

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS

CARLOS VIRGILIO COSTA DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA OPEN SOURCE
DE RSSF DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÕES EM
INTERNET DAS COISAS**

CAMPINAS

2018

Carlos Virgilio Costa de Freitas

**DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA OPEN SOURCE
DE RSSF DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÕES EM
INTERNET DAS COISAS**

Dissertação de Mestrado apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora: Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota

Campinas

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira – CRB 8/8423
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3851 Freitas, Carlos Virgílio Costa de.
F866d Desenvolvimento de tecnologia open source de RSSF de baixo
Custo para aplicações em internet das coisas/ Carlos Virgílio Costa de
Freitas.- Campinas: PUC-Campinas, 2018.
115f.

Orientadora: Lia Toledo Moreira Mota.

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Incluem anexos e bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Internet das coisas. 3. Agroindústria. I. Mota, Lia Toledo Moreira. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de tecnologias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD - 22. ed. t621.3851

CARLOS VIRGÍLIO COSTA DE FREITAS

“DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA OPEN SOURCE DE RSSF DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÕES EM INTERNET DAS COISAS”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica.
Orientadora: Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota

Dissertação defendida e aprovada em 28 de janeiro de 2019 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Renata Rampim de Freitas Dias
HP RFID Center of Excellence/RFConsulting

Dedico este trabalho a minha mãe que me ajudou e sempre se fez presente como minha grande parceira.

Agradecimentos

Aos professores e professoras que dedicam as suas vidas para transmitir o conhecimento e nos ensinar a aprender através da pesquisa.

Um agradecimento todo especial à Professora Lia Toledo Moreira Mota que acreditou na minha capacidade de aprender, passando-me a confiança necessária, que de forma determinante resultou no sucesso de praticamente todos os objetivos levantados nesta pesquisa.

Aos funcionários técnicos dos laboratórios de Redes e o Label, especialmente o Sr. Eduardo Veiga que com sua capacidade de encontrar alternativas para as adversidades foi fundamental para que esse trabalho fosse concluído.

Aos colegas que foram muitos e contribuíram de alguma forma.

A PUC Campinas pela bolsa e infraestrutura.

A minha esposa e minha mãe que me deram condição para ser forte quando eu estava fraco, ter fé quando estava descrente. Elas são o bem mais precioso que eu levo no meu coração.

A Deus, sem Ele nada é possível.

Feliz é a pessoa que acha a sabedoria e que consegue compreender as coisas, pois isso é melhor do que a prata e tem mais valor do que o ouro.

Provérbios 3:13,14

Resumo

As redes de sensores sem fio (RSSF) apresentam-se como principal solução para situações em que somente a radiofrequência é capaz de alcançar a última milha da comunicação. Na prática, tecnologias de transmissão de RSSF necessitam ser classificadas de acordo com a aplicação. Os principais fatores que determinam a RSSF a ser escolhida são o alcance e o custo. Utilizar infraestruturas de RSSF pode contribuir para melhorar o monitoramento e controle dos processos de produção em soluções de internet das coisas (IoT), como no agronegócio, especificamente em sistemas de irrigação, por coletar dados através de sensores e atuadores que programados podem determinar um melhor aproveitamento de recursos naturais, reduzir a necessidade de intervenção humana e oferecer melhores opções nas tomadas de decisão. Este trabalho propõe-se em apresentar uma solução de IoT desde a concepção de *hardware* até o nível mais alto da aplicação com a interação do usuário. Como exemplo foi desenvolvido um sistema de controle e monitoramento para processos de produção em agronegócio que considera a possibilidade de atuação humana local e remota; configuração de temporizadores à partir de acesso remoto ao supervisor; e leitura e sensoriamento de umidade relativa do ar, temperatura, pressão barométrica e umidade do solo. A aplicação visa baixo custo para seu desenvolvimento. Todos os materiais utilizados na pesquisa foram adquiridos pela internet direto da China ou dos respectivos fabricantes em seus canais de venda ao consumidor. Para realizar os testes com os transceptores CC1101, o LoRa, o RFM69HCW e o nRF24L01 foi construída uma placa denominada de *Radio Board*, que oferece conexão rápida aos transceptores o que facilita a construção de RSSF. O LoRa destacou-se entre os demais transceptores devido a sua tecnologia de modulação com altíssimo poder de penetração tanto em áreas abertas em que prevalece a visada direta entre os rádios comunicantes, quanto em áreas urbanas com maior interferência ao meio.

Palavras-chave: RSSF, LoRa, IoT.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) are the primary solution for situations where only radio frequency is able to reach the last mile of connectivity. In practice, WSN transmission technologies need to be classified according to the application. The main factors that determine the WSN technology to be used are reach and cost. The use of WSN infrastructure can help improve the monitoring and control of production processes in Internet of things (IoT) solutions, like in agribusiness, specifically in irrigation systems, by collecting data through sensors and actuators that when programmed can optimize the use of natural resources, reduce the need for human intervention and offer better options for decision-making. This work proposes to present an IoT solution from the hardware conception to the highest level of application, including user interaction. As an example, a control and monitoring system was developed for agribusiness production processes that considers the possibility of local and remote human interaction; the configuration of timers via remote access to the supervisor; and reading and sensing of relative humidity, temperature, barometric pressure and soil moisture. The aim of this application is development at low cost. To that purpose, all the materials used in the research were acquired directly from China or from respective manufacturers through their direct sales channels to consumers on the Internet. To carry out the tests with the transceivers CC1101, LoRa, RFM69 and nRF24L01, a circuit board named Radio Board was built. The board offers fast connection to transceivers, facilitating building and testing WSNs. LoRa stood out among the transceivers tested due to its modulation technology with very high penetration power both in open areas where the direct view between the communicating radios prevails and in urban areas where there is greater interference from the surrounding buildings and structures.

Keywords: WSN, LoRa, IoT.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Rede de Sensores básica.	23
Figura 2 – Topologias para RSSF.	24
Figura 3 – RSSF topologia estrela.	25
Figura 4 – Topologia estrela adotada no trabalho.	26
Figura 5 – Definição de RSSF por Aplicação.	27
Figura 6 – Modulação FSK.	28
Figura 7 – Rádio BE900.	28
Figura 8 – Transceptor E07-915MS10.	29
Figura 9 – Disposição dos pinos RFM69HCW/RFM95.	30
Figura 10 – Relação Tempo no Ar Bytes SF.	32
Figura 11 – Estrutura <i>LoRaWan</i>	34
Figura 12 – Etapas de configuração do <i>Gateway</i>	37
Figura 13 – Domoticz Web e Celular.	38
Figura 14 – Diferentes apresentações do nRF24L01.	39
Figura 15 – Comparativo transceptores.	41
Figura 16 – DK99C, DK99M e <i>Radio Board</i>	43
Figura 17 – Disposição dos Pinos.	43
Figura 18 – Esquema elétrico <i>Radio Board</i>	48
Figura 19 – BME280.	49
Figura 20 – Sensor de umidade do solo.	50
Figura 21 – Relé de 2 canais.	50
Figura 22 – Relação Mestre Escravo SPI.	52
Figura 23 – Nó-sensor CC1101.	53
Figura 24 – Estrutura de camadas RADIUINO e RF 915MHz.	53
Figura 25 – Estrutura do pacote CC1101.	54
Figura 26 – Analisador de frequência RF Explorer.	55
Figura 27 – Radio Board com RFM69HCW	56
Figura 28 – Teste com o RFM69HCW na cidade de Registro (SP).	57
Figura 29 – Nó-sensor LoRa.	57
Figura 30 – Microcontroladores para medição de RSSI.	58
Figura 31 – RSSF pré-configurada para testes.	59
Figura 32 – Nós Sensores montados para teste.	59
Figura 33 – Áreas dos testes em ambiente fechado.	60
Figura 34 – Mapa do teste de alcance em Registro (SP).	61
Figura 35 – Raspberry PI Zero c/ <i>gateway</i> LoRa.	62
Figura 36 – Posicionamento nó-base e do nó-sensor nos testes com carro.	63
Figura 37 – Mapa para o teste de alcance.	64

Figura 38 – Terraço da cúpula do prédio CT, Bloco C2 da PUC-Campinas. . . .	65
Figura 39 – Antena localizada no carro.	65
Figura 40 – Exemplo básico de Sistema de Irrigação.	67
Figura 41 – Infraestrutura <i>gateway</i> / Nó-sensor.	68
Figura 42 – Componentes do Sistema de Irrigação.	70
Figura 43 – Desenho da placa de desenvolvimento DK-99C.	71
Figura 44 – Radio Board e adaptadores.	72
Figura 45 – Medição BE900.	73
Figura 46 – RSSI x Distância CDEByte CC1101.	74
Figura 47 – Medição CC1101 CDEByte RSSI x Pacotes recebidos.	74
Figura 48 – Comparação BE900 x CDEByte (Pacotes recebidos).	75
Figura 49 – Medição RFM69HCW.	76
Figura 50 – RSSI x Distância RFM69HCW.	76
Figura 51 – Comparação transceptores modulação FSK.	77
Figura 52 – Comparativo temperatura.	78
Figura 53 – Comparativo umidade.	79
Figura 54 – Comparativo da relação entre umidade e temperatura para os dois laboratórios.	79
Figura 55 – Teste urbano Registro-SP.	80
Figura 56 – Medição com o LoRa no centro urbano de Registro (SP).	81
Figura 57 – RSSI x Distância LoRa Registro (SP).	81
Figura 58 – Medição com o LoRa na Cúpula da PUC-Campinas.	82
Figura 59 – RSSI x Distância LoRa teste cúpula PUC-Campinas.	83
Figura 60 – Tela inicial do Domoticz para o Sistema de Irrigação.	84
Figura 61 – Programação por blocos.	84
Figura 62 – Logs do relé.	85
Figura 63 – Logs do Sensor de umidade do solo.	86
Figura 64 – Sensor BME280 da Bosch.	86

Lista de tabelas

Tabela 1 – LORA SPREADING FACTORS FOR 125KHz BANDWIDTH.. . . .	33
Tabela 2 – Classificação LoRa MAC adaptado.	35
Tabela 3 – Componentes Radio Board	44
Tabela 4 – Transceptor e Microcontrolador	47
Tabela 5 – Componentes Sistema de Irrigação	51
Tabela 6 – Componentes Sistema de Irrigação	69
Tabela 7 – Tabela comparativa transceptores LoRa, RFM69HCW e nRF24L01.	88
Tabela 8 – RSSI CDEByte CC1101	94
Tabela 9 – Medição RSSI BE900.	99
Tabela 10 – RSSI teste Cúpula	101
Tabela 11 – Medição centro urbano da cidade de Registro.	109
Tabela 12 – Medição RFM69HCW.	112

Lista de abreviaturas e siglas

BW	Largura de Banda (<i>Bandwidth</i>)
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DTR	Pino FTDI
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
FTDI	<i>Future Technology Devices International</i>
GB	<i>Gigabyte</i>
GFSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GND	<i>Ground (Terra)</i>
GPS	<i>Global Position System (USA)</i>
HTTP	<i>Hyper Text Transport Protocol</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IOT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISM	<i>Industrial, scientific and medical</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LTDA	Limitada
MAC	<i>Media Access Control</i>
MISO	<i>Master In Slave Out</i>
MOSI	<i>Master Out Slave In</i>
OID	<i>Object IDentifier</i>
OS	<i>Operating System</i>
PUC	Pontifícia Universidade Católica
RF	Radiofrequência

RFID	<i>Radio-Frequency IDentification</i> (identificador por radiofrequência)
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RX	Receptor
SCK	<i>Serial Clock</i>
SD	<i>Secure Digital Card</i>
SF	<i>Spread Factor</i>
SMA	Conector para antenas físicas
SMD	<i>Surface Mounting Device</i>
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SS	<i>Slave Select</i>
TX	Transmissor
USD	Dólares Americanos
VCC	Tensão em Corrente Contínua
WAN	<i>Wide Area Network</i>

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Contextualização do Problema	16
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Organização	18
2	Revisão da Literatura	19
2.1	Internet das Coisas	19
2.2	Agronegócio	19
2.3	Redes de Sensores sem Fio no Agronegócio	20
2.4	Análise comparativa de tecnologias de RSSF	21
3	Conceitos básicos	23
3.1	RSSF	23
3.2	Tecnologias de Comunicação sem Fio	26
3.3	CC1101	27
3.3.1	Modulação (FSK) do CC1101	27
3.3.2	CC1101 <i>hardware</i> BE900	28
3.3.3	CC1101 <i>hardware</i> CDEByte	28
3.4	RFM69 (FSK)	29
3.5	LoRa	30
3.5.1	Modulação (<i>LoRa modulation</i>)	31
3.5.2	<i>Lorawan</i>	33
3.5.3	Biblioteca Libelium	35
3.5.4	Biblioteca <i>Radiohead</i>	36
3.5.5	<i>MySensors</i>	37
3.5.6	<i>Domoticz</i>	38
3.6	nRF24L01	38
3.6.1	Modulação nRF24L01	40
3.7	Quadro comparativo dos transceptores	40
4	Materiais e Métodos	42
4.1	<i>Radio Board</i>	42
4.2	Principais sensores e componentes utilizados para construção do Sistema de Irrigação	49
4.3	SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)	51
4.4	Testes com o CC1101	52

4.5	Teste com o RFM69HCW	56
4.6	Testes com o LoRa	57
4.6.1	Testes em ambiente fechado	57
4.6.2	Testes em Área Urbana	60
4.6.3	Teste na cúpula do Prédio CT do Bloco C2 da PUC-Campinas . . .	63
4.7	Sistema de Irrigação	66
5	Resultados	71
5.1	Resultados da placa <i>Radio Board</i>	71
5.2	Resultados dos Testes com o CC1101	72
5.3	Resultados dos testes com o RFM69HCW	75
5.4	Resultados dos Testes com o LoRa	77
5.4.1	Resultado dos testes em ambiente fechado	77
5.4.2	Resultados dos testes urbanos na cidade de Registro (SP)	80
5.4.3	Resultados dos testes na cúpula da PUC-Campinas	82
5.5	Resultados do Sistema de Irrigação	83
6	Conclusão	87
	Referências	89
	ANEXOS	93
	ANEXO A – Medição de RSSI CDEByte CC1101	94
	ANEXO B – Medição RSSI BE900	99
	ANEXO C – Medição RSSI LoRa Cúpula PUC-Campinas	101
	ANEXO D – Medição centro urbano da cidade de Registro . . .	109
	ANEXO E – Medição RFM69HCW	112

1 Introdução

1.1 Contextualização do Problema

A utilização de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) vem crescendo de forma muito rápida nos últimos anos. A relação entre RSSF e dispositivos IoT (*Internet of Things* - Internet das Coisas) é diretamente proporcional, já que as RSSF servem como base de infraestrutura para construção de malhas de comunicação para IoT. De acordo com (AB, 2016; RIVERA; MEULEN, 2013), em 2020, existirão mais de 26 bilhões de dispositivos de IoT. Segundo esses mesmos estudos, estima-se que a movimentação de recursos com dispositivos e infraestrutura de IoT chegará a valores de 1,9 trilhões de dólares. Todas essas previsões colocam as RSSF em um cenário de evidência, devido a IoT utilizar RSSF como solução, integrando diferentes tecnologias que colaboram para o funcionamento dos dispositivos IoT.

A expectativa de um grande número de dispositivos de IoT, nas mais diversas áreas (Saúde, Agronegócio, Indústria, Cidades Inteligentes, Transporte, Logística entre outros) (ASÍN; GASCÓN, 2017) e seu crescimento exponencial trazem o desafio de construção de uma nova infraestrutura de RSSF para atender a esta expectativa.

Topologias, tecnologias e grande volume de dados sugerem que o cenário real para a Internet das Coisas constrói-se através do conjunto de variadas tecnologias customizadas de acordo com a necessidade da aplicação. No campo da radiofrequência (RF), diferentes parâmetros como alcance, consumo de bateria, taxas de transmissão e velocidade de interação entre dispositivos caracterizam diferentes tecnologias de curto, médio e longo alcance, podendo chegar a cobrir até 10km ou mais, dependendo de disposição das antenas da rede.

O surgimento do transceptor LoRa (*Long Range* - Longo Alcance) oferece novas possibilidades quanto ao alcance (longo alcance) e consumo de bateria (baixo consumo), o que torna favorável a utilização de RSSF para aplicações no Agronegócio com o uso desse transceptor (CARRILLO; SEKI, 2017).

Outro fator favorável ao uso do LoRa é o fato de o Brasil ser um país continental, um lugar onde a utilização de tecnologia de longo alcance de cobertura e baixo custo se faz necessária.

A IoT, o Agronegócio e as RSSF caminham juntos para oferecer soluções que antes seriam impossíveis. Monitoramento e automação de irrigação, controle individual de animais, controle de maquinário e prevenção a desastres ambientais, são alguns objetos que graças à redução significativa nos custos dos sensores, transceptores, dispositivos de GPS, entre outros, tornam o cenário propício à criação de novas aplicações nessas áreas (LIBELIUM, 2016; PHAM; RAHIM; COUSIN, 2016).

Um novo padrão de qualidade no sistema produtivo do Agronegócio, como um todo, depende de uma infraestrutura que possa atender às especificidades do setor e reduzir perdas. As RSSF vêm como uma alternativa de conectividade entre nós sensores e *gateways* (nó-base) que levarão as informações coletadas para auxiliar e atender à tomada de decisão em qualquer lugar, quando houver acesso à Internet disponível ou por demanda, além de melhorar o acesso a dados que facilitem a tomada de decisão e os resultados do processo produtivo a partir da adoção da RSSF/IoT nas áreas rurais.

Para isso, neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de tecnologia open source de RSSF de baixo custo para aplicações em Internet das Coisas, mais especificamente com radiofrequência em 915MHz e 2.4GHz, utilizando uma relacionada ao Agronegócio (irrigação) como estudo de caso. As soluções propostas devem ser de fácil acesso, com fornecedores de componentes globais para sua construção, com *hardware* aberto (*open source*), que possam ser usadas como referência para projetos futuros.

Apesar de os preços dos dispositivos estarem em queda no exterior, no Brasil, custos mais elevados de dispositivos de *hardware* para RSSF trazem o desafio de construir novos *hardwares*, mais simples e acessíveis, capazes de atender às necessidades da pesquisa (aplicações no Agronegócio). Esses dispositivos também oferecem ao meio acadêmico possibilidades de replicação e expansão de funcionalidades em trabalhos futuros nessa ou em outras áreas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de tecnologia *open source* de RSSF de baixo custo para aplicações em Internet das Coisas, oferecendo possibilidades para longas distâncias para atender a diversidade geográfica do Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

Desenvolvimento e testes práticos com transceptores de RSSF de baixo custo e *open source* para aplicações em IoT.

Analisar as tecnologias:

- Transceptor LoRa SX1276;
- Transceptor CC1101;

- Transceptor nRF24L01;
- Transceptor RFM69HCW.

Comparar as tecnologias de RSSF com base nos parâmetros:

- Alcance;
- Custo.

Aplicar a RSSF em um Sistema Básico de Irrigação, capaz de atender tanto à demanda de baixo custo como também a aplicações maiores.

1.3 Organização

Este trabalho foi organizado como segue.

O Capítulo 2 apresenta a revisão de literatura dividida em Internet das Coisas, Agronegócio, Redes de Sensores sem Fio no Agronegócio e análise comparativa de tecnologias de RSSF.

O Capítulo 3 trata de conceitos básicos de RSSF, Tecnologias de Comunicação sem Fio, Transceptores, Modulação e Componentes referentes aos temas abordados nessa Dissertação.

O Capítulo 4 descreve, em detalhes, a metodologia utilizada para a construção, análise das tecnologias de RSSF e para a aplicação no Agronegócio com o Sistema de Irrigação.

O Capítulo 5 apresenta os resultados referentes à comparação das tecnologias de RSSF e da aplicação ao Agronegócio.

Finalmente, o Capítulo 6 aborda as principais conclusões sobre o trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

2.1 Internet das Coisas

A Internet, desde os anos 90, vem apresentando aumento no número de dispositivos a ela conectados o que resultou no surgimento do novo modelo de endereçamento de 128 bits chamado IPv6. No princípio, equipamentos de redes, servidores e computadores eram as principais partes interligadas através da rede. Segundo (KENG; KOO, 2014), o processo natural de evolução da comunicação através dessa infraestrutura é chamada de Internet das Coisas (IoT). A IoT insere novos objetos do nosso cotidiano a essa malha de comunicação (Internet). Isso é possível devido ao surgimento de tecnologias de comunicação (microcontroladores e transceptores) que oferecem capacidade de conectividade a esses objetos.

Como forma de atender a toda essa conectividade (ZIEGLER, 2017) apresenta o protocolo IPv6 como principal candidato a oferecer endereçamento a essa grande quantidade de dispositivos que estarão conectados. Essa evolução natural da Internet através da IoT, com a introdução de um grande número de novos dispositivos (objetos), faz necessário que novos protocolos como o IPv6 venham a ser utilizados.

