100,00	8,91
54	0	99,96	8,91
55	0	99,90	8,91
56	0	99,56	8,91

57	0	99,68	8,91
58	0	100,00	8,91
59	0	100,00	8,91
60	0	100,00	8,91
61	0	100,00	8,91
62	0	100,00	8,91
63	0	99,98	8,91
64	0	100,00	8,91
65	0	99,98	8,91
66	0	99,60	8,91
67	0	99,64	8,91
68	0	99,92	8,91
69	0	100,00	8,91
70	0	99,96	8,91
71	0	100,00	8,91
72	0	100,00	8,91
73	0	100,00	8,91
74	0	100,00	8,91
75	0	100,00	8,91
76	0	99,98	8,91
77	0	99,68	8,91
78	1	99,48	8,91
79	1	98,94	8,91
80	0	100,00	8,91
81	0	100,00	8,91
82	0	100,00	8,91
83	0	100,00	8,91
84	0	100,00	8,91
85	0	100,00	8,91
86	0	100,00	8,91
87	2	97,96	8,91
88	0	99,50	8,91
89	1	99,28	8,91
90	0	99,86	8,91
91	0	99,96	8,91
92	0	100,00	8,91
93	0	100,00	8,91
94	0	100,00	8,91
95	0	100,00	8,91

96	0	100,00	8,91
97	0	100,00	8,91
98	0	99,96	8,91
99	0	99,66	8,91
100	1	99,29	8,91
101	1	99,26	8,91
102	0	99,84	8,91
103	1	98,98	8,91
104	0	100,00	8,91
105	0	100,00	8,91
106	0	100,00	8,91
107	0	100,00	8,91
108	0	99,98	8,91
109	0	99,82	8,91
110	0	99,54	8,91
111	2	98,16	8,91
112	1	99,24	8,91
113	0	99,90	8,91
114	0	99,94	8,91
115	0	100,00	8,91
116	0	100,00	8,91
117	0	100,00	8,91
118	0	100,00	8,91
119	9	91,14	8,91
120	9	91,20	9,38
121	10	90,00	10,04
Média Total	1	99,48	8,93

Tabela 28 – Resultados Lora por Nodo - Cenário 3

C.4 LORA CENÁRIO 4

Nodo	TPP	Eficiência (%)	Latência (ms)
1	14	86,40	8,90
2	8	91,70	8,90
3	6	94,36	8,90
4	3	96,70	8,90
5	2	98,34	8,90

6	1	99,14	8,90
7	0	99,58	8,90
8	0	99,86	8,90
9	0	99,92	8,90
10	0	99,92	8,90
11	0	99,98	8,90
12	0	99,90	8,90
13	0	99,82	8,90
14	0	99,76	8,90
15	0	99,66	8,90
16	1	99,12	8,90
17	2	98,12	8,90
18	4	96,04	8,90
19	5	94,58	8,90
20	8	91,64	8,90
21	13	86,72	8,89
22	10	89,52	8,90
23	7	93,42	8,90
24	4	95,56	8,90
25	2	97,66	8,90
26	1	98,86	8,90
27	0	99,58	8,90
28	0	99,86	8,90
29	0	99,94	8,90
30	0	99,98	8,90
31	0	99,98	8,90
32	0	100,00	8,90
33	0	100,00	8,90
34	0	99,98	8,90
35	0	99,98	8,90
36	0	99,88	8,90
37	0	99,66	8,90
38	1	98,98	8,90
39	2	97,84	8,90
40	4	96,06	8,90
41	7	92,88	8,90
42	12	88,34	8,90
43	10	90,38	8,90
44	6	94,24	8,89

45	3	97,30	8,90
46	2	98,42	8,90
47	1	99,32	8,90
48	0	99,78	8,90
49	0	99,98	8,90
50	0	99,98	8,90
51	0	100,00	8,90
52	0	100,00	8,90
53	0	100,00	8,90
54	0	100,00	8,90
55	0	99,98	8,90
56	0	100,00	8,90
57	0	99,92	8,90
58	0	99,78	8,90
59	1	99,48	8,90
60	1	98,54	8,90
61	4	96,48	8,90
62	6	93,98	8,90
63	10	90,10	8,89
64	9	91,18	8,90
65	5	94,94	8,90
66	3	97,04	8,90
67	1	98,98	8,90
68	0	99,50	8,90
69	0	99,94	8,90
70	0	99,98	8,90
71	0	100,00	8,90
72	0	100,00	8,90
73	0	100,00	8,90
74	0	100,00	8,90
75	0	99,98	8,90
76	0	99,98	8,90
77	0	100,00	8,90
78	0	100,00	8,90
79	0	99,90	8,90
80	0	99,68	8,90
81	1	99,26	8,90
82	3	97,30	8,90
83	5	94,76	8,90