Em trabalho com a comunidade rural na África, (PHAM; RAHIM; COUSIN, 2016) apresenta a utilização de microcontroladores e transceptores de radiofrequência, especificamente o LoRa com o objetivo de construir uma infraestrutura de RSSF para IoT com baixo custo e *open source*, para aplicação nas áreas rurais, especificamente em irrigação, controle de animais, cultivo de peixes, armazenagem e logística, agricultura e gerenciamento da água.

A idéia de IoT apresentada por (SATHISHKUMAR, 2016) é que as pessoas estejam conectadas em qualquer lugar a qualquer hora fazendo uso dos diversos caminhos de comunicação existentes e da infraestrutura futura. A IoT vem com o principal objetivo de conectar objetos a pessoas, objetos a objetos e trazer um conjunto de serviços associados a esses novos padrões de conectividade, oferecendo um mundo melhor com os objetos, conhecendo e atendendo nossos gostos para oferecer uma melhor experiência com os mesmos.

2.2 Agronegócio

O Agronegócio abrange diferentes áreas e segundo (PENA, 2018) é:

o termo usado como referência ao contexto socioespacial da produção agropecuária, incluída toda a cadeia de produção como serviços, técnicas e equipamentos a ela relacionados direta e indiretamente.

A importância do Agronegócio se reflete em números. Em dados levantados pela referência (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2017), as exportações mundiais do Agronegócio chegaram em 2014, ao maior índice da história com US\$ 1,15 trilhões em transações.

O Brasil tem hoje cerca de 209 milhões de habitantes, em seus 8,5 milhões de quilômetros quadrados (IBGE, 2016; ZAMBALDE et al., 2011). É o quinto país em extensão territorial do planeta, ocupa quase metade da América do Sul, fazendo fronteira com todos os países, à exceção do Chile e Equador. Todos esses fatores colocam o Brasil em uma posição de protagonista na produção de bens e serviços do Agronegócio no cenário de exportação mundial. Ainda em 2014 mais de 36% das exportações brasileiras vieram do Agronegócio.

O documento apresentado pela empresa Libelium da Espanha (LIBELIUM, 2016) relata que o setor de Agronegócio passa por uma revolução, com avanços em nutrição, genética, informática, imagem de satélite, meteorologia, entre outras. As fazendas utilizam cada vez mais estufas controladas e monitoradas por sensores de temperatura, umidade do ar e do solo, com sistemas de irrigação automatizados em função dos parâmetros coletados e da cultura empregada.

Os constantes investimentos em tecnologia, a fim de aprimorar o processo produtivo do Agronegócio, abrem espaço para as RSSF como uma oferta de solução para problemas nos setores primário, onde acontece o processo de produção da matéria prima, no secundário onde ocorre o beneficiamento da matéria prima e no terciário com a distribuição, transporte e comércio dos produtos.

2.3 Redes de Sensores sem Fio no Agronegócio

Os conceitos de RSSF para monitoramento, controle e automação em Agronegócio estão cada vez mais em evidência, tanto na agricultura quanto na reprodução na pecuária.

As RSSF para Agronegócio envolvem diversas partes do processo, desde pequenos produtores a grandes proprietários de terras com produção de milhares de toneladas. O acesso à tecnologia passa a ser de extrema importância. Com sensores cada vez mais baratos, a Internet das Coisas acontece de forma acelerada. A ideia é que todos os envolvidos na cadeia do negócio sejam beneficiados.

Hoje já existem maquinários fazendo colheitas inteiras sem a necessidade de um operador humano, a armazenagem também passa a ter controle pelo uso de sensores 24 horas por dia, o produto possui total controle de todas as etapas de logística e transporte do centro de beneficiamento até a mesa do consumidor (LIBELIUM, 2016).

Junto ao conceito de Nuvem das Coisas e Agricultura Inteligente o artigo (ROO-

PAEI et al.,) apresenta como a irrigação desordenada e o uso errado da água gera uma agricultura ineficiente. O autor apresenta como solução a coleta de dados através de sensores para construção de mapas de calor num sistema capaz de armazenar, analisar, processar e gerenciar os dados na Nuvem das Coisas de forma inteligente.

Em (KIM et al., 2017), é apresentado um projeto e implementação de um Sistema de Irrigação Inteligente baseado no LoRa transceptor, a partir da rede *LoRaWan*. Com uma estrutura completa com *Gateway* que utiliza o transceptor multicanais LoRa SX1301 e Nós Sensores atuadores através de válvulas solenoides individuais com LoRa SX1276.

Em (USMONOV; GREGORETTI, 2017), é apresentado um sistema completo de Irrigação com menor custo de implantação, alternativo ao *LoRaWan*, funcionando na frequência de 433MHz. A abordagem ocorre tanto no nível de *hardware* quanto ao nível de *software*.

No estudo proposto por (HIRATA; TERADA; TOYOTA, 2017), o transceptor LoRa é usado para oferecer uma rede de comunicação que prioriza a economia de energia em campos de plantação de arroz no Japão. Como resultado obteve-se um consumo diário de 75.36 mW/Dia o que teoricamente gera 995 dias de operação contínua e confirma o objetivo de medir o baixo consumo do transceptor LoRa.

2.4 Análise comparativa de tecnologias de RSSF

As principais referências bibliográficas desta dissertação vêm de dois artigos do professor Pham titular da Universidade de Pau na França. O primeiro (PHAM; RAHIM; COUSIN, 2016) traz o conceito de IoT para áreas rurais na África, utiliza o LoRa como transceptor e *Arduino* e *Raspberry* como base de desenvolvimento na parte de microcontroladores e processador respectivamente. Baixo custo, longo alcance e baixo consumo de bateria em transmissões com baixas taxas de dados são alguns dos objetivos do projeto. Em sequência, o professor Pham, em (FERRERO; LIZZI; LPWAN, 2017), aborda uma opção de antena de PCB (*Printed Circuit Board* - Placa de Circuito Impresso) de baixo custo, com excelentes resultados em testes de radiação em câmara anecoica.

Na referência (FACCHINI et al., 2017), pesquisadores da universidade de Módena, na Itália, apresentam um importante comparativo entre redes LoRa na faixa de frequência 868MHz e WM-Bus na frequência 169 MHz . A rede proposta tem referências de comparação em situações urbanas e suburbanas e mostra que a integração de diferentes *hardwares* com transceptores LoRa é viável.

No artigo (LAVRIC; POPA, 2017), a Internet das Coisas usa o LoRa com o conceito de LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*) que é abordado de forma

clara e objetiva. A *LoRaWan* é trazida como opção de camada MAC (Controle de Acesso ao Meio). Novas idéias são apresentadas com enfoque em conectividade, eficiência energética, segurança, complexidades de programação e velocidade para desenvolvimento de soluções.

Nas referências (VARSIER; SCHWOERER, 2017), são encontrados fundamentos sobre a complexidade da camada MAC do *LoRaWan* e alguns limites que rodeiam essa rede de dados de longa distância. No artigo (ADELANTADO et al., 2017), são tratados assuntos como limitações de tamanho da rede e principais casos de uso como monitoramento, medição, aplicações de *Smart City* (Cidades Inteligentes), logística e transporte.

Todas as características analisadas nas referências servem como justificativa para o uso do transceptor LoRa na Agricultura, especificamente em sistemas de irrigação.

Nesse trabalho são apresentados quatro diferentes transceptores com análise e comparação de suas principais características, visando a aplicação ao Agronegócio.

3 Conceitos básicos

3.1 RSSF

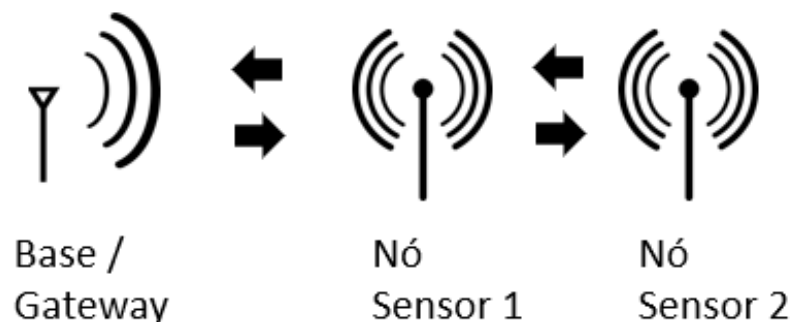
Uma rede de sensores sem fio é formada por um ou mais nós sensores que medem um dado e comunicam essa informação entre si, ou a um nó-base/*gateway* (BHATTACHARYA; VAUGHAN, 2017). Na referência (KARL; WILLIG, 2005) os autores definem:

As RSSF consistem em Nós individuais capazes de interagir com o ambiente, detectando ou controlando parâmetros físicos; esses nós têm que colaborar para cumprir suas tarefas, pois, normalmente, um único nó é incapaz de fazê-lo; e eles usam comunicação sem fio para permitir essa colaboração. Em essência, os nós sem essa rede contêm pelo menos algumas funcionalidades de computação, comunicação sem fio e sensoriamento ou controle. Apesar do fato de que essas redes também costumam incluir atuadores, o termo rede de sensores sem fio se tornou o nome comumente aceito. Às vezes, outros nomes como “redes de sensores e atuadores sem fio” também são encontrados (KARL; WILLIG, 2005).

Essas redes apresentam várias aplicações em diferentes áreas do conhecimento como na saúde, na indústria, em aplicações ambientais para monitoramento de dados que englobam necessidades comuns diárias da população nas áreas rurais e urbanas, entre outras.

A figura 1 ilustra a topologia mais simples de uma rede de sensores sem fio com possibilidade de um salto entre o nó-base e o nó-sensor 2 usando o nó-sensor 1 como intermediário. A RSSF pode ser considerada tanto na comunicação direta entre nó-base e nó-sensor, quanto entre nós-sensores no caso nós-sensores 1 e 2.

Figura 1 – Rede de Sensores básica.



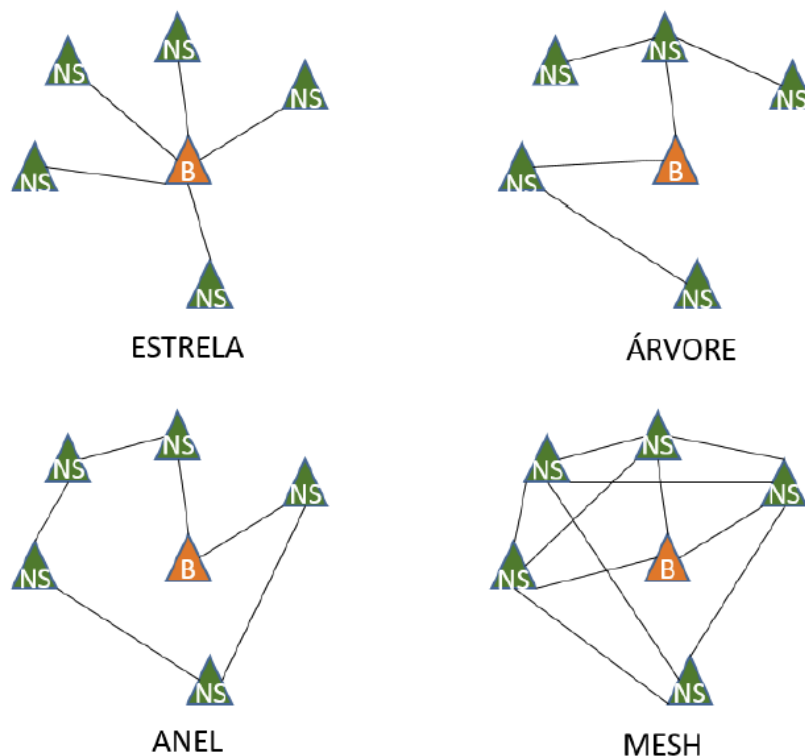
Fonte: Autor.

Com relação à topologia das RSSF, elas podem ser (ABD-EL-BARR; YOUSSEF; AL-OTAIBI, 2005; PEREIRA, 2016):

- Estrela: onde a nó-base/*gateway* fica em uma posição central e todos os Nós Sensores ficam diretamente conectados;
- Anel: o nó-base/*gateway* tem conexão com o próximo nó à direita e à esquerda. A regra vale para os Nós Sensores que formam uma estrutura de anel.
- Árvore: nessa topologia o nó-base cria uma estrutura de hierarquia e forma ramificações onde Nós Sensores se comunicam com seu referencial hierárquico até chegar ao nó-base;
- *Mesh*: a mais complexa de se configurar. Os nós-sensores se comunicam entre si e utilizam sua capacidade de processamento para construir os melhores caminhos para estabelecer comunicação.

A figura 2 apresenta os nós-sensores como NS, na cor verde, e o nó-base como B, na cor Laranja.

Figura 2 – Topologias para RSSF.

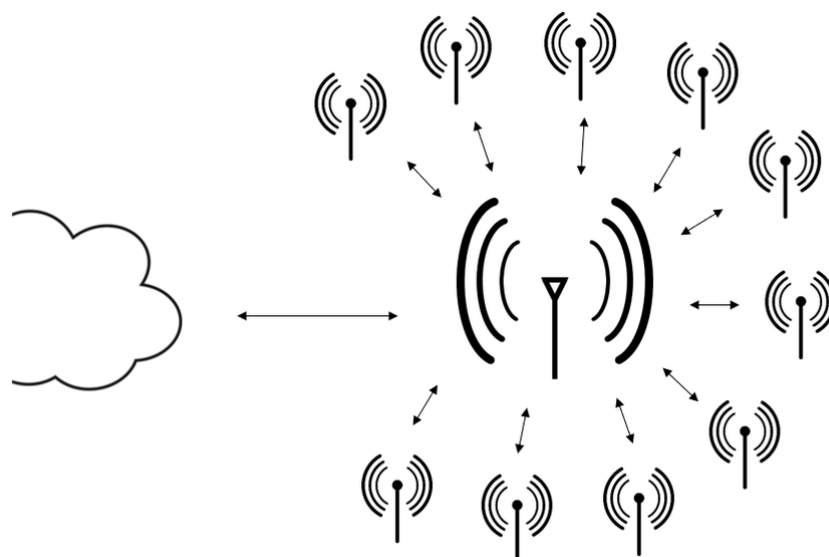


Fonte: PEREIRA, 2016.

Atualmente, devido ao longo alcance dos transmissores disponíveis e à alta conectividade com a Internet, a topologia estrela passa ser a preferencial e a escolhida

para ilustrar os testes deste trabalho. A figura 3 ilustra essa topologia onde a antena central representa a nó-base/*gateway* e as antenas menores os nós-sensores.

Figura 3 – RSSF topologia estrela.

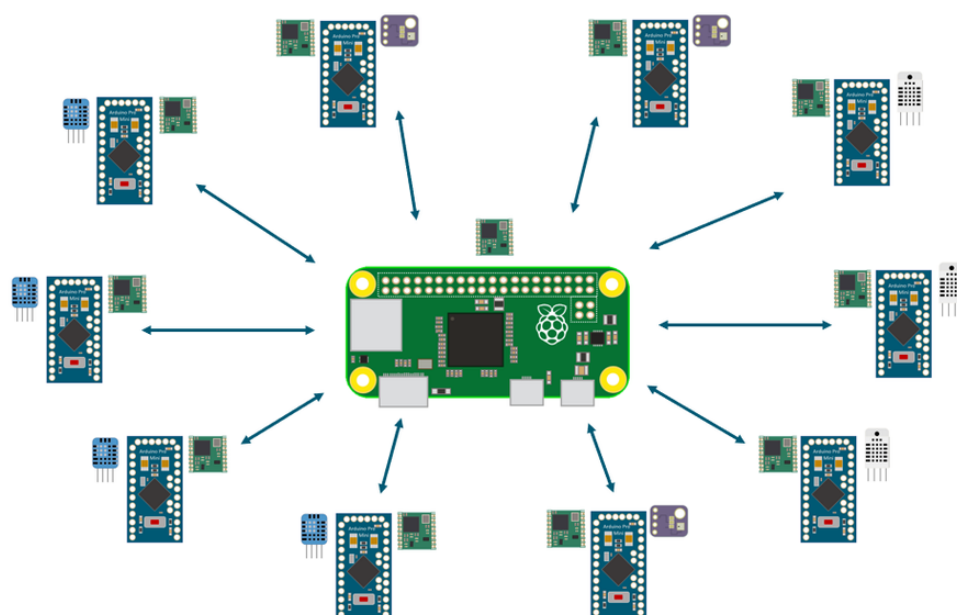


Fonte: Autor.

Várias redes em Estrela podem ser utilizadas de modo a cobrir áreas maiores. Esse paradigma tem se mostrado preferencial por fabricantes de novas tecnologias de RSSF. Desde o surgimento do transceptor LoRa, que oferece alcance para longas distâncias, o conceito de topologia Estrela foi adotado como padrão na rede *LoRaWan* pela *Lora Alliance*, por apresentar o melhor desempenho (quando comparada a outras topologias) e por eliminar saltos entre o envio e recebimento de pacotes (LORA ALLIANCE,). Essa topologia é uma tendência, devido ao alcance cada vez maior dos novos transceptores, ao custo cada vez menor de *hardwares* microcontroladores e processadores e à facilidade de implementação.

A figura 4 ilustra a situação real de uma RSSF com topologia estrela com o *Raspberry PI Zero*, que é uma placa de desenvolvimento com Linux embarcado e suporte a aplicações que exijam maior capacidade de processamento. No centro da formação temos o *Raspberry PI Zero* como *gateway* e os microcontroladores que representam cada nó-sensor.

Figura 4 – Topologia estrela adotada no trabalho.



Fonte: Autor.

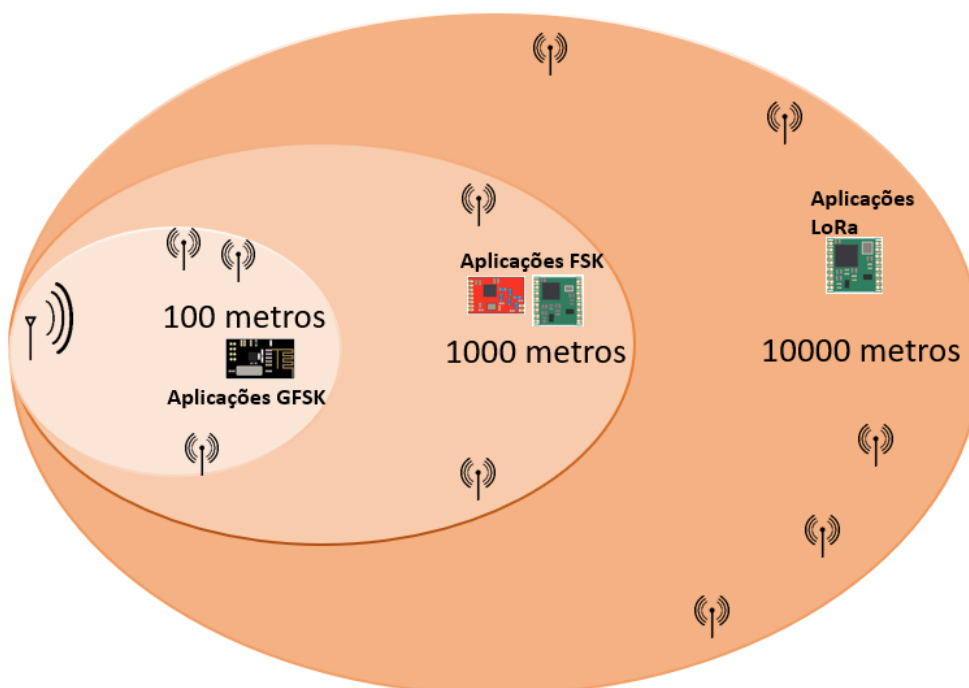
3.2 Tecnologias de Comunicação sem Fio

Outro conceito muito importante para compreensão deste trabalho é que uma RSSF pode ter diferentes alcances e diferentes taxas de transmissão, dependendo da tecnologia empregada para a implementação dessas redes. Assim, fica claro que o que define a escolha de uma tecnologia RSSF é a aplicação. Em alguns casos, a complexidade do projeto é tão grande que mais de uma tecnologia é adotada como solução.

Nas aplicações voltadas à Internet das Coisas, a escolha da tecnologia de RSSF deve considerar as seguintes variáveis: alcance, taxa de transmissão e características específicas de cada aplicação. Outros fatores como custo também podem ser decisivos entre a escolha de uma tecnologia ou outra. A variedade de opções de transceptores que utilizam diferentes tecnologias beneficia a todos, visto que gera concorrência, queda nos preços e acelera o avanço tecnológico.

Neste trabalho, as RSSF serão classificadas como de curto (até 100m), médio (até 1000m) e longo alcance (até 10000m). A figura 5 ilustra essa classificação.

Figura 5 – Definição de RSSF por Aplicação.



Fonte: Autor.

3.3 CC1101

O CC1101 é um transceptor de baixo custo com potência de transmissão de 10dBm, que opera abaixo de 1GHz com foco em aplicações sem fio de baixo consumo de energia, atuando nas faixas de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) em 915 MHz. O transceptor é integrado a um *modem* que pode ser altamente configurável, o que amplia as possibilidades de uso e configurações de inicialização através dos registros hexadecimais (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2017).

O transceptor possui diversos formatos de modulação, sendo o principal deles o FSK (*Frequency Shift Keying*) e variações e, segundo a especificação técnica do fabricante o *modem* pode alcançar taxas de troca de dados de até 600Kbps, possui extensivo suporte de *hardware* para manuseio de pacotes, armazenamento de dados, avaliação de canais limpos e indicação de qualidade de *link*.

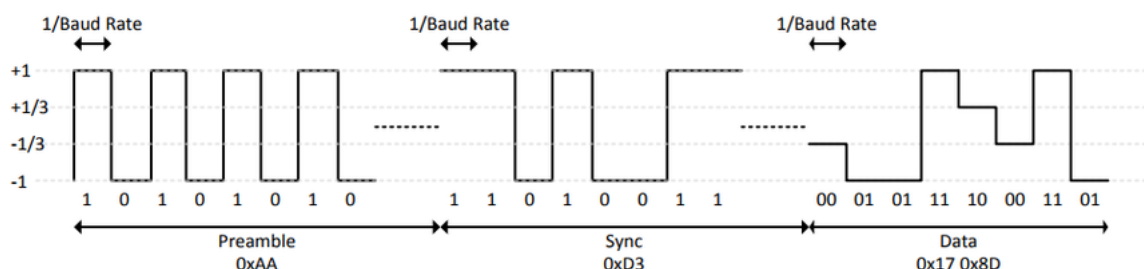
Outra característica é oferecer o controle através de interface SPI e ter à disposição e um extensor de alcance de sinal que multiplica a potência de saída.

3.3.1 Modulação (FSK) do CC1101

Na modulação FSK, o sinal transmitido durante a comunicação obedece sempre a mesma amplitude, e tem como princípio a variação da frequência da portadora (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2017), conforme figura 6.

Neste trabalho, nos testes feitos com o transceptor CC1101 utilizou-se a modulação 2FSK. O transceptor CC1101 também oferece a possibilidade de utilizar modulação de amplitude e fase. As configurações de modulação podem ser modificadas através da opção MDMCFG2.MOD_FORMAT no registro do transceptor.

Figura 6 – Modulação FSK.

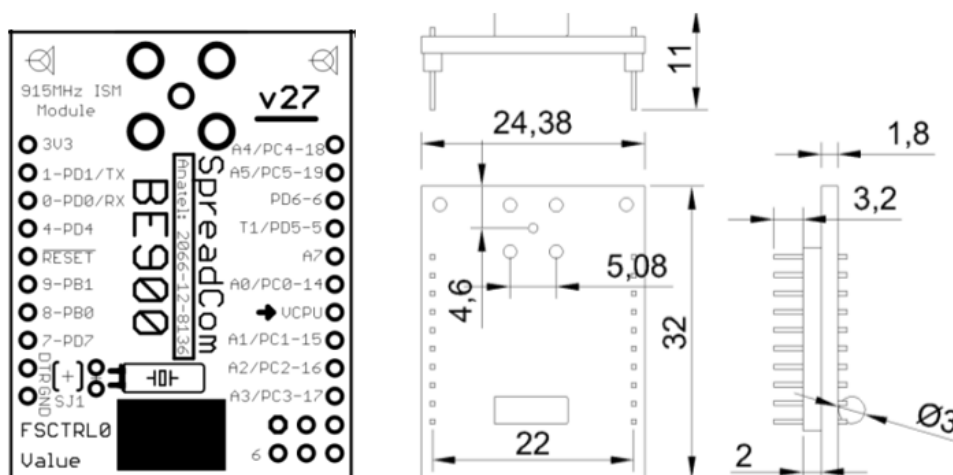


Fonte: CC1101 Datasheet.

3.3.2 CC1101 hardware BE900

Nos testes realizados neste trabalho, foram utilizados o BE900 (RADIOIT ELETRÔNICA LTDA, 2012) que possui microcontrolador ATmega328p-mu integrado ao transceptor CC1101 na mesma placa, conforme figura 7.

Figura 7 – Rádio BE900.



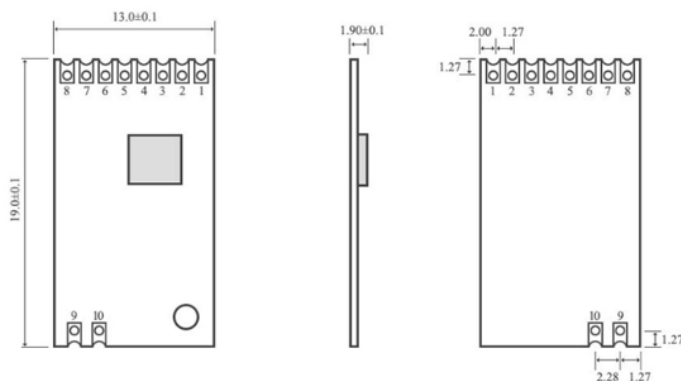
Fonte: BE900 Datasheet.

3.3.3 CC1101 hardware CDEByte

Como proposta de hardware de baixo custo foi feita pesquisa de transceptores que utilizassem o CC1101 e fossem capazes de se comunicar de forma transparente com o BE900. A opção da CDEByte foi a que apresentou a maior compatibilidade de

frequência e protocolo de comunicação. A figura 8 apresenta o modelo E07-915MS10 (CHENGDU EBYTE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD, 2017).

Figura 8 – Transceptor E07-915MS10.



Pin No.	Pin item
1	VCC
2	GDO0
3	CSN
4	SCK
5	MOSI
6	MISO/GDO1
7	GDO2
8	GND
9	ANT
10	GND

Fonte: E07-915MS10 Datasheet.

Por ser um transceptor que opera como escravo de um microcontrolador, neste trabalho foi escolhido o microcontrolador ATmega328P.

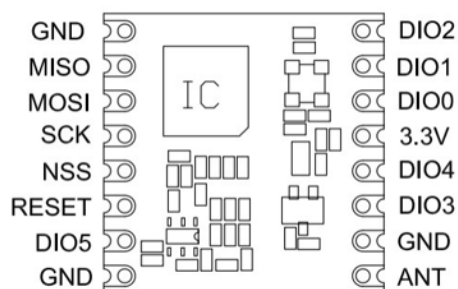
3.4 RFM69 (FSK)

O transceptor RFM69, especificamente o HCW (HOPE MICROELECTRONICS CO.,LTD, 2018), utilizado nesse trabalho, possui de fábrica a potência de transmissão de 20dBm a um custo menor que o CC1101. O fabricante é o mesmo do transceptor LoRa/Semtech licenciado pela HopeRF para construção e distribuição mundialmente.

O RFM69HCW apresenta um alto desempenho na faixa de frequência ISM em 915MHz nas aplicações de radiofrequência, com comunicação *half-duplex* bidirecional, trabalha com modulação FSK, GFSK, MSK, GMSK e OOK. A FSK é a mais utilizada e foi escolhida para os testes deste trabalho.

Na figura 9, tem-se a disposição dos pinos disponíveis para conexão do transceptor ao microcontrolador. Destaca-se que a interface de controle ocorre pelo método SPI cujos principais pinos são: o MISO, o MOSI, o NSS e o SCK. Na alimentação temos o VCC de 3.3V e GND distribuído em 3 pontos da placa, fechando a configuração mínima com o RESET e o DIO0 que representa o pino de interrupção.

Figura 9 – Disposição dos pinos RFM69HCW/RFM95.



Number	Name	Type	Description
1	GND	-	Ground
2	MISO	I	SPI Data output
3	MOSI	O	SPI Data input
4	SCK	I	SPI Clock input
5	NSS	I	SPI Chip select input
6	RESET	I/O	Reset trigger input
7	DIO5	I/O	Digital I/O, software configured
8	GND	-	Ground
9	ANT	-	RF signal output/input.
10	GND	-	Ground
11	DIO3	I/O	Digital I/O, software configured
12	DIO4	I/O	Digital I/O, software configured
13	3.3V	-	Supply voltage
14	DIO0	I/O	Digital I/O, software configured
15	DIO1	I/O	Digital I/O, software configured
16	DIO2	I/O	Digital I/O, software configured

Fonte: RFM69HCW Datasheet.

Outra informação importantíssima é que a disposição dos pinos do RFM69HCW e do LoRa RFM95W é a mesma, ou seja, em uma placa de circuito construída para receber um desses transceptores é automaticamente pino-compatível com ambos. Neste trabalho, por exemplo, construiu-se um adaptador para o *Raspberry PI* e um outro para *Radio Board* e ambos aceitam tanto o RFM69HCW quanto o RFM95W.

3.5 LoRa

Ao final de 2015, o LoRa surgiu no mercado e três aspectos o identificam: 1. LoRa transceptor; 2. *Lora modulation* e 3. *LoRaWan*. Essas três definições, apesar de estarem ligadas direta ou indiretamente, possuem conceitos diferentes.

- 1) LoRa transceptor: está diretamente relacionado ao *hardware* transceptor onde transmissão e recepção acontecem, o fabricante é a SEMTECH e os modelos são especificados em SX1272, SX1276 e SX1278. Outro transceptor específico que se comunica por *LoRa modulation* é o SX1301, que por sua vez é utilizado nos *gateways multichannel*.
- 2) *LoRa modulation*: é uma forma de modulação SS (*Spread Spectrum*) única no mercado, é proprietária da SEMTECH, e oferece inúmeras possibilidades de configuração.
- 3) *LoRaWan*: é uma rede mundial que tem como pré-requisito o uso do transceptor LoRa. É formada por um movimento de padronização iniciado por diversas empresas de tecnologia por meio da *LoRa Alliance*. Esses padrões atuam principalmente na camada MAC e em níveis mais acima em que oferece funcionalidades de segurança.

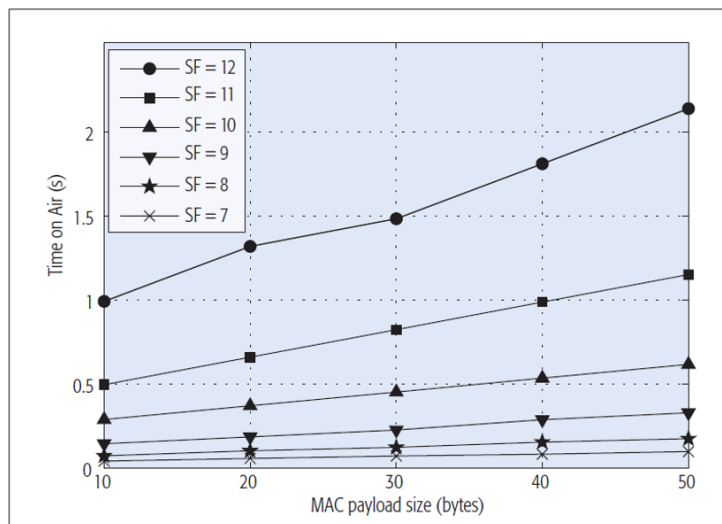
3.5.1 Modulação (*LoRa modulation*)

O *LoRa modulation* é uma forma de modulação SS, que inova pelo uso de um sinal de *chirp* que varia com a frequência. Esse método reduz a complexidade do receptor, pois, o deslocamento em tempo e frequência do remetente ao receptor são semelhantes (LAVRIC; POPA, 2017; SEMTECH, 2015).

O LoRa transceptor opera no Brasil na faixa ISM (*Industrial Scientific and Medical*) a 915MHz.

O LoRa apresenta uma modulação de CSS (*Chirp Spread Spectrum*), com diferentes fatores de propagação (*Spreading Factors - SF*) de SF7 para SF12 (LAVRIC; POPA, 2017), conforme figura 10. Assim, cria uma resistência a interferências e ao *fading multipath*, que são as variações que uma trajetória de sinal pode sofrer de forma desigual através de multicaminhos.

Figura 10 – Relação Tempo no Ar Bytes SF.



Fonte: ADELANTADO, F. et al., 2017.

A taxa de modulação e a potência de transmissão podem ser ajustadas por nó-sensor, através de um *chirp* que codifica um símbolo de informação. Quando aumenta o SF, o tamanho do pacote será reduzido, o que aumenta o poder sobre o canal e a distância de transmissão.

Ao observar-se a Tabela 1, verificam-se os fatores de propagação do LoRa para 125 kHz de largura de banda. Como pode ser constatado, se o fator de propagação aumentar a taxa de bits diminui, o parâmetro *time-on-air* aumenta e o limite SNR (*Signal to Noise Ratio*) melhora significativamente, assim como o número de símbolos codificados diminuem.

Tabela 1 – LORA SPREADING FACTORS FOR 125KHz BANDWIDTH.

SpreadingFactor	Symbols / second	SNR limit	Time-on-airfor10 bytepacket	Bitrate
7	976	-7.5	56	5469
8	488	-10	103	3125
9	244	-12.5	205	1758
10	122	-15	371	977
11	61	-17.5	741	537
12	30	-20	1483	293

Fonte: Lavric, A., & Popa, V. (2017)

O maior benefício do LoRa é a capacidade de integração de um grande número de nós. É possível a comunicação simultânea em 8 canais diferentes, utilizando o transceptor modelo SX1301, geralmente aplicado aos *gateways*. Pode-se ter fatores de propagação diferentes no mesmo sinal de canal modulado.

Quanto mais próximo o nó estiver do *gateway*, maior será sua taxa de comunicação de dados, devido ao Mecanismo ADR integrado (*Adaptive Data Rate* - taxa de dados adaptativo). Esse mecanismo ajusta o SF gradual e individualmente por nó, com objetivo de aumentar a taxa de transmissão de dados.

3.5.2 Lorawan

Devido ao LoRa transceptor ter grande capacidade de alcance na faixa de quilômetros, a topologia estrela é a única adotada na *LoRaWan*. Na infraestrutura *LoRaWan* tem-se um *gateway* no papel de centro da estrela que conecta diversos nós sensores ao *backbone* da rede. Os *gateways*, geralmente, são os dispositivos com

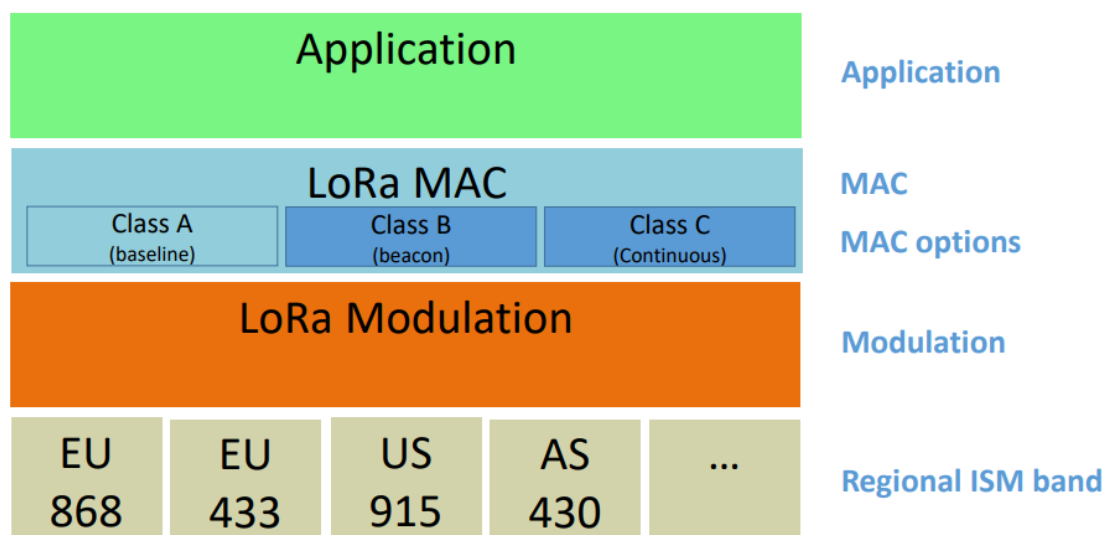
maior poder computacional e de rádio com possibilidade de multicanais para recepção simultânea de transmissões.

Uma vantagem significativa da topologia em estrela ao usar o LoRa é de não haver a necessidade de fazer roteamento dos dados, sendo que vários saltos aumentam a possibilidade de erros na transmissão e exigem mais energia durante o processo. Na construção da rede WAN, tem-se, por definição “n” estrelas com vários *gateways* que se comunicam com os servidores *LoRaWan*.

Para atender a diferentes aplicações que possuem diferentes requisitos de *downlink* que se comunicam com os servidores *LoRaWan*, latência e vida de bateria, a estrutura de classificação de dispositivos na camada MAC foi dividida em 3 classes (LORA ALLIANCE, 2017): classe A, classe B e classe C segundo observa-se na figura 11.

- A classe A (Tabela 2) caracteriza comunicação bidirecional, tem por prioridade otimizar o consumo de bateria, deve ser suportado por todos os dispositivos e os mesmos ficam em modo *downlink* apenas após o sensor ter transmitido;
- A classe B (Tabela 2) em adição a classe A abre uma janela de comunicação extra em tempos agendados, administrado pelo *Beacon* sincronizador de tempo do *gateway*;
- A classe C (Tabela 2) funciona de forma bidirecional com o máximo *slot* de recebimento, com janela de recepção continuamente aberta, precisando de mais bateria para funcionamento, porém oferece menor latência durante a transmissão.

Figura 11 – Estrutura *LoRaWan*.



Fonte: LoRa Alliance.

A tabela 2 apresenta, de forma resumida, as classificações das classes no *LoRaWan* (RF WIRELESS WORLD, 2017).

Tabela 2 – Classificação LoRa MAC adaptado.

Classe A	Classe B	Classe C
Alimentado por Bateria, Maior latência	Baixa latência	Sem latência
Comunicações bidirecionais	Comunicações bidirecionais com recebimento programado	Comunicações bidirecionais
<i>Unicast</i>	<i>Unicast e Multicast</i>	<i>Unicast e Multicast</i>
Payloads pequeno, longos intervalos	<i>Payloads</i> pequeno, longos intervalos, envio de <i>beacon</i> periódico do <i>gateway</i>	<i>Payloads</i> pequeno
Nó-sensor inicia comunicação (<i>uplink</i>)	Janela de recebimento extra (<i>ping slot</i>)	Servidor pode iniciar a comunicação a qualquer momento
Comunicação a partir do Servidor (<i>downlink</i>) durante janela de resposta determinada	Servidor inicia a comunicação em intervalos fixos	Nó-sensor sempre disponível para recebimento

Fonte: RF WIRELESS WORLD (2017)

A construção de um *gateway LoRaWan* tem como exigência mínima de *hardware* no *gateway* o transceptor na versão multicanais LoRa SX1301 (SEMTECH, 2017), o qual não estava disponível, em tempo hábil, para construção neste trabalho.

3.5.3 Biblioteca Libelium

A biblioteca da Libelium (LIBELIUM WASPMOTE, 2017) serve como base para o modelo proposto pelo professor Pham na construção de uma RSSF com o *gateway single channel*, usando o tradicional transceptor SX1276 conectado ao *Raspberry PI 3*.

Na montagem do *hardware*, o transceptor LoRa foi conectado inicialmente ao *Raspberry PI 3* através da pinagem SPI. Em seguida, foi feito o processo de instalação da Imagem disponibilizada no Github do autor. Uma vez instalada a Imagem, foi feito

acesso ao *Raspberry* por meio de interface gráfica com mouse, teclado e monitor. Por se tratar de uma versão do Raspbian pré-configurada a imagem possui 8 GB.

Com o objetivo de trabalhar a menor especificação de *hardware* possível, foram feitos testes com a mesma Imagem de instalação do sistema Linux embarcado para *Raspberry PI 3* no *Raspberry PI Zero*, que funcionou corretamente, porém, o nível de processamento ficou a maior parte do tempo no limite de 100%.

Para reduzir a especificação mínima de *hardware* necessária, foi feito todo o processo de instalação manualmente. Partiu-se da imagem Raspbian Stretch Lite, versão do linux para *Raspberry* sem interface gráfica, carregando apenas os requisitos mínimos do sistema operacional.

Após toda a instalação do *gateway* (sem interface gráfica) por meio de linha de comando, configuração e hospedagem de serviços e banco de dados, o *Raspberry PI Zero* continuou a apresentar altos custos de processamento, o que direcionou o estudo para outra opção de biblioteca apresentado no próximo item.

3.5.4 Biblioteca *Radiohead*

A biblioteca *Radiohead* foi criada pela Airspayce - Mike McCauley, suas especificações detalhadas estão disponíveis em (AIRSPAYCE, 2018). Sua principal vantagem é ser uma biblioteca que possui suporte a uma grande quantidade de transceptores.