84	9	91,36	8,90
85	8	91,72	8,90
86	4	95,70	8,90
87	3	97,30	8,90
88	1	99,00	8,90
89	0	99,72	8,90
90	0	99,92	8,90
91	0	100,00	8,90
92	0	100,00	8,90
93	0	99,98	8,90
94	0	100,00	8,90
95	0	100,00	8,90
96	0	99,96	8,90
97	0	99,98	8,90
98	0	100,00	8,90
99	0	99,98	8,90
100	0	99,96	8,90
101	0	99,52	8,90
102	1	99,04	8,90
103	2	98,06	8,90
104	4	95,70	8,90
105	8	92,16	8,90
106	8	92,10	8,90
107	4	95,94	8,90
108	2	97,88	8,90
109	1	99,26	8,90
110	0	99,64	8,90
111	0	99,90	8,90
112	0	100,00	8,90
113	0	100,00	8,90
114	0	99,98	8,90
115	0	100,00	8,90
116	0	100,00	8,90
117	0	100,00	8,90
118	0	100,00	8,90
119	0	100,00	8,90
120	0	100,00	8,90
121	0	99,96	8,90
122	0	99,72	8,90

123	1	99,16	8,90
124	2	97,92	8,90
125	4	95,68	8,90
126	8	91,98	8,90
127	8	92,08	8,90
128	4	95,52	8,90
129	2	97,90	8,90
130	1	99,28	8,90
131	0	99,82	8,90
132	0	99,94	8,90
133	0	99,96	8,90
134	0	100,00	8,90
135	0	100,00	8,90
136	0	100,00	8,90
137	0	100,00	8,90
138	0	100,00	8,90
139	0	100,00	8,90
140	0	100,00	8,90
141	0	100,00	8,90
142	0	99,98	8,90
143	0	99,82	8,90
144	1	99,02	8,90
145	2	97,82	8,90
146	5	95,42	8,90
147	7	92,54	8,90
148	8	91,52	8,90
149	5	95,24	8,90
150	3	97,28	8,90
151	1	98,84	8,90
152	0	99,56	8,90
153	0	99,92	8,90
154	0	99,96	8,90
155	0	100,00	8,90
156	0	100,00	8,90
157	0	100,00	8,90
158	0	100,00	8,90
159	0	100,00	8,90
160	0	100,00	8,90
161	0	100,00	8,90

162	0	100,00	8,90
163	0	99,92	8,90
164	0	99,68	8,90
165	1	98,86	8,90
166	2	97,58	8,90
167	5	94,90	8,90
168	8	91,54	8,89
169	9	90,70	8,90
170	5	94,64	8,89
171	3	97,04	8,90
172	1	98,50	8,90
173	1	99,44	8,90
174	0	99,78	8,90
175	0	99,96	8,90
176	0	100,00	8,90
177	0	100,00	8,90
178	0	99,98	8,90
179	0	99,98	8,90
180	0	99,98	8,90
181	0	100,00	8,90
182	0	100,00	8,90
183	0	99,92	8,90
184	0	99,82	8,90
185	1	99,44	8,90
186	1	98,56	8,90
187	3	96,54	8,90
188	6	94,12	8,90
189	10	90,30	8,90
190	12	87,56	8,89
191	7	93,08	8,90
192	4	95,68	8,90
193	2	98,16	8,90
194	1	99,08	8,90
195	0	99,52	8,90
196	0	99,82	8,90
197	0	99,92	8,90
198	0	99,92	8,90
199	0	100,00	8,90
200	0	99,96	8,90

201	0	99,96	8,90
202	0	99,98	8,90
203	0	99,98	8,90
204	0	99,80	8,90
205	0	99,60	8,90
206	1	98,96	8,90
207	2	98,14	8,90
208	4	95,86	8,90
209	7	92,96	8,90
210	11	88,78	8,90
211	12	87,58	8,90
212	9	90,98	8,90
213	6	94,26	8,90
214	3	97,02	8,90
215	2	98,34	8,90
216	1	99,12	8,90
217	1	99,42	8,90
218	0	99,88	8,90
219	0	99,90	8,90
220	0	99,92	8,90
221	0	99,98	8,90
222	0	99,92	8,90
223	0	99,88	8,90
224	0	99,88	8,90
225	0	99,62	8,90
226	1	99,24	8,90
227	2	98,10	8,90
228	3	96,72	8,90
229	6	94,06	8,90
230	9	91,02	8,90
231	13	87,02	8,90
Média Total	2	97,87	8,90