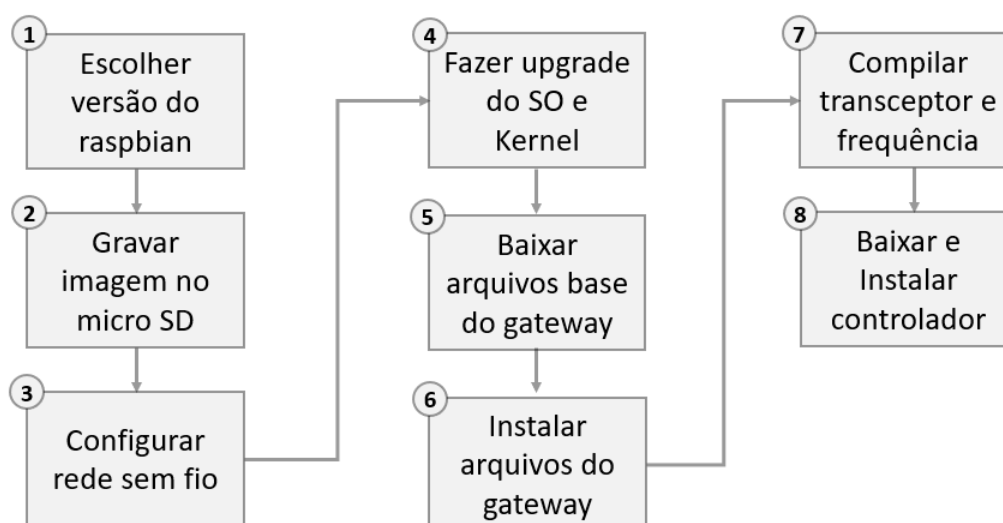
Os principais rádios suportados são: Hope-RF RF22B, RF23B, RF69B, Semtech SX1276/77/78/79, Nordic nRF24 2.4GHz. Essa facilidade de multi-rádios torna a biblioteca *Radiohead* uma opção neste trabalho.

Após a construção do primeiro experimento usando a biblioteca *Radiohead*, surgiu a necessidade de oferecer uma solução completa com a estação rádio base/*gateway* com o *Raspberry PI Zero* neste momento a interface da comunidade *MySensors* apresentou-se como referencial para essa construção.

A comunidade *MySensors* é formada por programadores e usuários de RSSF em todo o mundo e oferece um conjunto de *drivers*, *gateways* e opções de controladores em um formato de fácil utilização e configuração dos dispositivos e utiliza a Biblioteca *Radiohead* adaptada.

Uma vez de posse de todos os componentes necessários, foram seguidos os seguintes passos para construção do *gateway*, figura 12:

Figura 12 – Etapas de configuração do Gateway.



Fonte: Autor.

Para entregar uma interface amigável através da utilização de gráficos, foi escolhido o *software* DOMOTICZ de código aberto. Esse controlador pode ser instalado em plataformas Windows e Linux e possui um banco de dados muito flexível chamado SQLite. Outro ponto forte é o controlador possuir um servidor de hospedagem próprio, ou seja, uma vez feito o procedimento de instalação do DOMOTICZ, automaticamente são instalados o banco de dados e um mini servidor HTTP. Esses foram alguns diferenciais que levaram à escolha dessa ferramenta.

3.5.5 MySensors

O *MySensors* (LACEY et al., 2018) é uma comunidade de código livre (*open source*) e tem por objetivo o compartilhamento de *hardware* e *software* com a visão do “faça você mesmo” para automação de casas e Internet das Coisas.

Possui suporte a sensores e atuadores em diversas plataformas de desenvolvimento como o Arduino, ESP8266, *Raspberry Pi*, nRF24L01, RFM69HCW, RFM95/LoRa e outros.

Oferece um site com tutoriais e instruções detalhadas que possibilitam a construção de complexas RSSFs de forma simples a partir de bibliotecas adaptadas para um modelo de chamada de funcionalidades semelhantes mesmo com diferentes rádios transceptores.

Um extenso fórum em que são tratados os problemas que surgem durante o desenvolvimento de novas versões e de casos de erros encontrados por outros usuários fortalece a importância da ferramenta, pois essa base de dados de informações funciona

como mecanismo de suporte para usuários iniciantes.

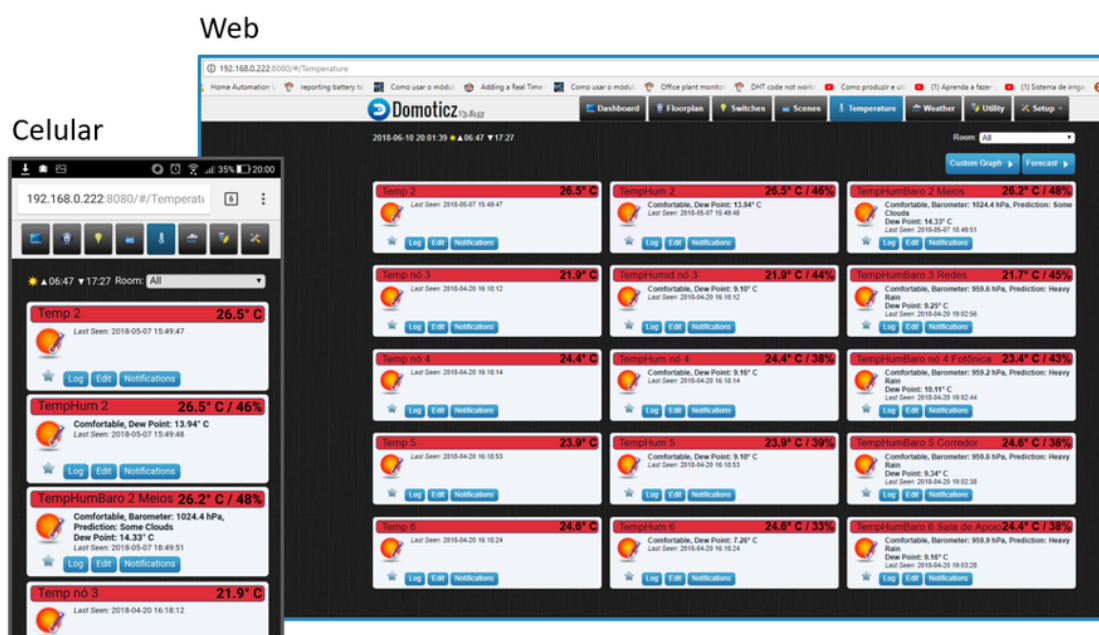
Para completar, o container de soluções que o *MySensors* oferece possui suporte nativo a uma dezena de diferentes controladores, que trazem robustez à rede de sensores por meio de uma interface de gerenciamento da RSSF construída.

3.5.6 Domoticz

O Domoticz (DOMOTICZ, 2018) é uma ferramenta gratuita e *open source*. Chamado de controlador ou supervisor, oferece uma interface amigável para monitoramento e configuração de dispositivos em uma RSSF.

Ele embarca numa instalação única um banco de dados e um servidor de hospedagem *Web*. Toda a interface é acessada via *browser* através de computadores e, devido à responsividade nativa do *software*, também tem suporte a dispositivos móveis, conforme figura 13.

Figura 13 – Domoticz Web e Celular.



Fonte: Autor.

O banco de dados nativo SQLite é uma ferramenta leve e robusta em que todos os dados coletados ficam armazenados. Podem ser gerados gráficos completos e detalhados e também é possível exportar os dados para o formato *.xls* do Excel.

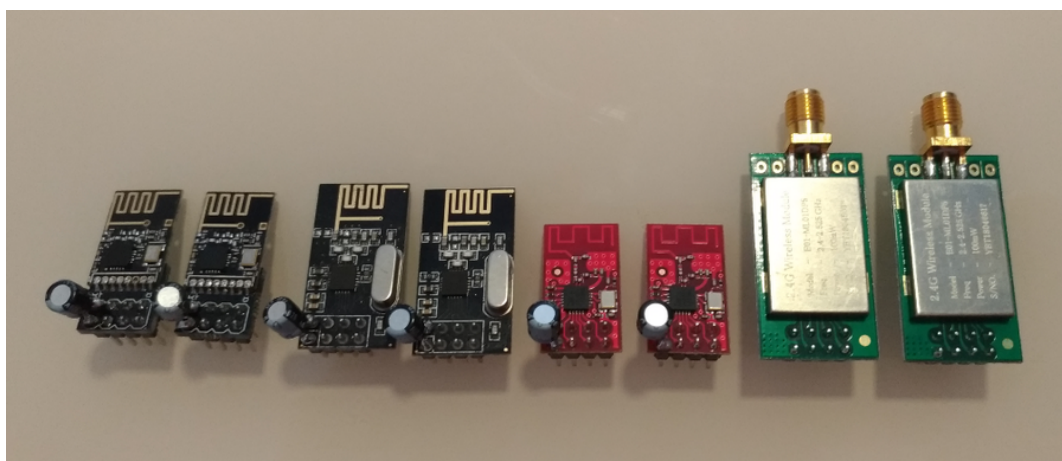
3.6 nRF24L01

O nRF24L01 é um transceptor fabricado pela Nordic Semiconductor (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2007). Definido como um *hardware* de baixo consumo de energia

que opera na banda de 2.4GHz e oferece alcance de até 100 metros. Sua principal vantagem é o custo. Em sua categoria é o transceptor de menor preço, muito utilizado em aplicações de curto alcance. Também apresenta uma versão amplificada que pode chegar ao alcance de 1000 metros segundo documentação da CDEByte.

Na figura 14, estão presentes da esquerda para direita, aos pares, diferentes versões do nRF24L01 que são: a versão SMD (*Surface Mounting Device*) soldado ao respectivo adaptador para pinos 2x4, em sequência a versão tradicional com conectores de 2x4 pinos de fábrica, que serviram de referência quanto à disposição dos pinos na *Radio Board*, na cor vermelha da fabricante CDEByte o menor modelo testado o E01-ML01D (CDEBYTE E01-ML01D, 2018) e, por último, o modelo E01-ML01DP5 (CDEBYTE E01-ML01DP5, 2018), versão amplificada, também fabricado pela CDEByte.

Figura 14 – Diferentes apresentações do nRF24L01.



Fonte: Autor.

A conexão desse transceptor com microcontroladores e processadores ocorre através de SPI e oferece excelente taxa de transmissão de até 2Mbps. A seguir, estão algumas das principais aplicações:

- Periféricos para PC sem fio;
- Mouse, teclados sem fio;
- Controles remotos para Sistemas Multimídia;
- Dispositivos de voz sobre IP;
- Automação Comercial e de Casas;
- RSSF de baixo consumo;

- RFID (*Radio-Frequency IDentification*) Ativo;
- Sistemas de rastreamento;
- Brinquedos.

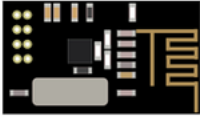
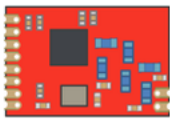
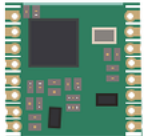
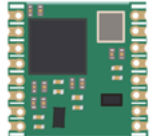
3.6.1 Modulação nRF24L01

O transceptor nRF24L01 utiliza a modulação GFSK (*Gaussian Frequency-Shift Keying*) que opera como a modulação FSK (*Frequency Shift Keying*) onde o sinal transmitido durante a comunicação obedece sempre a mesma amplitude, e tem como princípio a variação da frequência da portadora (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2017). Porém, os dados passam por um processo de filtragem gaussiana que causa a diminuição na largura do espectro do sinal e gera um padrão de sinal em função desse filtro.

3.7 Quadro comparativo dos transceptores

A figura 15 traz o comparativo dos quatro transceptores abordados no trabalho. Os aspectos analisados nas especificações técnicas (CHENGDU EBYTE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD, 2017; HOPERF MICROELECTRONICS CO.,LTD, 2018; HOPE MICROELECTRONICS CO.,LTD, 2018; NORDIC SEMICONDUCTOR, 2007) de seus respectivos fabricantes são: alcance, preço, taxa de transmissão, frequência e modulação, no caso do transceptor LoRa e RFM69 o alcance em metros foi dado por estimativa visto que os *datasheets* não informavam este valor.

Figura 15 – Comparativo transceptores.

	 nRF24L01	 CC1101	 RFM69	 LoRa
Alcance	100m	1000m	1000m	10000m
Preço	0.69 USD	2.69 USD	2.15 USD	5.30 USD
Taxa	Até 2Mbps	Até 600Kbps	Até 300Kbps	Até 300Kbps
Frequência	2.4 GHz	915 MHz	915 MHz	915 MHz
Modulação	GFSK	FSK	FSK	<u>LoRa Modulation</u>

Fonte: Autor.

Quanto ao alcance, tem-se o nRF24L01 como opção de menor alcance com 100 metros em visada direta, com o preço mais acessível, cerca de 0.69 USD. Por trabalhar em distâncias menores oferece taxas de transmissão maiores de até 2Mbps, atua na frequência de 2.4GHz e possui modulação GFSK.

Os transceptores intermediários que possuem alcance de até 1000 metros são os CC1101 e o RFM69HCW, ambos com custo na faixa de 2 USD. Operam na frequência de 915MHz com modulação FSK, na opção do RFM69HCW a taxa de transmissão é de até 300Kbps e no CC1101 de até 600 Kbps.

Por último, tem-se o LoRa, com o maior custo dentre os analisados (5.30USD), porém o alcance é na faixa de quilômetros em áreas com visada direta, entrega baixas taxas de transmissão e utiliza o sistema proprietário de modulação *LoRa Modulation* que é um novo tipo de modulação, com conceitos que possuem similaridades com os modelos anteriores com modulação FSK. Desta forma, utiliza os mesmos amplificadores de baixo custo amplamente comercializados em rádios com modulação FSK.

4 Materiais e Métodos

Os estudos começaram com o transceptor da Texas Instrument CC1101 e o *hardware* BE900 da Radio IT (RADIOIT ELETRÔNICA LTDA, 2012). Porém, devido ao alto custo para aquisição do BE900, buscou-se uma alternativa com custo de uma fração do preço desse rádio e total compatibilidade quanto à conectividade entre o novo rádio e o BE900. Após testes, obteve-se o resultado esperado com o CC1101 da CDEBYTE e o microcontrolador ATMega 328 da Atmel.

Após testes básicos de configuração de *offset* para calibração dos canais de comunicação nos rádios utilizando o transceptor CC1101 deu-se início aos testes de alcance, o resultado esperado era que o alcance das distâncias entre o BE900 e o transceptor CC1101 da CDEByte com o microcontrolador ATMega328 da Atmel fossem semelhantes. Entretanto o transceptor CC1101 da CDEbyte teve o alcance superior cerca de 8,9 vezes maior.

Durante a pesquisa para a construção do novo *hardware* de baixo custo, surgiu o conhecimento de outros fabricantes e de seus respectivos produtos que atuam em diferentes faixas de alcance. Na linha de longo alcance dois transceptores se destacaram: o LoRa e o Sigfox.

O LoRa foi o escolhido. As principais características que definiram essa escolha foram: a plataforma aberta (com exceção da modulação), facilidade na aquisição do transceptor, número significativo de diferentes fornecedores/fabricantes, baixo custo e a vasta documentação produzida pela grande comunidade que se construiu mundialmente em torno da plataforma *LoRaWan*.

Durante a construção do nó-sensor LoRa surgiu a necessidade de uma placa de desenvolvimento para operar com diferentes transceptores de forma alternada, o que deu origem à *Radio Board*, uma placa de desenvolvimento idealizada nesta pesquisa, na PUC Campinas, que oferece através de uma conexão *Dupont* de 2x4 pinos de 2.54mm compatibilidade com a maioria dos transceptores que utilizem *Serial Peripheral Interface* como forma de comunicação entre transceptor e microcontrolador.

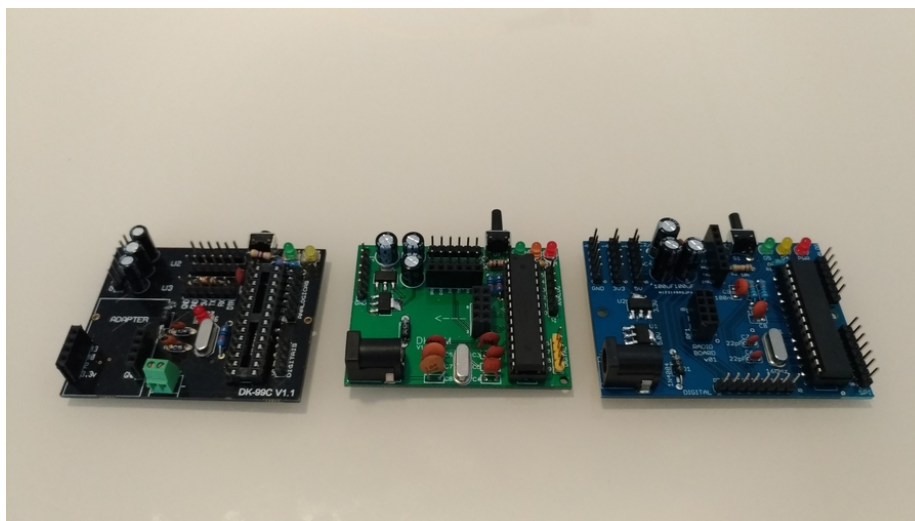
Uma vez construído o CC1101 com alcance intermediário e o LoRa com longo alcance, optou-se pelo transceptor nRF24L01 para ocupar a faixa de curto alcance de até 100m por ser o transceptor de menor custo no mercado com o preço quase quatro vezes menor que o CC1101 e oito vezes menor que o LoRa.

4.1 *Radio Board*

Para trabalhar de forma rápida e dinâmica na troca das configurações de diferentes tipos de transceptores foi construída uma placa de desenvolvimento com

codinome DK99C na sua primeira versão. Atualizada para segunda versão como multi rádioDK99M e, por fim, a terceira versão final denominada *Radio Board*, completa e com todas as melhorias obtidas durante os testes das versões anteriores. A figura 16 apresenta, da esquerda para a direita, a DK99C, a DK99M e a *Radio Board*.

Figura 16 – DK99C, DK99M e *Radio Board*.



Fonte: Autor.

A construção das placas teve desde o início como referência o *hardware* aberto Arduino Pro Mini. Na versão final da *Radio Board* foi escolhida como opção de conectividade dos transceptores o padrão do *layout* do transceptor nRF24L01 por ser o único dentre todos os analisados a apresentar sua principal versão com pinagem 2x4, sendo que os outros transceptores são comercializados em formato SMD. A pinagem para conexão SPI (*Serial Peripheral Interface*) dos dispositivos seguiu a figura 17.

Figura 17 – Disposição dos Pinos.

IRQ	MISO
MOSI	SCK
CSN	CE
VCC	GND

Fonte: Autor.

- IRQ (*Interruption ReQuest*) - Solicita interrupção de canal entre *Master* e *Slave*;
- CE (*Chip Enable*) - Habilita o chip;
- MISO (*Master In Slave Out*) - Canal *Slave* envia dados ao mestre;

- MOSI (*Master Out Slave In*) - Canal *Master* envia dados aos dispositivos;
- SCK (*Serial Clock*) - Gera a sincronização entre os canais do mestre e cada dispositivo.
- Pino CSN/SS (*Slave Select*) - Configurável e diferente em cada dispositivo, utilizado pelo mestre para habilitar e desabilitar os dispositivos. Esta funcionalidade permite que se tenha vários dispositivos SPI compartilhando as mesmas linhas MISO, MOSI e SLK;
- VCC (*Voltage Common Collector*) - Voltagem do equipamento;
- GND (*GrouND*) - Aterramento.

Para que todos os transceptores restantes (LoRa, RFM69HCWe CC1101) pudessem ser conectados diretamente à *Radio Board* foram confeccionadas placas adaptadoras com conectores SMA para as antenas de 915MHz que foram utilizadas nos testes.

A tabela 3 apresenta os componentes que foram utilizados para construção da *Radio Board* e o custo aproximado.

Tabela 3 – Componentes *Radio Board*.