Tabela 29 – Resultados Lora por Nodo - Cenário 4

C.5 LORA DESVIO PADRÃO

TPP (σ)	Eficiência (σ)	Latência (σ)	
------------------	-------------------------	-----------------------	--

Cenário 1	5,772	5,756	0,000002
Cenário 2	0,327	0,291	0,000001
Cenário 3	1,684	1,678	0,000111
Cenário 4	2,637	2,660	0,000001

Tabela 30 – Lora Desvio Padrão

APÊNDICE D – Distância dos nós

D.1 CENÁRIO 1

Id	X	Y	Distância
1	0	0	1118,03
2	500	0	707,11
3	1000	0	500,00
4	1500	0	707,11
5	2000	0	1118,03
6	0	500	1000
7	500	500	500
8	1000	500	0
9	1500	500	500
10	2000	500	1000
11	0	1000	1118,03
12	500	1000	707,11
13	1000	1000	500,00
14	1500	1000	707,11
15	2000	1000	1118,03

Tabela 31 – Distância por Nodo - Cenário 1

D.2 CENÁRIO 2

Id	X	Y	Distância
1	0	0	1118,03
2	200	0	943,40
3	400	0	781,02
4	600	0	640,31
5	800	0	538,52
6	1000	0	500,00
7	1200	0	538,52
8	1400	0	640,31
9	1600	0	781,02
10	1800	0	943,40
11	2000	0	1118,03
12	0	200	1044,03
13	200	200	854,40
14	400	200	670,82

15	600	200	500,00
16	800	200	360,56
17	1000	200	300,00
18	1200	200	360,56
19	1400	200	500,00
20	1600	200	670,82
21	1800	200	854,40
22	2000	200	1044,03
23	0	400	1004,99
24	200	400	806,23
25	400	400	608,28
26	600	400	412,31
27	800	400	223,61
28	1000	400	100,00
29	1200	400	223,61
30	1400	400	412,31
31	1600	400	608,28
32	1800	400	806,23
33	2000	400	1004,99
34	0	600	1004,99
35	200	600	806,23
36	400	600	608,28
37	600	600	412,31
38	800	600	223,61
39	1000	600	100,00
40	1200	600	223,61
41	1400	600	412,31
42	1600	600	608,28
43	1800	600	806,23
44	2000	600	1004,99
45	0	800	1044,03
46	200	800	854,40
47	400	800	670,82
48	600	800	500,00
49	800	800	360,56
50	1000	800	300,00
51	1200	800	360,56
52	1400	800	500,00
53	1600	800	670,82

54	1800	800	854,40
55	2000	800	1044,03
56	0	1000	1118,03
57	200	1000	943,40
58	400	1000	781,02
59	600	1000	640,31
60	800	1000	538,52
61	1000	1000	500,00
62	1200	1000	538,52
63	1400	1000	640,31
64	1600	1000	781,02
65	1800	1000	943,40
66	2000	1000	1118,03

Tabela 32 – Distância por Nodo - Cenário 2

D.3 CENÁRIO 3

Id	X	Y	Distância
1	0	0	1118,03
2	200	0	943,40
3	400	0	781,02
4	600	0	640,31
5	800	0	538,52
6	1000	0	500,00
7	1200	0	538,52
8	1400	0	640,31
9	1600	0	781,02
10	1800	0	943,40
11	2000	0	1118,03
12	0	100	1077,03
13	200	100	894,43
14	400	100	721,11
15	600	100	565,69
16	800	100	447,21
17	1000	100	400,00
18	1200	100	447,21
19	1400	100	565,69

20	1600	100	721,11
21	1800	100	894,43
22	2000	100	1077,03
23	0	200	1044,03
24	200	200	854,40
25	400	200	670,82
26	600	200	500,00
27	800	200	360,56
28	1000	200	300,00
29	1200	200	360,56
30	1400	200	500,00
31	1600	200	670,82
32	1800	200	854,40
33	2000	200	1044,03
34	0	300	1019,80
35	200	300	824,62
36	400	300	632,46
37	600	300	447,21
38	800	300	282,84
39	1000	300	200,00
40	1200	300	282,84
41	1400	300	447,21
42	1600	300	632,46
43	1800	300	824,62
44	2000	300	1019,80
45	0	400	1004,99
46	200	400	806,23
47	400	400	608,28
48	600	400	412,31
49	800	400	223,61
50	1000	400	100,00
51	1200	400	223,61
52	1400	400	412,31
53	1600	400	608,28
54	1800	400	806,23
55	2000	400	1004,99
56	0	500	1000,00
57	200	500	800,00
58	400	500	600,00

59	600	500	400,00
60	800	500	200,00
61	1000	500	0,00
62	1200	500	200,00
63	1400	500	400,00
64	1600	500	600,00
65	1800	500	800,00
66	2000	500	1000,00
67	0	600	1004,99
68	200	600	806,23
69	400	600	608,28
70	600	600	412,31
71	800	600	223,61
72	1000	600	100,00
73	1200	600	223,61
74	1400	600	412,31
75	1600	600	608,28
76	1800	600	806,23
77	2000	600	1004,99
78	0	700	1019,80
79	200	700	824,62
80	400	700	632,46
81	600	700	447,21
82	800	700	282,84
83	1000	700	200,00
84	1200	700	282,84
85	1400	700	447,21
86	1600	700	632,46
87	1800	700	824,62
88	2000	700	1019,80
89	0	800	1044,03
90	200	800	854,40
91	400	800	670,82
92	600	800	500,00
93	800	800	360,56
94	1000	800	300,00
95	1200	800	360,56
96	1400	800	500,00
97	1600	800	670,82

98	1800	800	854,40
99	2000	800	1044,03
100	0	900	1077,03
101	200	900	894,43
102	400	900	721,11
103	600	900	565,69
104	800	900	447,21
105	1000	900	400,00
106	1200	900	447,21
107	1400	900	565,69
108	1600	900	721,11
109	1800	900	894,43
110	2000	900	1077,03
111	0	1000	1118,03
112	200	1000	943,40
113	400	1000	781,02
114	600	1000	640,31
115	800	1000	538,52
116	1000	1000	500,00
117	1200	1000	538,52
118	1400	1000	640,31
119	1600	1000	781,02
120	1800	1000	943,40
121	2000	1000	1118,03

Tabela 33 – Distância por Nodo - Cenário 3

D.4 CENÁRIO 4

Id	X	Y	Distância
1	0	0	1118,03
2	100	0	1029,56
3	200	0	943,40
4	300	0	860,23
5	400	0	781,02
6	500	0	707,11
7	600	0	640,31
8	700	0	583,10

9	800	0	538,52
10	900	0	509,90
11	1000	0	500,00
12	1100	0	509,90
13	1200	0	538,52
14	1300	0	583,10
15	1400	0	640,31
16	1500	0	707,11
17	1600	0	781,02
18	1700	0	860,23
19	1800	0	943,40
20	1900	0	1029,56
21	2000	0	1118,03
22	0	100	1077,03
23	100	100	984,89
24	200	100	894,43
25	300	100	806,23
26	400	100	721,11
27	500	100	640,31
28	600	100	565,69
29	700	100	500,00
30	800	100	447,21
31	900	100	412,31
32	1000	100	400,00
33	1100	100	412,31
34	1200	100	447,21
35	1300	100	500,00
36	1400	100	565,69
37	1500	100	640,31
38	1600	100	721,11
39	1700	100	806,23
40	1800	100	894,43
41	1900	100	984,89
42	2000	100	1077,03
43	0	200	1044,03
44	100	200	948,68
45	200	200	854,40
46	300	200	761,58
47	400	200	670,82

48	500	200	583,10
49	600	200	500,00
50	700	200	424,26
51	800	200	360,56
52	900	200	316,23
53	1000	200	300,00
54	1100	200	316,23
55	1200	200	360,56
56	1300	200	424,26
57	1400	200	500,00
58	1500	200	583,10
59	1600	200	670,82
60	1700	200	761,58
61	1800	200	854,40
62	1900	200	948,68
63	2000	200	1044,03
64	0	300	1019,80
65	100	300	921,95
66	200	300	824,62
67	300	300	728,01
68	400	300	632,46
69	500	300	538,52
70	600	300	447,21
71	700	300	360,56
72	800	300	282,84
73	900	300	223,61
74	1000	300	200,00
75	1100	300	223,61
76	1200	300	282,84
77	1300	300	360,56
78	1400	300	447,21
79	1500	300	538,52
80	1600	300	632,46
81	1700	300	728,01
82	1800	300	824,62
83	1900	300	921,95
84	2000	300	1019,80
85	0	400	1004,99
86	100	400	905,54