ID	Componente	Qtd.	Apresentação	Leitura na Placa	Valor R\$
1	Soquete ATMEGA 328P	1	DIP28-300	ATMEGA328	0,37
2	FTDI	1	HEADER 1X6 FEMALE	FTDI	0,01

ID	Componente	Qtd.	Apresentação	Leitura na Placa	Valor R\$
3	ANALOG	1	HEADER 1X6 MACHO	ANALOG	0,01
4	GND	1	HEADER 1X6 MACHO	GND	0,01
5	3.3V	1	HEADER 1X6 MACHO	3.3V	0,01
6	5V	1	HEADER 1X6 MACHO	5V	0,01
7	SPI	1	HEADER 1X7 MACHO	SPI	0,01
8	DIGITAL	1	HEADER 1X8 MACHO	DIGITAL	0,01
9	RADIO	1	HEADER 2x4 MACHO	RF1	0,02
10	LD1117S50TR	1	SOT-223	U1	0,45
11	LD1117S33TR	1	SOT-223	U2	0,45

ID	Componente	Qtd.	Apresentação	Leitura na Placa	Valor R\$
12	1N4007	1	DO-41	D1	0,05
13	CRYSTAL 16000	1	HC49U-V	Q1	1,15
14	22pF	2	CERAMIC-2.54 (22)	C6,C7	0,20
15	0.1uF ou 100nf	4	CERAMIC-2.54 (104)	C3,C8,C9	0,20
16	RESET	1	SW_TACTILE_SPST_ANGLED51		0,15
17	330	2	AXIAL-0.3	R3,R4	0,10
18	10k	1	AXIAL-0.3	R2	0,10
19	470	1	AXIAL-0.3	R1	0,10
20	100uf	3	CP_6.3X7MM (eletrolítico)	C1,C2,C4	0,25

ID	Componente	Qty.	Apresentação	Leitura na Placa	Valor R\$
21	LED 3mm vermelho	1	LED 3MM niro	LED1 (PWR)	0,10
22	LED 3mm amarelo	1	LED 3MM niro	LED2 (4)	0,10
23	LED 3mm verde	1	LED 3MM niro	LED3 (5)	0,10
24	6V-9V	1	DC-5020	DC	0,50
				Total	5,86

Fonte: Autor

Para se chegar ao valor final da placa, é necessário incluir o microcontrolador e o modelo de transceptor escolhido para montagem da RSSF. A tabela 4 mostra esses componentes.

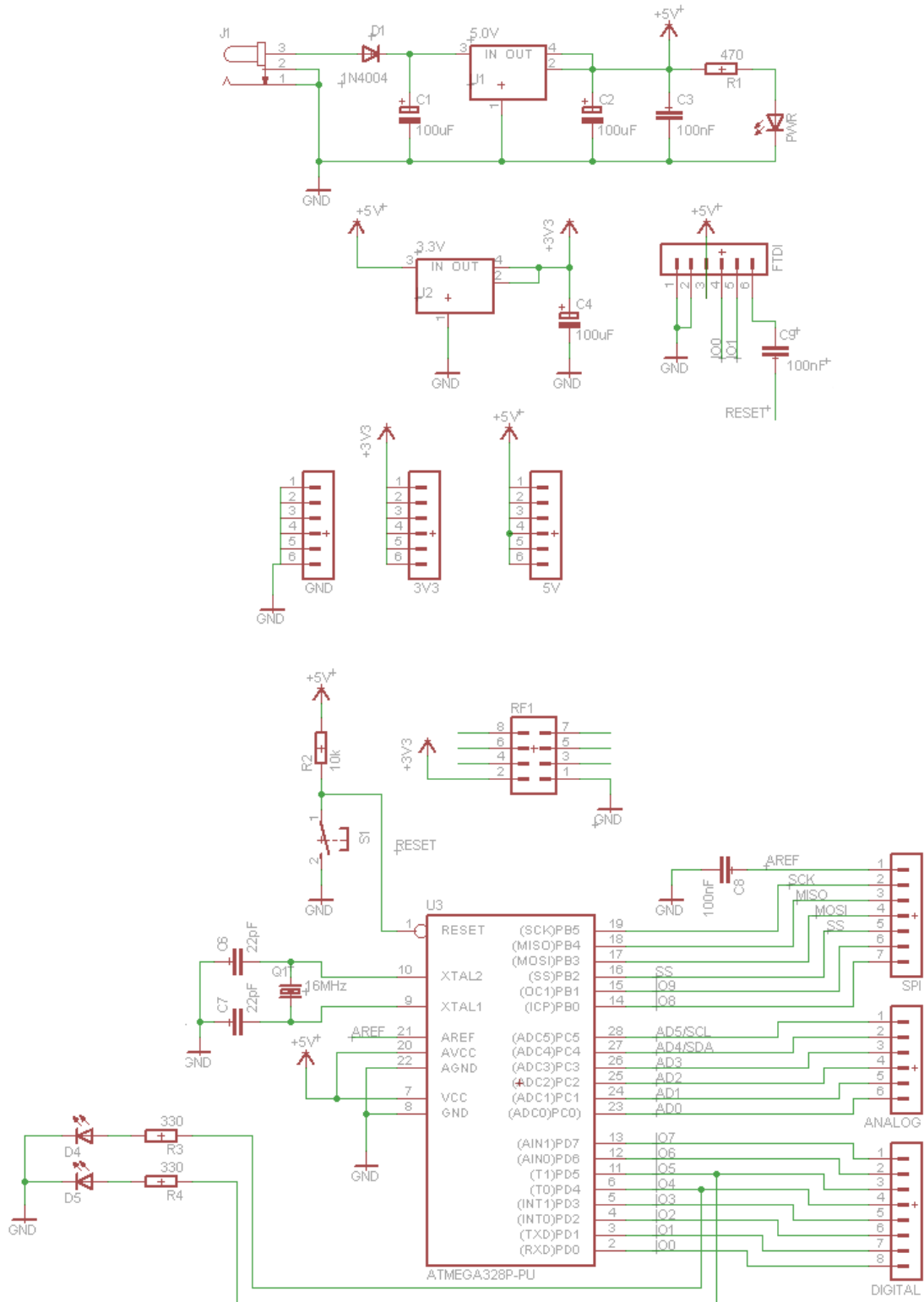
Tabela 4 – Transceptor e Microcontrolador.

ID	Componente	Qty.	Valor
1	CC1101	1	USD 2.69
2	nRF24L01	1	USD 0.69
3	RFM69HCW	1	USD 2.15
4	RFM95W/LoRa	1	USD 5.30
5	ATMega328P-PU	1	USD 2.10

Fonte: Autor

Segue, na figura 18, o esquema elétrico da placa *Radio Board* construída.

Figura 18 – Esquema elétrico *Radio Board*.



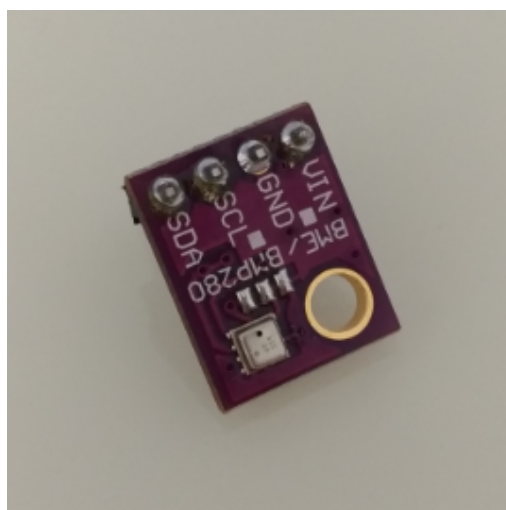
Fonte: Autor.

4.2 Principais sensores e componentes utilizados para construção do Sistema de Irrigação

Com o objetivo de monitoramento de grandezas importantes para agricultura foram utilizados os seguintes sensores:

- BME280: desenvolvido pela Bosch (BOSCH, 2018), esse dispositivo também monitora a umidade relativa do ar, a temperatura do ambiente e a pressão barométrica. Em testes feitos no artigo (CARRANCO et al., 2017), a comparação do BME280 e uma estação meteorológica profissional o sensor (figura 19) apresentou cerca de 90% de assertiva nas coletas sendo um excelente custo-benefício.

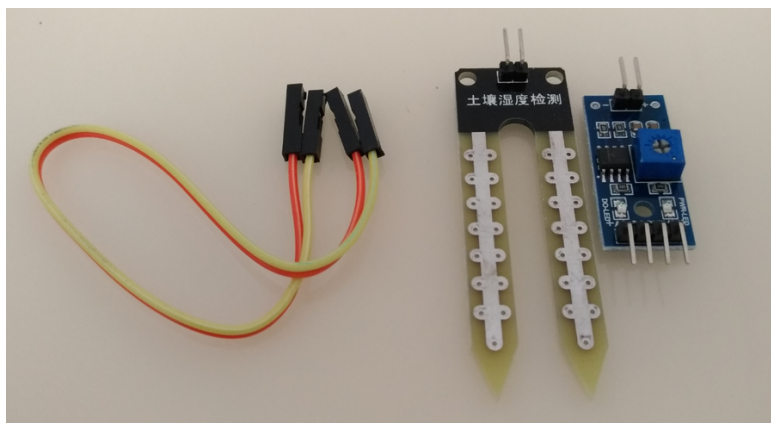
Figura 19 – BME280.



Fonte: Autor.

- Sensor de umidade do solo: o sensor foi escolhido a partir do menor custo (figura 20). Por se tratar de um sensor genérico, não há procedência quanto ao fabricante nem suporte.

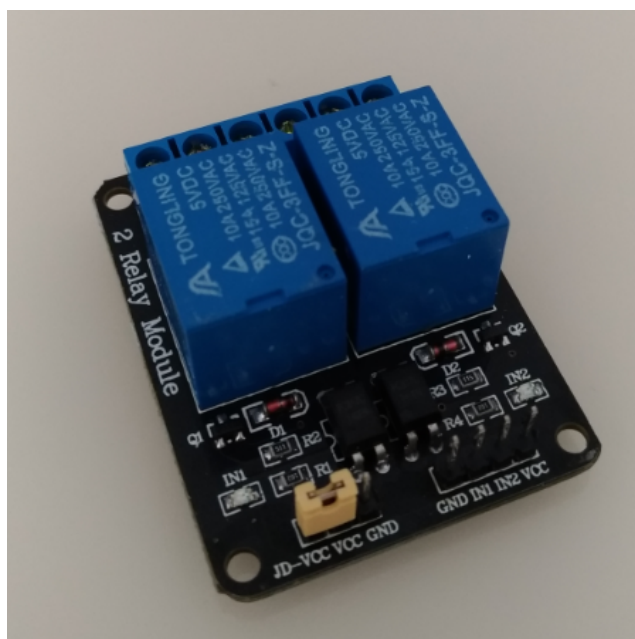
Figura 20 – Sensor de umidade do solo.



Fonte: Autor.

- Relé de 2 canais (figura 21): escolha pelo menor custo com a possibilidade de utilizar 2 canais, sendo 1 para água e outro para aditivos, dependendo da cultura cultivada.

Figura 21 – Relé de 2 canais.



Fonte: Autor.

A tabela 5 apresenta os componentes que foram utilizados para a construção do Sistema de Irrigação e o custo aproximado.

Tabela 5 – Componentes Sistema de Irrigação.

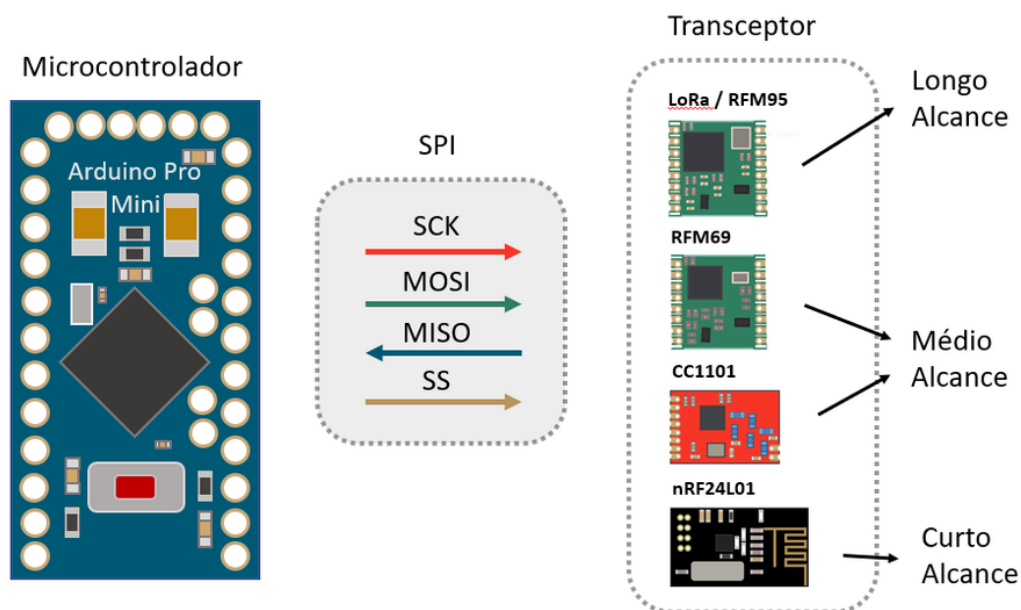
ID	Componente	Qtd.	Valor
1	BME280	1	R\$ 35,00
2	Sensor Umidade do Solo	1	R\$ 12,00
3	Relé de 2 canais	1	R\$ 15,00
		Total	R\$ 62,00

Fonte: Autor

4.3 SPI (*Serial Peripheral Interface*)

O SPI (*Serial Peripheral Interface*) é um protocolo de dados seriais sincronizados utilizado por microcontroladores para estabelecer comunicação com um ou mais dispositivos periféricos ou entre dois microcontroladores (ARDUINO, 2018). Nas conexões SPI o microcontrolador atua como mestre controlador dos demais dispositivos periféricos que são os escravos. Em alguns casos há a necessidade de maior poder computacional (processamento) e utilizam-se microprocessadores. A figura 22 apresenta de forma simplificada as principais conexões SPI, dos módulos transceptores (Escravos) usados nos testes e o microcontrolador (Mestre) Arduino Pro Mini.

Figura 22 – Relação Mestre Escravo SPI.



Fonte: Autor.

Esses dispositivos escravos, quando conectados aos mestres, oferecem novas funcionalidades que expandem as possíveis aplicabilidades de seus mestres. São comuns a todos os dispositivos três canais:

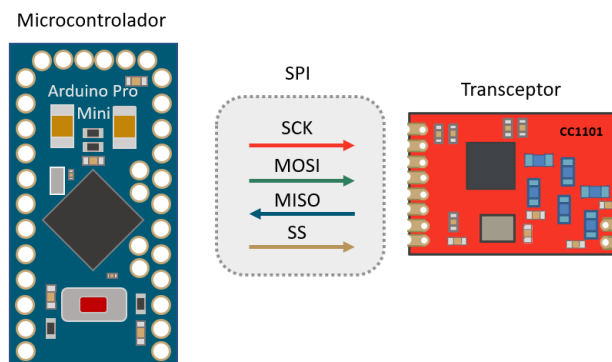
- MISO (*Master In Slave Out*) - Canal *Slave* envia dados ao mestre;
- MOSI (*Master Out Slave In*) - Canal *Master* envia dados aos dispositivos;
- SCK (*Serial Clock*) - Gera a sincronização entre os canais do mestre e cada dispositivo.
- Pino SS (*Slave Select*) - Configurável e diferente em cada dispositivo, utilizado pelo mestre para habilitar e desabilitar os dispositivos. Esta funcionalidade permite que se tenha vários dispositivos SPI compartilhando as mesmas linhas MISO, MOSI e SLK.

4.4 Testes com o CC1101

Metodologicamente, adotou-se como referência o artigo (PHAM; RAHIM; COUSIN, 2016), a plataforma *open source* de *hardware* Arduino, com microcontroladores AVR Atmega328 (ATMEL CORPORATION, 2016) de 8 bits da ATMEL e transceptores sub 1GHz CC1101 da Texas Instrument (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2017).

Foi desenvolvido um *hardware* com o transceptor CC1101 responsável pela modulação e demodulação do sinal. Foi utilizada a comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*). A figura 23 apresenta a construção que utilizou inicialmente a placa de desenvolvimento Arduino pro mini precursora a placa *Radio Board*.

Figura 23 – Nó-sensor CC1101.



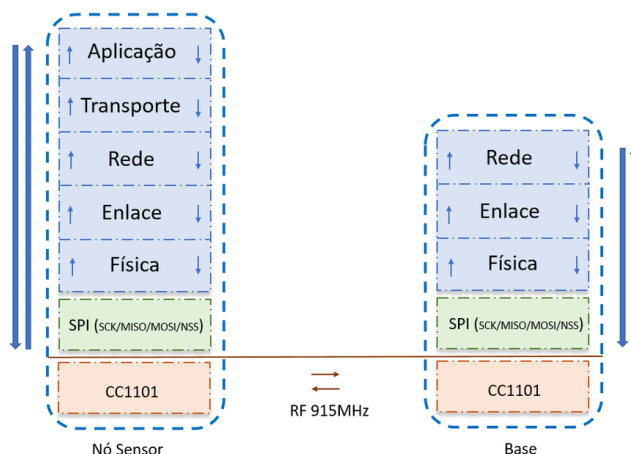
Fonte: Autor.

O fabricante do módulo SPI CC1101 é a CDEbyte (CHENGDU EBYTE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD, 2017), empresa chinesa especialista na fabricação deste tipo de módulo. Outro ponto importante é o custo por unidade de USD 2,69 que pode ser adquirido dentro do limite de importação de USD 50,00 sem tributação de impostos.

No microcontrolador ficam armazenados os códigos e atributos capazes de explorar todas as funcionalidades do mesmo. Para este trabalho foi escolhido o *firmware* do RADIUINO.cc que apresenta a estrutura de 5 camadas.

Essas camadas são: Aplicação, Transporte, Rede, Enlace e Física, exemplificadas na figura 24.

Figura 24 – Estrutura de camadas RADIUINO e RF 915MHz.



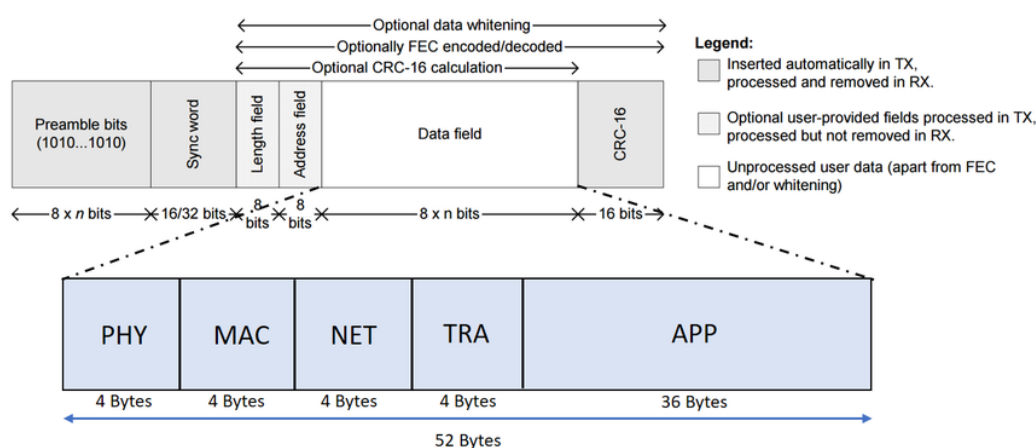
Fonte: Autor.

O foco da pesquisa foram as camadas física e de rede. Na camada física foram feitas as alterações referentes à frequência de transmissão. Outro aspecto muito importante é a calibração do rádio através da configuração do *offset* com o analisador de espectro. Dessa forma, todos os rádios apresentam calibração adequada.

O formato do pacote de radiofrequência característico do CC1101 é composto de preâmbulo, palavra de sincronismo, *length field*, *address field*, *data field / payload* e *CRC*, conforme figura 25.

Dentro do campo *data field* tem-se os 52 Bytes do *firmware* RADIUINO composto pelas camadas física, acesso ao meio, rede, transporte e aplicação, sendo as 4 primeiras com 4 bytes respectivamente, e a camada de aplicação com 36 bytes, formando um pacote de comprimento de 52 bytes no total.

Figura 25 – Estrutura do pacote CC1101.



Fonte: CC1101 datasheet Adaptado.

No levantamento de dados de controle de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) em relação à distância em metros, os dados foram obtidos durante o desenvolvimento de um estudo comparativo entre o *hardware* desenvolvido na pesquisa e o BE900 da RadioIT. Todos os testes foram realizados em campo aberto.

A calibração dos sensores que se comunicam pelo transceptor CC1101 se desenvolve pelo alinhamento dos canais, potência da transmissão do sinal, taxa de transmissão da porta serial, endereço do sensor e, principalmente, do ajuste do *offset* do cristal. A calibração foi realizada em todos os rádios da rede. Como o sistema apresenta 66 canais diferentes, pode-se escolher um canal a cada 200kHz e, assim, uma transmissão não influencia nas outras.

O sinal transmitido apresenta uma potência de acordo com o perímetro de

alcance da rede, o que permite a utilização desse mesmo canal em redes distintas sem interferências em suas transmissões. As potências de transmissão podem ser: -30dBm, -20dBm, -15dBm, -10dBm, 0dBm, 5dBm, 7dbm e 10dBm, que variam de 0 a 7 no *firmware* do rádio.

Cada nó na rede é identificado por um identificador único para evitar que o mesmo receba comando de outros sensores. Na plataforma Raduino, comumente é adotado o ID 0 para o nó-base e em uma rede podem ter até 256 nós-sensores incluindo o nó-base.