87	200	400	806,23
88	300	400	707,11
89	400	400	608,28
90	500	400	509,90
91	600	400	412,31
92	700	400	316,23
93	800	400	223,61
94	900	400	141,42
95	1000	400	100,00
96	1100	400	141,42
97	1200	400	223,61
98	1300	400	316,23
99	1400	400	412,31
100	1500	400	509,90
101	1600	400	608,28
102	1700	400	707,11
103	1800	400	806,23
104	1900	400	905,54
105	2000	400	1004,99
106	0	500	1000,00
107	100	500	900,00
108	200	500	800,00
109	300	500	700,00
110	400	500	600,00
111	500	500	500,00
112	600	500	400,00
113	700	500	300,00
114	800	500	200,00
115	900	500	100,00
116	1000	500	0,00
117	1100	500	100,00
118	1200	500	200,00
119	1300	500	300,00
120	1400	500	400,00
121	1500	500	500,00
122	1600	500	600,00
123	1700	500	700,00
124	1800	500	800,00
125	1900	500	900,00

126	2000	500	1000,00
127	0	600	1004,99
128	100	600	905,54
129	200	600	806,23
130	300	600	707,11
131	400	600	608,28
132	500	600	509,90
133	600	600	412,31
134	700	600	316,23
135	800	600	223,61
136	900	600	141,42
137	1000	600	100,00
138	1100	600	141,42
139	1200	600	223,61
140	1300	600	316,23
141	1400	600	412,31
142	1500	600	509,90
143	1600	600	608,28
144	1700	600	707,11
145	1800	600	806,23
146	1900	600	905,54
147	2000	600	1004,99
148	0	700	1019,80
149	100	700	921,95
150	200	700	824,62
151	300	700	728,01
152	400	700	632,46
153	500	700	538,52
154	600	700	447,21
155	700	700	360,56
156	800	700	282,84
157	900	700	223,61
158	1000	700	200,00
159	1100	700	223,61
160	1200	700	282,84
161	1300	700	360,56
162	1400	700	447,21
163	1500	700	538,52
164	1600	700	632,46

165	1700	700	728,01
166	1800	700	824,62
167	1900	700	921,95
168	2000	700	1019,80
169	0	800	1044,03
170	100	800	948,68
171	200	800	854,40
172	300	800	761,58
173	400	800	670,82
174	500	800	583,10
175	600	800	500,00
176	700	800	424,26
177	800	800	360,56
178	900	800	316,23
179	1000	800	300,00
180	1100	800	316,23
181	1200	800	360,56
182	1300	800	424,26
183	1400	800	500,00
184	1500	800	583,10
185	1600	800	670,82
186	1700	800	761,58
187	1800	800	854,40
188	1900	800	948,68
189	2000	800	1044,03
190	0	900	1077,03
191	100	900	984,89
192	200	900	894,43
193	300	900	806,23
194	400	900	721,11
195	500	900	640,31
196	600	900	565,69
197	700	900	500,00
198	800	900	447,21
199	900	900	412,31
200	1000	900	400,00
201	1100	900	412,31
202	1200	900	447,21
203	1300	900	500,00

204	1400	900	565,69
205	1500	900	640,31
206	1600	900	721,11
207	1700	900	806,23
208	1800	900	894,43
209	1900	900	984,89
210	2000	900	1077,03
211	0	1000	1118,03
212	100	1000	1029,56
213	200	1000	943,40
214	300	1000	860,23
215	400	1000	781,02
216	500	1000	707,11
217	600	1000	640,31
218	700	1000	583,10
219	800	1000	538,52
220	900	1000	509,90
221	1000	1000	500,00
222	1100	1000	509,90
223	1200	1000	538,52
224	1300	1000	583,10
225	1400	1000	640,31
226	1500	1000	707,11
227	1600	1000	781,02
228	1700	1000	860,23
229	1800	1000	943,40
230	1900	1000	1029,56
231	2000	1000	1118,03

Tabela 34 – Distância por Nodo - Cenário 4