Os nós sensores conectados aos respectivos computadores definem a taxa de transmissão da porta serial, isso permite a análise dos dados coletados e a determinação da distância entre os sensores desta rede.

O *offset* do cristal do transceptor CC1101 é ajustado (SILVA, 2014) pelo *firmware* da porta de 915MHz, em que um analisador de frequência de mão (RF Explorer 3G Combo), figura 26, coleta o valor do canal transmitido a um *offset* zerado.

Figura 26 – Analisador de frequência RF Explorer.



Fonte: RF Explorer.

A diferença entre o valor coletado e o do canal de 915MHz representa o valor em KHz multiplicado pelo número coletado do *offset* (para o CC1101 é 1,59). De posse desses valores, faz-se a divisão da diferença do valor coletado com o valor de 915MHz pelo passo de frequência do transceptor. Arredonda-se o valor das casas decimais e converte-se o resultado para um número hexadecimal, conforme a função computacional a seguir:

$$\text{Offset} = \text{Hexadecimal} (\text{Arredondar}(915 - V_c) / P_f)$$

Onde:

Offset = Valor do *offset* para o cristal do transceptor;

Hexadecimal = Função para converter números decimais para hexadecimais;

Arredondar = Função que arredonda as casas decimais dos números;

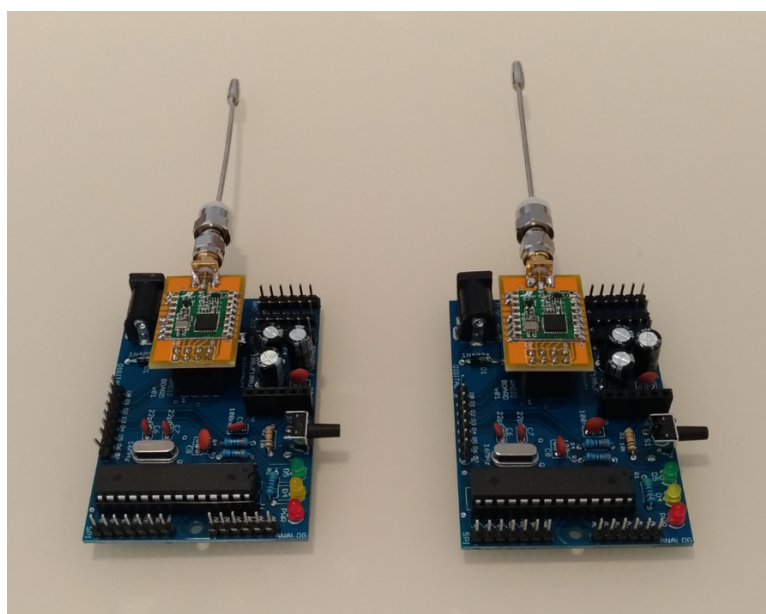
Vc = Valor coletado com o *firmware* da portadora de 915MHz e valor de *offset* de 0x00.

Pf = Passo de frequência do transceptor.

4.5 Teste com o RFM69HCW

No dia 20 de outubro de 2018, foi feito o teste com o transceptor RFM69HCW em conjunto com a *Radio Board*. Teve como objetivo confirmar a maior capacidade de alcance do transceptor RFM69HCW em comparação com o transceptor CC1101. A figura 27 apresenta o RFM69HCW junto com a placa *Radio Board*.

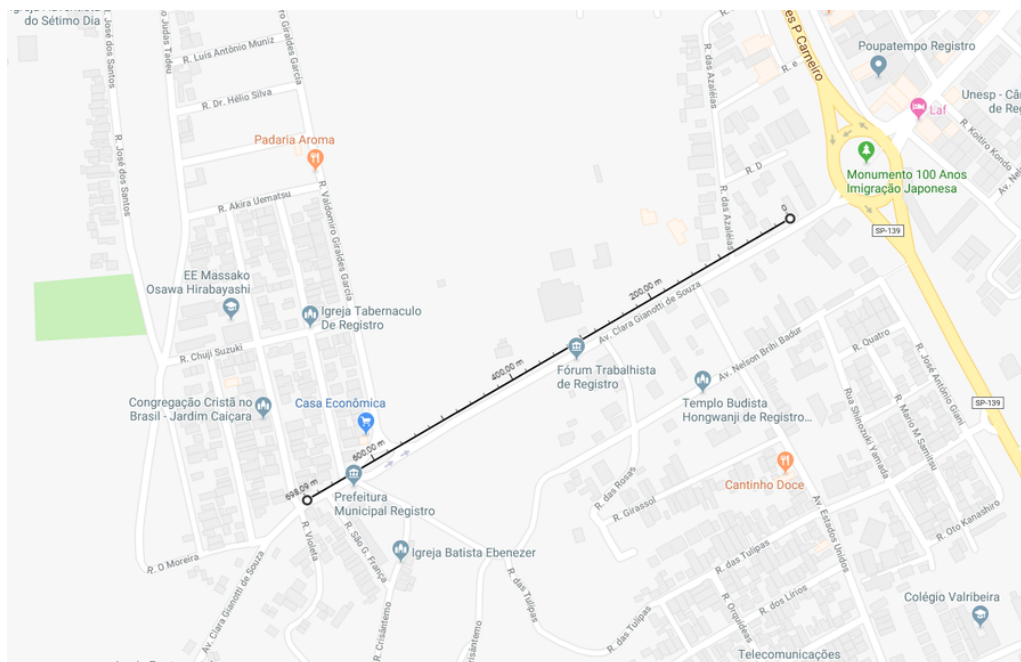
Figura 27 – Radio Board com RFM69HCW.



Fonte: Autor.

Foi feita a coleta de dados de RSSI, que é o indicativo da potência de sinal recebido, na cidade de Registro (SP), especificamente na Av. Clara Gianotti de Souza latitude e longitude respectivas 24°30'09.7"S 47°51'18.5"W conforme figura 28.

Figura 28 – Teste com o RFM69HCW na cidade de Registro (SP).



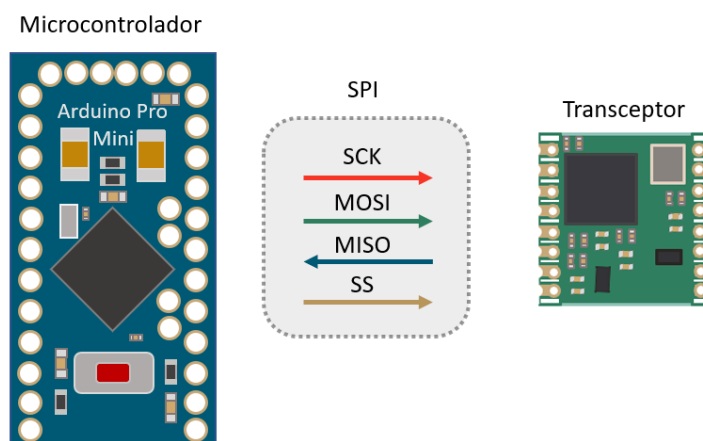
Fonte: Google Maps adaptado.

4.6 Testes com o LoRa

4.6.1 Testes em ambiente fechado

Nesta etapa da pesquisa, foi construído um rádio de transmissão e recepção com o transceptor RFM95W do fabricante Hoperf (HOPERF MICROELECTRONICS CO.,LTD, 2018), com o objetivo de medir o alcance do sinal no meio urbano e suburbano. O microcontrolador escolhido foi ATmega328 da Atmel (ATMEL CORPORATION, 2016), inicialmente na apresentação do Arduino Pro Mini, figura 29, devido o mesmo oferecer capacidade de processamento suficiente para os testes propostos.

Figura 29 – Nó-sensor LoRa.



Fonte: Autor.

Em continuidade aos testes, foram definidos um nó-base e um nó-sensor. Utilizaram-se microcontroladores ATmega328P-PU na placa de desenvolvimento do projeto *Radio Board* associados ao transceptor RFM95W dispostos como nó-base e nó-sensor para servirem como equipamentos de medição de RSSI, utilizou-se uma placa de leitura de cartão micro SD e um chip para guardar os dados das medições e um visor LCD modelo 2004 como dispositivo de saída do dado de RSSI coletado, conforme figura 30.

Figura 30 – Microcontroladores para medição de RSSI.

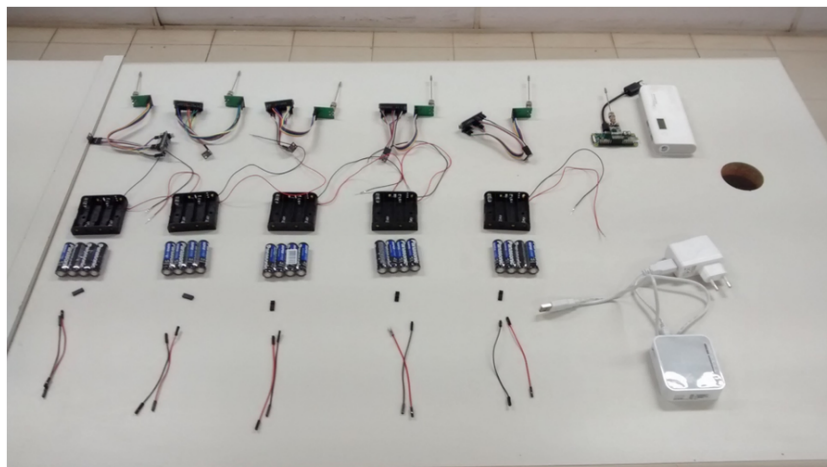


Fonte: Autor.

Outro ponto importante foi a escolha das antenas físicas. No nó-base e no nó-sensor foram usadas antenas modelo KLC 915MHz, ainda sem *datasheet* de especificações, o fabricante é a KLC (KLC CONECTORES, 2018).

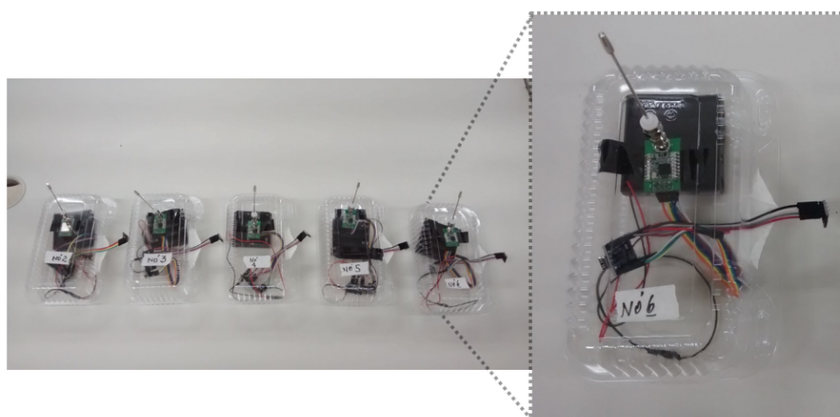
Para oferecer a comunicação entre os Arduinos e os módulos transceptores foi utilizada a interface de comunicação SPI. Outro objeto muito importante foi a parte de *software*, pois o LoRa possui diferentes opções de bibliotecas. Após análise das bibliotecas Libelium e *RadioHead*, foi feita a escolha da última, devido à maior flexibilidade para utilização de diferentes categorias de microcontroladores e melhor custo de processamento.

Durante a parte mais avançada dos testes, passou-se a utilizar como nó-base o *Raspberry PI Zero* com o transceptor RFM95W conectado diretamente às portas de entrada e de saída SPI do mesmo. Foram feitos testes com a biblioteca Libelium descrita no item 4.3.2 e, em seguida, confirmou-se a escolha da biblioteca *RadioHead*, descrita no item 4.3.3, devido ao seu melhor desempenho.

Figura 31 – RSSF pré-configurada para testes.

Fonte: Autor.

Nos testes em ambiente fechado, a figura 31 ilustra a disposição de 5 Nós Sensores utilizando Arduino Nano como microcontrolador e transceptores RFM95W nas placas adaptadoras do projeto *Radio Board* e os respectivos conectores SMA com antenas KLC, baterias AA Panasonic e o sensor de umidade relativa do ar, temperatura e pressão barométrica BME280 da Bosch, que em testes feitos no artigo (CARRANCO et al., 2017), a comparação do BME280 e uma estação meteorológica profissional o sensor apresentou cerca de 90% de assertiva nas coletas sendo um excelente custo-benefício. Como nó-base foi utilizado um *Raspberry PI Zero* com um transceptor RFM95W conectado diretamente através da interface SPI. A figura 32 apresenta os Nós Sensores já montados.

Figura 32 – Nós Sensores montados para teste.

Fonte: Autor.

Após completar a construção da RSSF, foi realizada a coleta das medições que ocorreu nos dias 18, 19 e 20 de abril de 2018. Os locais escolhidos no Campus da PUC-Campinas para monitoramento foram:

Todos os nós-sensores e o nó-base foram instalados nas suas respectivas caixas superiores a 2,56m de altura conforme a figura 33.

- A - Sala dos técnicos;
- B - Corredor;
- C - Laboratório de Redes;
- D - Laboratório de Meios;
- E - Laboratório de Fotônica.

Figura 33 – Áreas dos testes em ambiente fechado.

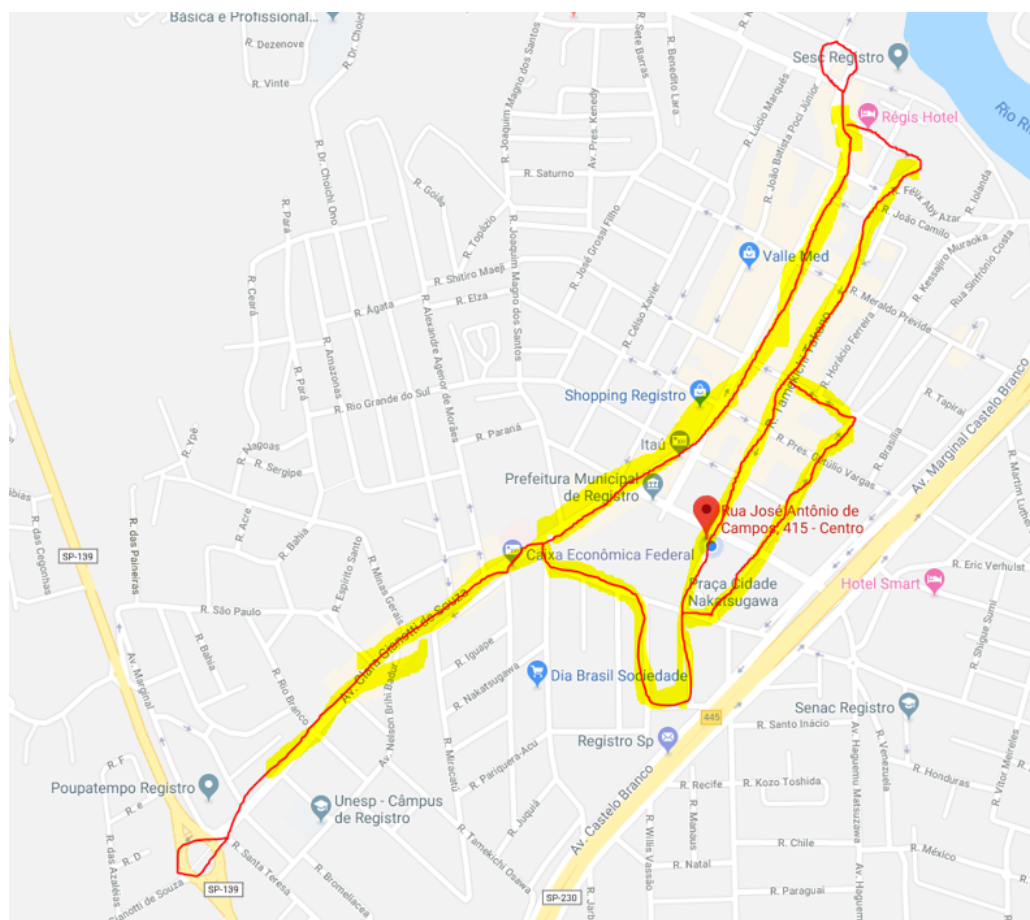


Fonte: Autor.

4.6.2 Testes em Área Urbana

No dia 25 de agosto de 2018, foram realizados os testes com o transceptor LoRa RFM95W na cidade de Registro SP. Todos os testes ocorreram no centro urbano da Cidade conforme figura 34.

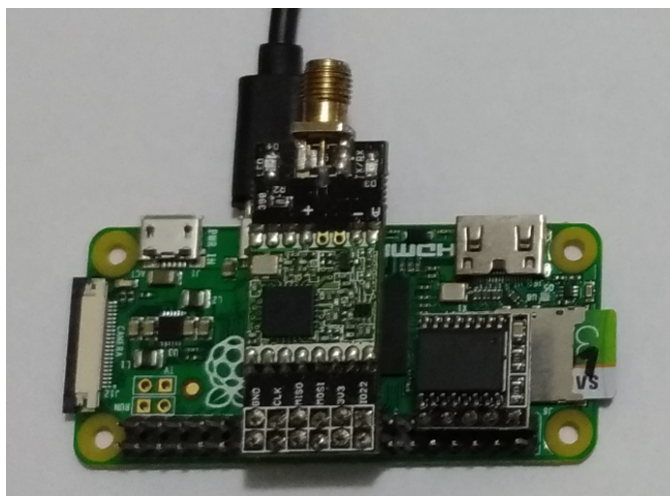
Figura 34 – Mapa do teste de alcance em Registro (SP).



Fonte: Google Maps editado.

Foram utilizados como *Hardware* o *Raspberry PI Zero* no nó-base, tendo sido acoplado a ele o transceptor LoRa conforme figura 35. A alimentação de energia foi feita por meio de uma fonte 5V/3A ligada à rede elétrica em tensão de 127V. Como receptor, foi utilizada uma placa de desenvolvimento *Radio Board* conectada a outro transceptor LoRa, alimentada pela interface USB/FTDI de 5V diretamente ao *notebook*. Todos os transceptores atendiam à faixa de frequência ISM (*Industrial Scientific and Medical*) de 915MHz.

Figura 35 – Raspberry PI Zero c/ gateway LoRa.



Fonte: Autor.

No *Raspberry* foi compilado o *Software/firmware MySensors* versão 2.2 a 915MHz, última versão estável disponível até a data dos testes. Quanto ao formato do pacote LoRa, foram mantidas as características padrão do *MySensors*.

No receptor *Radio Board*, foi compilado, através da interface IDE Arduino, o microcontrolador ATmega328P-PU com o código de exemplo adaptado “*MySensors RFM69_RFM95_ATC_SignalReport*“. Esse código oferece leitura dos dados de RSSI.

A antena física utilizada nos testes é de fabricação nacional produzida pela KLC Eletric Conexões Ltda. Por ser uma versão ainda não documentada, não está disponível em detalhes a relação de ganho, embora saiba-se que está em torno de 3dBi no formato omnidirecional.

As medidas foram coletadas em um carro em movimento a aproximadamente 30Km/h, com o posicionamento da antena RX a 1,6m em relação ao solo e a estação rádio base no segundo andar do prédio localizado na rua José Antônio de Campos, 415, da cidade de Registro-SP.

Na primeira etapa de testes, percebeu-se que o alcance estava aquém do esperado, oferecendo falhas de transmissão já a partir de 200m de distância do nó-base.

Na segunda etapa de testes, modificou-se a disposição da antena no carro para uma altura de 2,3 metros em relação ao solo e posicionou-se a estação rádio base no 4º andar do prédio.

A partir desta nova configuração do *setup* de teste, os resultados passaram a ser semelhantes aos encontrados em outros trabalhos (PHAM; RAHIM; COUSIN, 2016, 2016, 2016; HIRATA; TERADA; TOYOTA, 2017; LAVRIC; POPA, 2017; FACCHINI

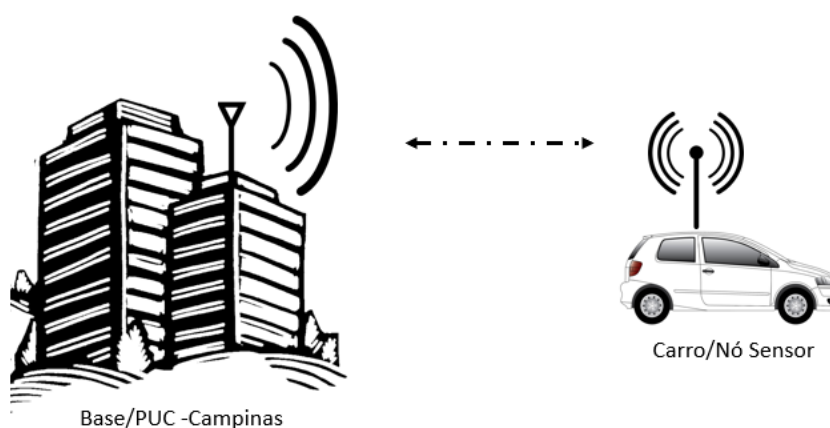
et al., 2017).

4.6.3 Teste na cúpula do Prédio CT do Bloco C2 da PUC-Campinas

No dia 04 de setembro de 2018, foi realizado, em uma área que abrange instalações da PUC-Campinas e da UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas), o teste de maior alcance do LoRa/RFM95W. Por se tratar de uma área com poucas edificações, acredita-se que os resultados obtidos servem como referência para regiões que possuam características rurais.

A figura 36 mostra a configuração adotada nos testes, na qual o nó-base foi colocado na cúpula do prédio CT, do Bloco C2 da PUC-Campinas e o nó-sensor foi colocado em um carro em movimento.

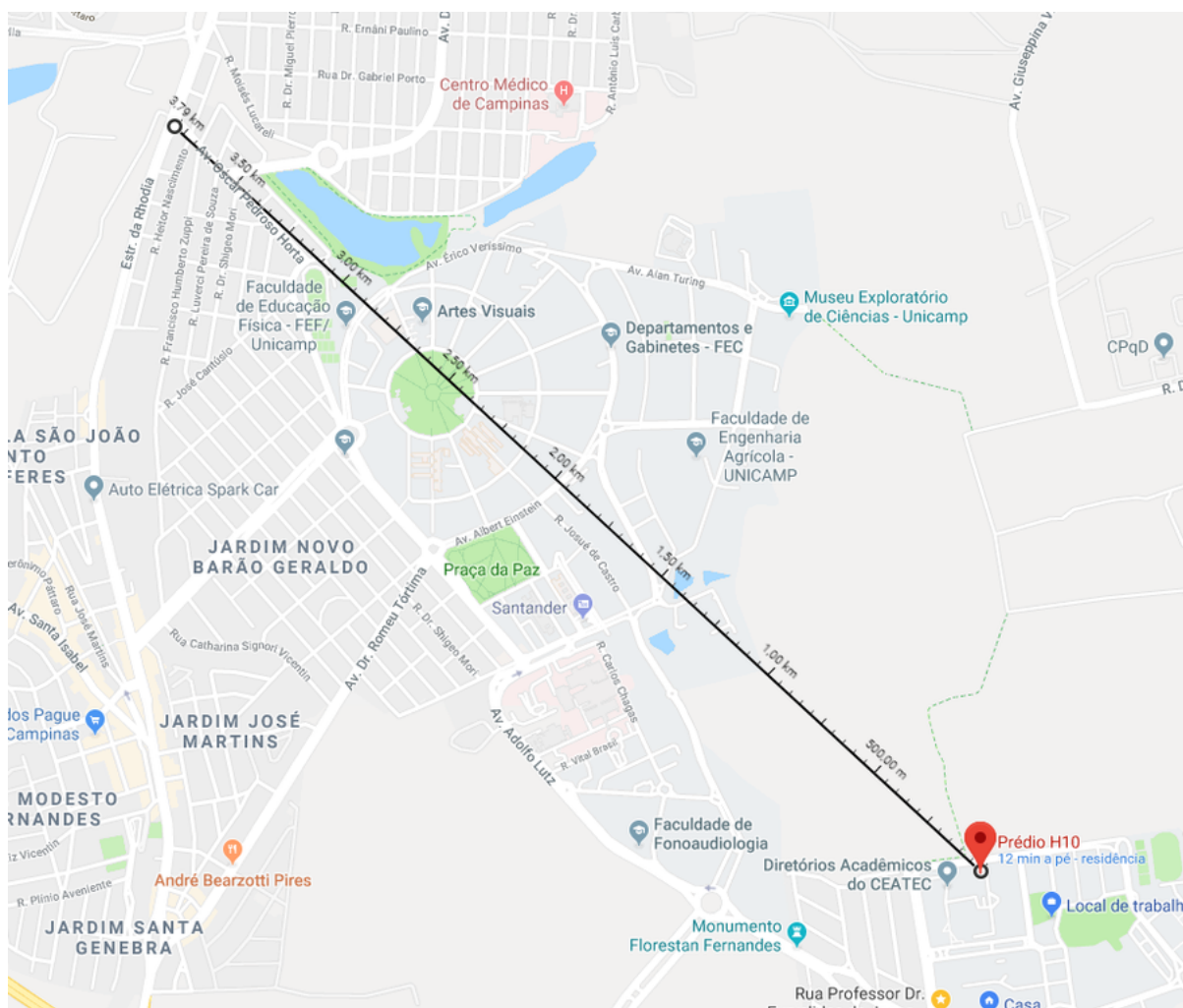
Figura 36 – Posicionamento nó-base e do nó-sensor nos testes com carro.



Fonte: Internet editado.

Teve-se como objetivo analisar o alcance máximo do transceptor RFM95W. O mapa na figura 37 mostra a distância alcançada pelo teste.

Figura 37 – Mapa para o teste de alcance.



Fonte: Google Maps adaptado.

Como *setup* foram utilizadas duas *Radio Board* com transceptores RFM95W, uma configurada como nó-base e outra como receptor. As antenas físicas foram as KLC omnidirecionais. O nó-base ficou localizada na cúpula do prédio CT, do Bloco C2, da PUC Campinas (figura 38) presa a um suporte tripé de 2,9m no andar externo da cúpula a aproximados 10m do solo, com visada direta para UNICAMP. A alimentação de energia foi feita por meio de uma fonte de 12V/1A ligada à rede elétrica em tensão de 127V.

Figura 38 – Terraço da cúpula do prédio CT, Bloco C2 da PUC-Campinas.



Fonte: Autor.

O receptor foi instalado em um tripé preso ao carro a 2,3m do solo, figura 39, sendo que a velocidade de locomoção do carro foi de, aproximadamente 30Km/h. A alimentação da *Radio Board* foi pela interface USB/FTDI de 5V diretamente ao *notebook*.

Figura 39 – Antena localizada no carro.



Fonte: Autor.

4.7 Sistema de Irrigação

Para exemplificar a aplicação de RSSF no agronegócio, foi implementado um sistema de irrigação, conforme descrito a seguir.

Em um sistema de irrigação os processos de abertura da válvula que dão início à irrigação podem ser basicamente 3:

- o mais simples é através da intervenção humana;
- o mais comercializado no mercado é o que utiliza temporizadores pré-configurados que modificam o estado de abertura e fechamento da válvula do sistema em função do tempo;
- o mais complexo é o que faz abertura automática a partir da leitura e análise dos sensores disponíveis, tais como sensores de umidade do solo, temperatura e umidade relativa do ar.

Em uma plantação real, a quantidade de água na irrigação é muito importante e tem que ser determinada corretamente, uma vez que o excesso pode resultar na eletrólise e a escassez pode causar desidratação e estatura reduzida da cultura.

Em um sistema que utiliza temporizador, existe a vantagem de a configuração ser simples. Ele se adequa muito bem a sistemas de plantio em locais fechados como a hidroponia, uma vez que fenômenos como a chuva não têm influência direta.

Em plantações em áreas abertas, o controle feito por pessoas é positivo, porém de alto custo. No caso de pequenos agricultores, em que uma única pessoa seja a responsável pelo cultivo, existe a possibilidade de a pessoa não estar disponível no momento necessário para a irrigação.

O processo de irrigação mais complexo é o efetuado a partir da leitura de sensores. De acordo com o tamanho da plantação, podem ser utilizados centenas de sensores, uma vez que para cada solo e cultivo existem necessidades específicas e se torna necessária uma calibração da leitura dos sensores individualmente.

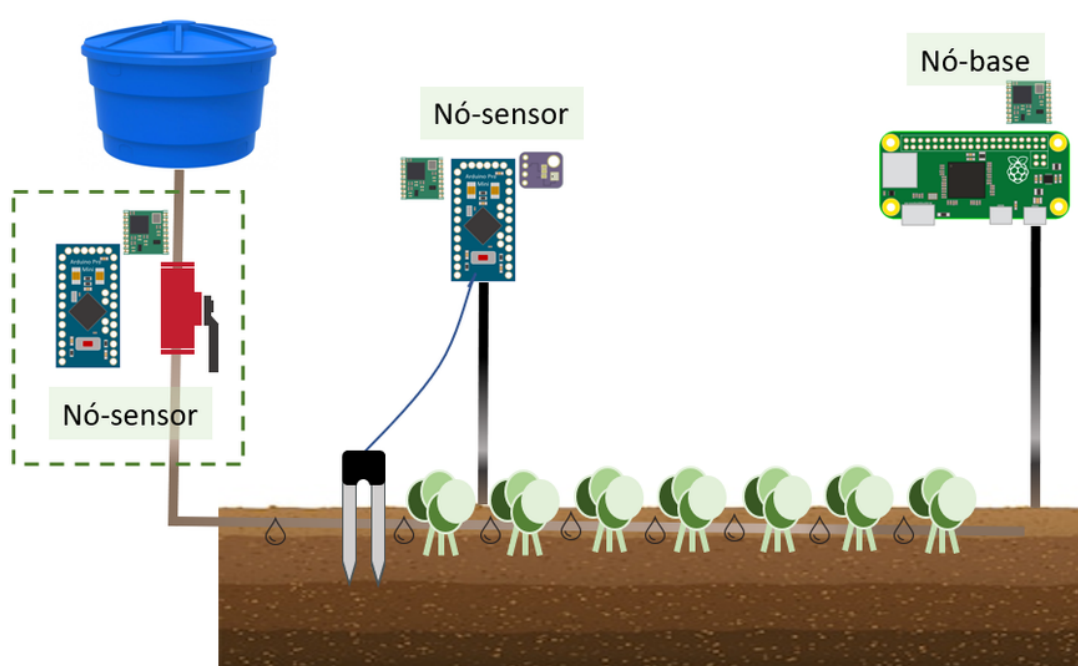
Neste trabalho, é proposto um sistema de irrigação com abertura e fechamento de válvula solenoide para liberar água ao solo, emulando uma plantação real. A pesquisa feita desde o início do trabalho visa oferecer uma RSSF como alternativa capaz de atender à demanda na área de plantio com as seguintes funcionalidades:

- Possibilidade de atuação humana local e remota;
- Possibilidade de configuração de temporizadores a partir de acesso remoto ao supervisor;

- Leitura e sensoriamento de umidade relativa do ar, temperatura, pressão barométrica (com possibilidade de abertura e fechamento de válvula solenoide) e umidade do solo.

A figura 40 apresenta uma das possibilidades quanto à disposição dos Sensores para leitura do ambiente, abertura e fechamento da válvula solenoide (localizada próxima à fonte de água) e os transceptores que, em conjunto com os microcontroladores, formam a RSSF.

Figura 40 – Exemplo básico de Sistema de Irrigação.



Fonte: Autor.

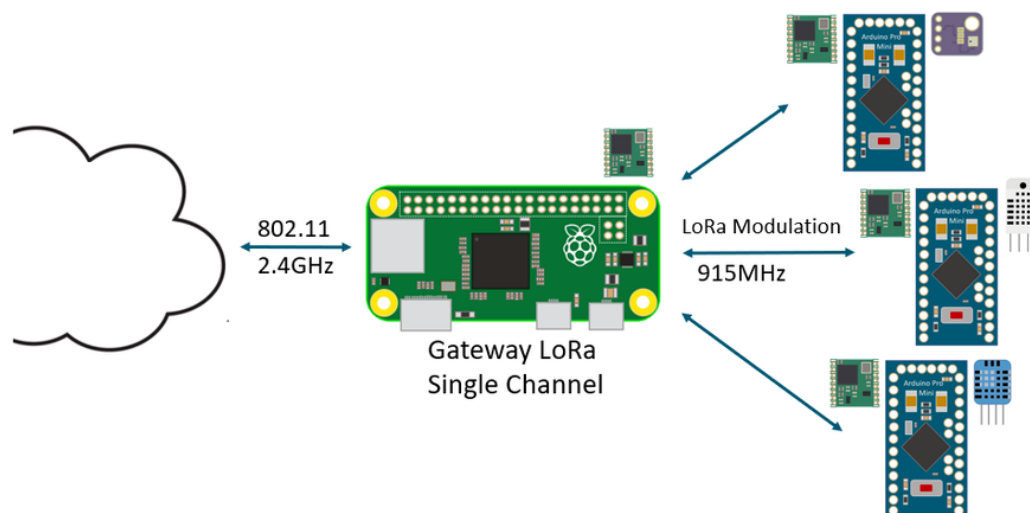
A infraestrutura de RSSF adotada é composta por um *Gateway* /Supervisório *single channel* com 1 transceptor nRF24L01 na frequência de 2.4GHz, conectado pela interface SPI.

Nessa etapa de testes poderia ter sido usado qualquer transceptor entre o LoRa, RFM69HCW e nRF24L01, porém o que apresentou maior facilidade de configuração física/*hardware* foi o nRF24L01 por possuir antena integrada e o alcance mínimo necessário para a aplicação proposta. Devido à utilização da plataforma MySensors a troca de modelos de transceptores é possível sem a necessidade de grandes alterações no *firmware*, bastando apenas trocar a definição que aciona a biblioteca específica do transceptor por hora utilizado.

Como nós-sensores, estão configurados 1 microcontrolador ATmega328P-PU na placa *Radio Board* do atuador com a funcionalidade de abrir e fechar a válvula-

solenóide e para monitoramento tem-se mais 2 Nós Sensores que oferecem leituras de monitoramento do ambiente e auxiliam na tomada de decisão. Essa é a configuração mínima. A figura 41 ilustra a infraestrutura da RSSF básica para essa aplicação.

Figura 41 – Infraestrutura *gateway* / Nó-sensor.



Fonte: Autor.

Em um sistema de irrigação real, dependendo do tamanho da área a ser coberta, podem ser necessários centenas de nós-sensores.

Outro fator de muita importância é o custo. Em um *setup* mínimo para construção de um sistema de irrigação, é necessário um investimento em *hardware* de aproximadamente R\$269,00 conforme a tabela 6.

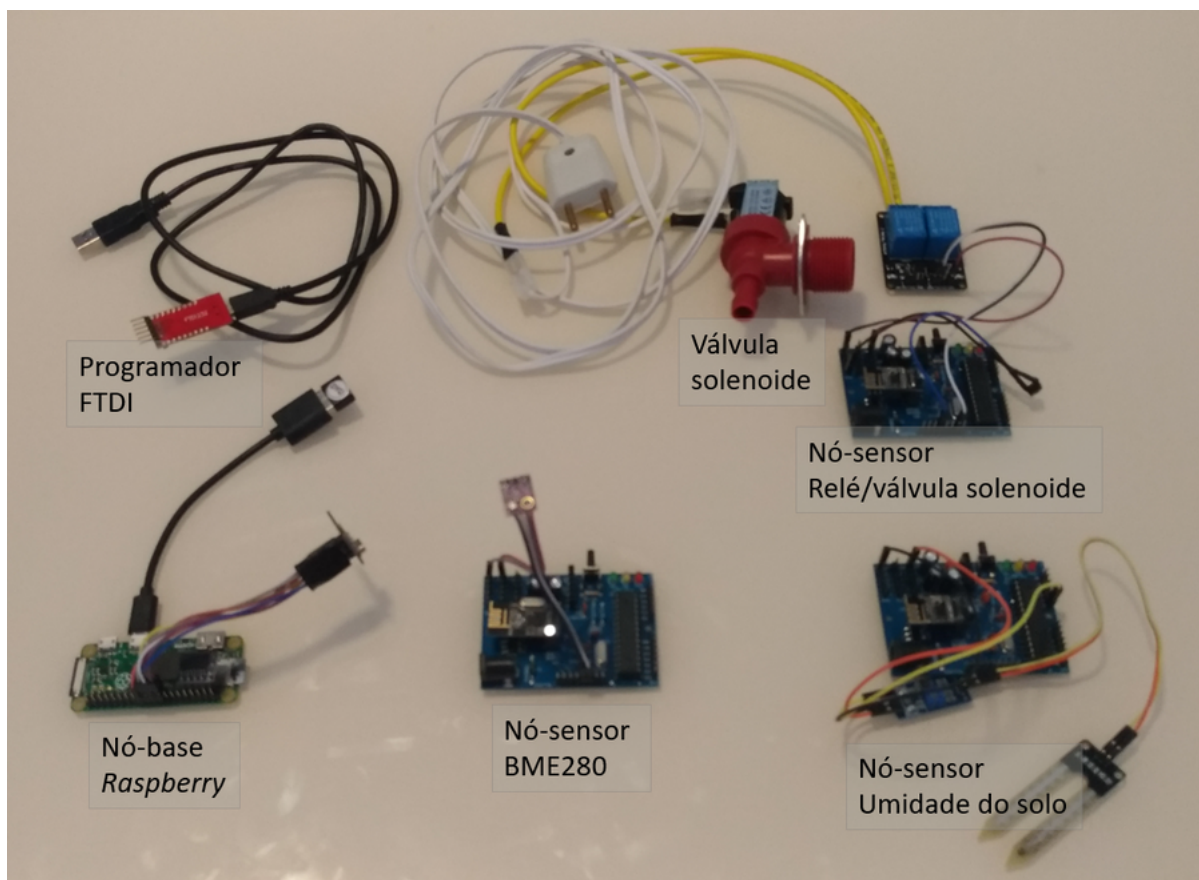
Tabela 6 – Componentes Sistema de Irrigação.

ID	Componente	Qtd.	Valor
1	BME280	1	R\$ 35,00
2	Sensor Umidade do Solo	1	R\$ 12,00
3	Relé de 2 canais	1	R\$ 15,00
4	Válvula solenoide 220V	1	R\$ 8,00
5	<i>Radio Board + nRF24L01</i>	3	R\$ 63,00
6	<i>Raspberry PI zero + nRF24L01</i>	1	R\$ 120,00
7	Adaptador de rede IEEE802.11n	1	R\$ 10,00
8	Programador FTDI		R\$ 6,00
		Total	R\$ 269,00

Fonte: Autor

Uma vez que a infraestrutura é construída, a RSSF também pode ser utilizada para outras finalidades do agronegócio através das leituras de grandezas e atuação no ambiente. Um exemplo é a logística da produção desde o plantio até a mesa do consumidor que pode ser implementada gradativamente. A figura 42 apresenta na cor verde o *gateway Raspberry PI Zero*, acima uma válvula solenoide na cor vermelha e um relé de 2 canais, na cor azul as *Radio Boards* com os sensores de umidade do solo genérico e um sensor BME280 da Bosch.

Figura 42 – Componentes do Sistema de Irrigação.



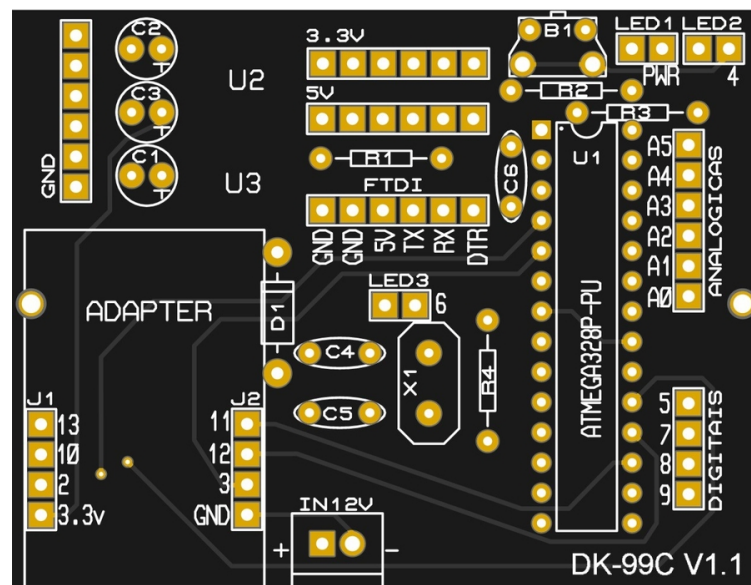
Fonte: Autor.

5 Resultados

5.1 Resultados da placa *Radio Board*

O primeiro resultado alcançado foi a construção de uma placa de desenvolvimento capaz de receber adaptadores com diferentes módulos transceptores. Sua primeira versão, o DK99C, na figura 43, visava oferecer praticidade nos testes e compreensão sobre os mecanismos que compõem o funcionamento e a construção do *hardware* para RSSF.

Figura 43 – Desenho da placa de desenvolvimento DK-99C.



Fonte: Autor.

Na sequência, vieram as versões DK99M e a *Radio Board*.

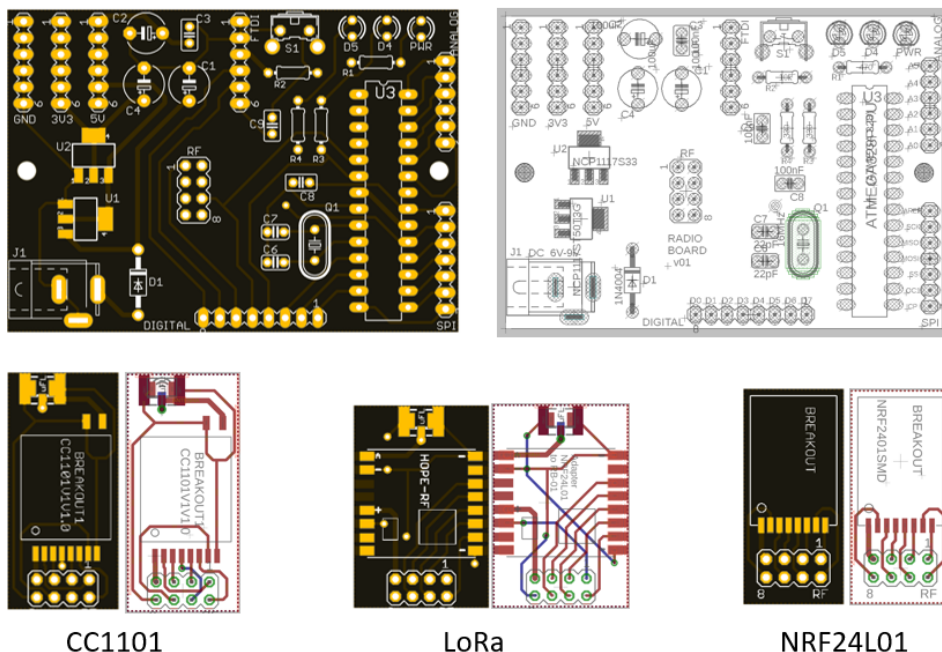
A placa DK99M trouxe a correção de erros nas trilhas do botão *Reset* e a disposição dos 8 pinos dos adaptadores de rádio para 2x4.

Por último, a versão denominada *Radio Board* manteve a disposição dos pinos dos adaptadores em 2x4 modificados em ordem de disposição para atender por padrão o rádio nRF24L01. Outra característica da *Radio Board*, que não estava acessível nas versões anteriores, é a possibilidade de incluir mais dispositivos SPI, pois os pinos MISO, MOSI e SCK encontram-se disponíveis para configuração nessa última versão.

A placa conta, também, com 6 conexões GND, 6 VCC 3.3v, 6 VCC 5V, conector jack de energia 2.1x5.5mm, conexão de DTR, TX e RX para programador FTDI e portas digitais e analógicas acessíveis por pinos *Dupont 2.54mm*. Desta forma, foi possível explorar e manter disponíveis todas as principais funcionalidades do microcontrolador ATMEGA328P-PU.

A figura 44 apresenta a *Radio Board* e os respectivos adaptadores. São eles da esquerda para direita: CC1101, LoRa/RFM69HCWe nRF24L01 versão SMD.

Figura 44 – Radio Board e adaptadores.



CC1101

LoRa

NRF24L01

Fonte: Autor.

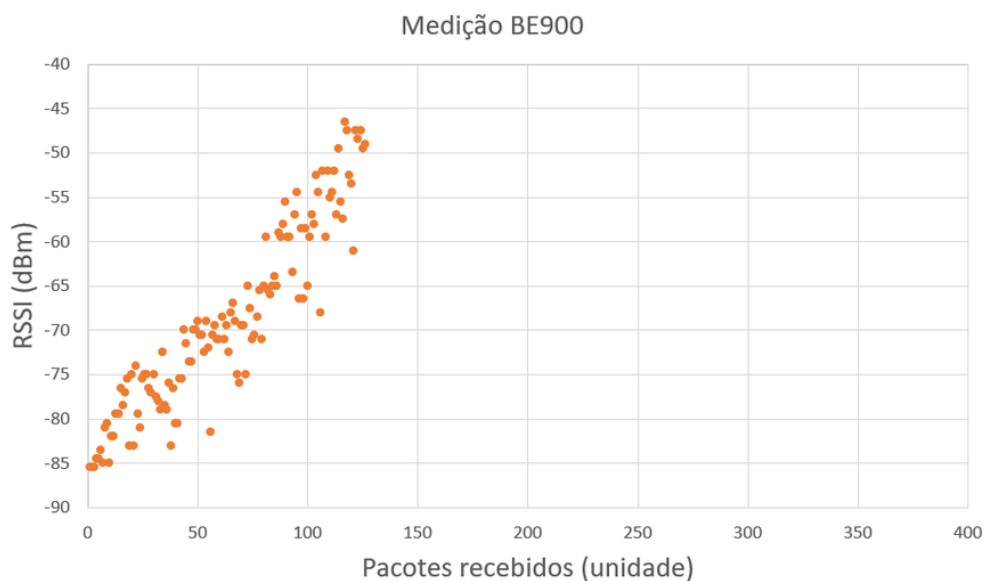
5.2 Resultados dos Testes com o CC1101

No primeiro comparativo, foram utilizados 2 rádios BE900 e 2 rádios CC1101 CDEByte. Todos os equipamentos utilizavam o microcontrolador (ATMega328) e, para ambos, foram oferecidas as mesmas condições para realização dos testes.

Para a realização desses testes, foi escolhida a Rua Professor Dr Euryclides de Jesus Zerbini, 1841, Campinas, São Paulo, Latitude e Longitude 22°50'11.3"S 47°02'59.9"W, por apresentar 100m de visada direta. Ao iniciar do ponto mais distante o rádio da CDEByte apresentou RSSI de -65dBm e o BE900 não se comunicou. Em movimento de passo de caminhada, o rádio BE900 passou a se comunicar, com RSSI de -85.5dBm, a 45m do nó- base.

A figura 45 apresenta a disposição dos pacotes recebidos durante todo o teste utilizando o transceptor BE900 (CCC1101) em relação a potência de sinal RSSI em dBm que teve 45m de distância no total.

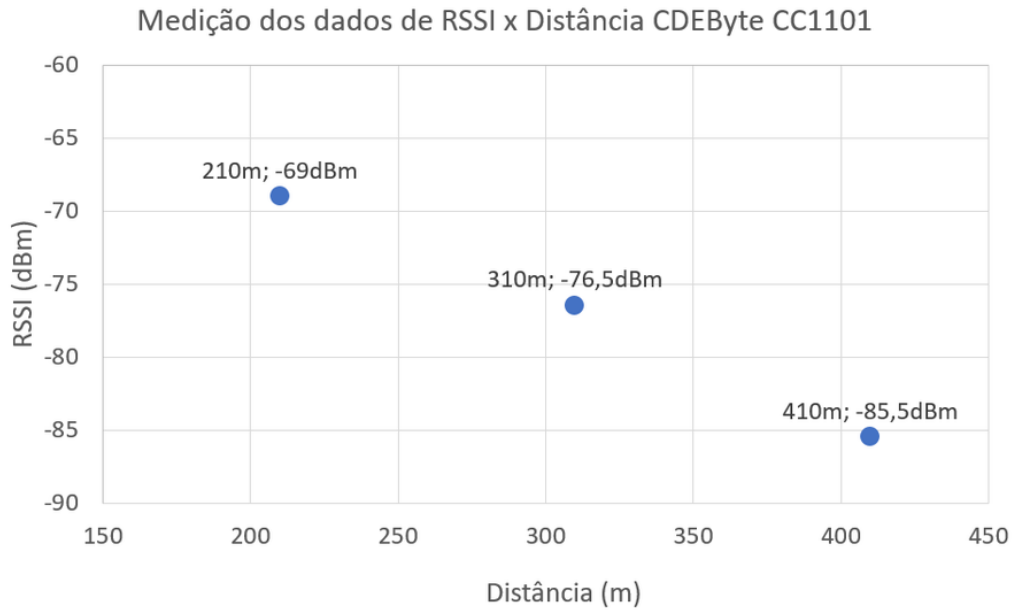
Figura 45 – Medição BE900.



Fonte: Autor.

O procedimento para configuração de todos os rádios foi o mesmo. Para confirmar os resultados, foi realizado um deslocamento até o parque Taquaral na Av. Dr Heitor Penteado, Campinas, São Paulo, aproximadamente número 2041A, Latitude e Longitude 22°52'20.1"S 47°02'57.0"W, 10 metros antes da placa indicadora de 0 metros como ponto de partida do nó-base e na marca 400 metros com o nó-sensor CDEByte. Obteve-se, com sucesso, a comunicação entre os pontos a 410 metros de distância com -85.5dBm, a 310m com -76.5dBm, a 210m -69.0dBm, conforme figura 46.

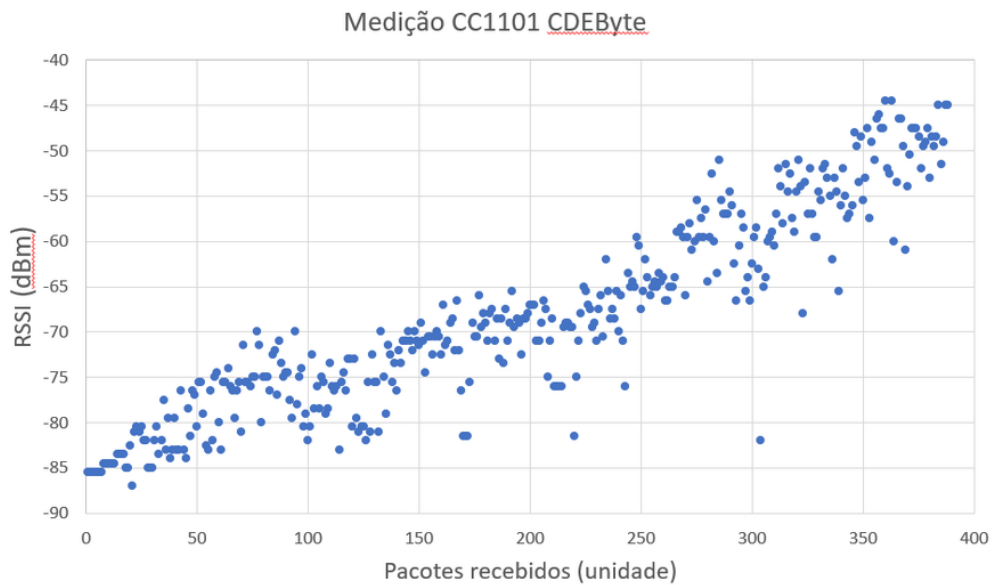
Figura 46 – RSSI x Distância CDEByte CC1101.



Fonte: Autor.

A figura 47 ilustra a disposição dos pacotes recebidos durante todo o teste utilizando o transceptor CDEByte CC1101 em relação a potência de sinal RSSI em dBm, que teve 410m de distância no total.

Figura 47 – Medição CC1101 CDEByte RSSI x Pacotes recebidos.

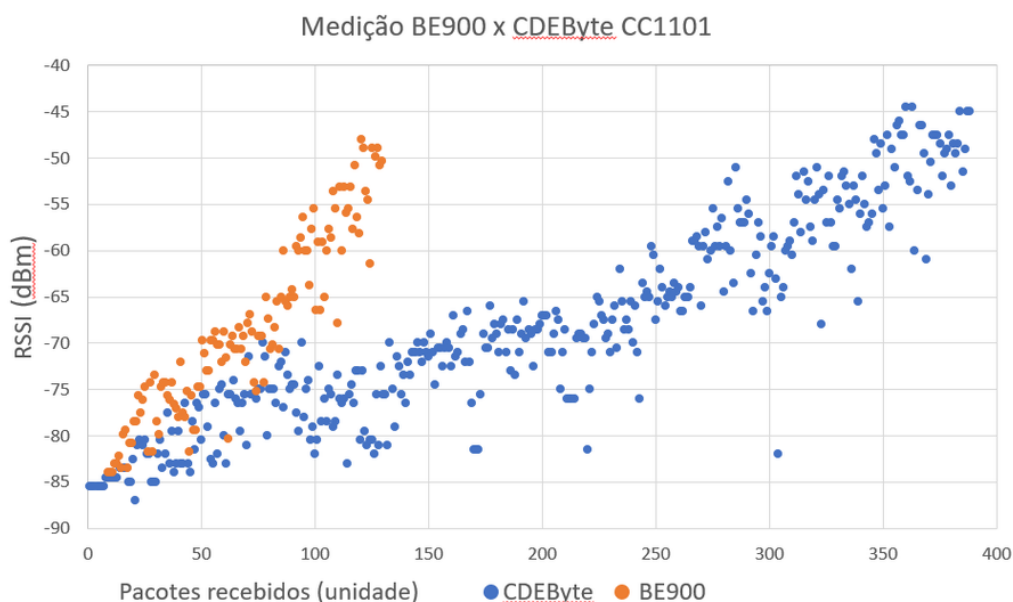


Fonte: Autor.

Em uma comparação entre o BE900 e o CC1101 em relação aos pacotes recebidos em visada direta observa-se um padrão na forma como o sinal varia de

aproximados -85 dBm para -45 dBm em leitura da maior distância para menor do receptor em relação ao nó-base conforme a figura 48.

Figura 48 – Comparação BE900 x CDEByte (Pacotes recebidos).



Fonte: Autor.

Confirmou-se, através dos resultados dos testes que o CC1101 da CDEByte oferece ao meio acadêmico uma alternativa ao BE900, apresentando bom funcionamento e melhor custo.

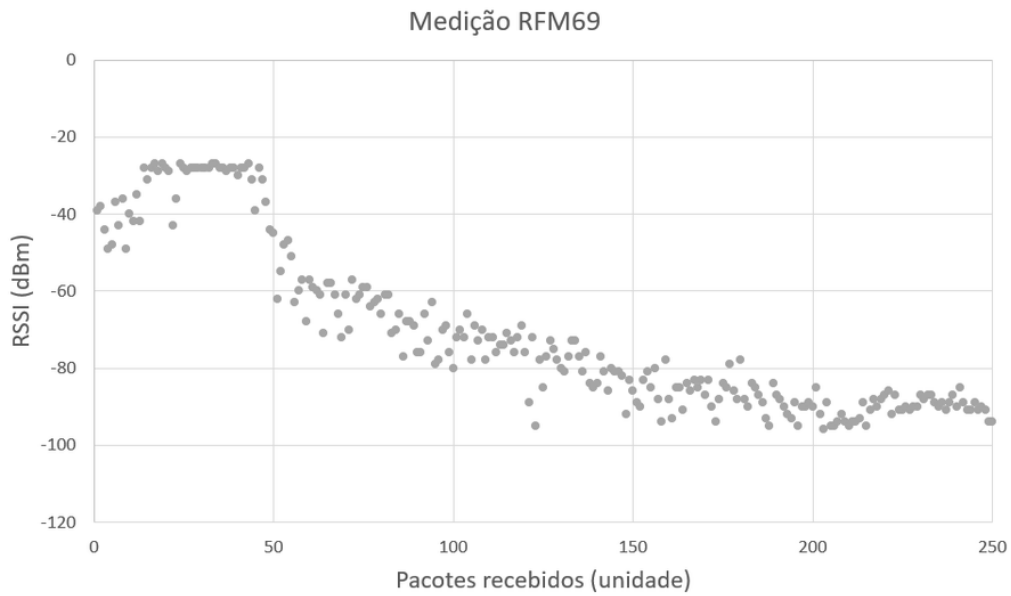
5.3 Resultados dos testes com o RFM69HCW

No dia 20 de outubro de 2018 foi realizado o teste de alcance do transceptor RFM69HCW na cidade de Registro (SP). Não foi possível repetir o teste no mesmo local dos testes anteriores com o transceptor CC1101 devido o teste com o CC1101 ter sido feito em uma via que ficava fechada para carros apenas aos domingos o que se mostrou impossível de incluir no calendário, outro fator era a necessidade de um maior alcance visto que na via anterior havia limitação de 410m. Uma última observação é que no teste de alcance com visada direta do transceptor RFM69HCW buscou-se o máximo de equidade ao teste do CC1101.

A leitura de RSSI com visada direta disponível para o teste era de 488 metros, após essa distância havia um declive que deve ser considerado como responsável pela queda da comunicação a 698 metros. Acredita-se que seria possível melhor qualidade em local com visada direta maior, porém grandes áreas para medição de alcance são difíceis de ser encontradas.

O gráfico na figura 49 apresenta a relação entre o RSSI e a quantidade de pacotes recebidos obtidas durante a medição, que teve como nó- base TX o carro estacionado no acostamento com tripé a 2,30 metros, e outro tripé como RX que foi levado a velocidade de caminhada a pé.

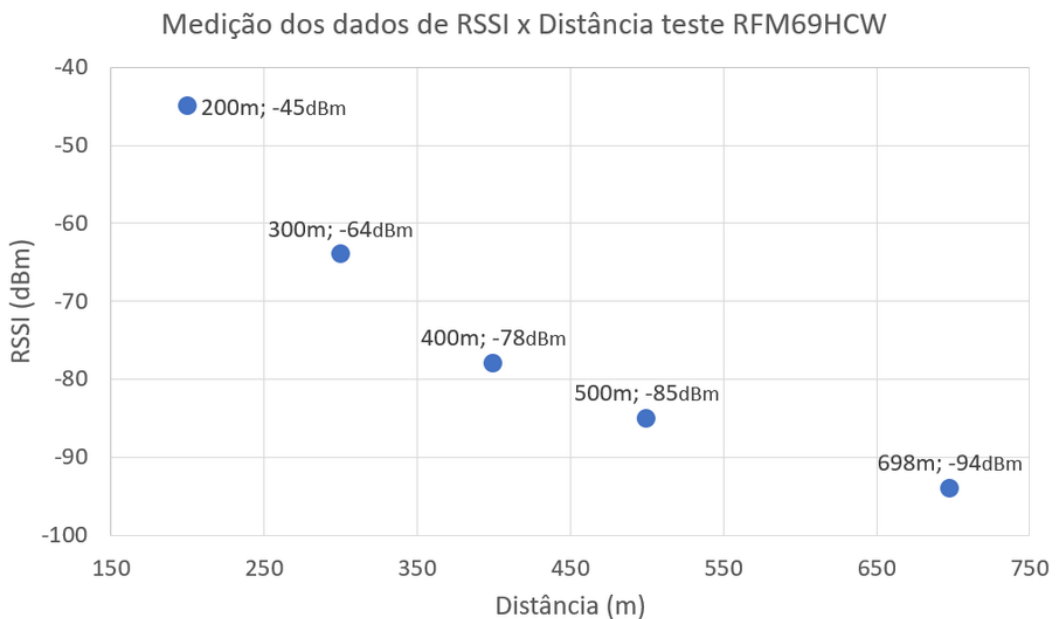
Figura 49 – Medição RFM69HCW.



Fonte: Autor.

A figura 50 mostra a leitura de RSSI x Distância em alguns pontos da medição.

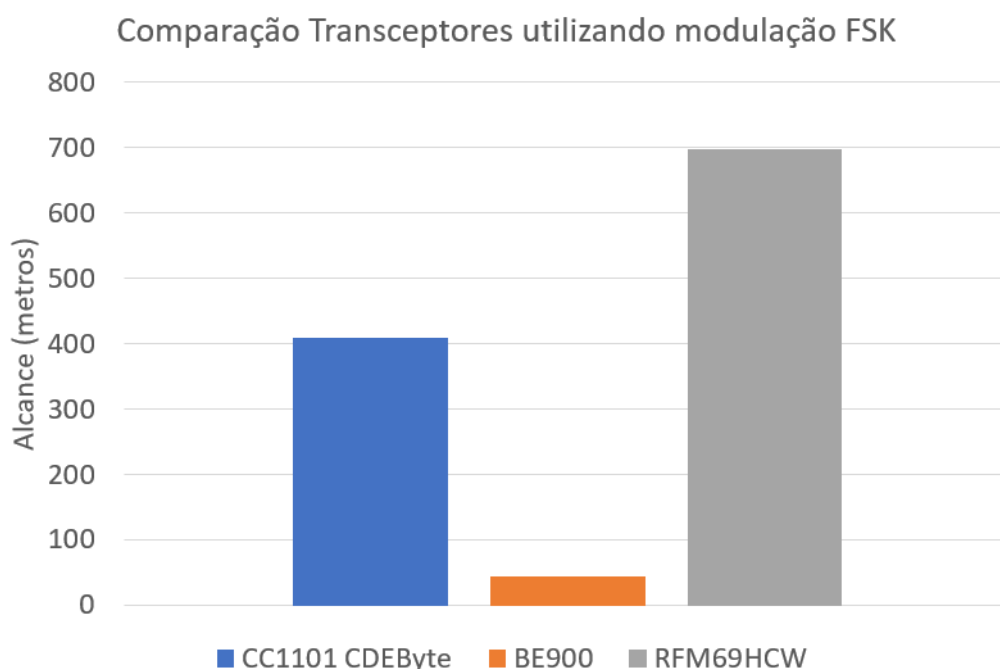
Figura 50 – RSSI x Distância RFM69HCW.



Fonte: Autor.

Em uma comparação entre os três transceptores que utilizam modulação FSK, que são respectivamente o BE900, CDEByte CC1101 e o RFM69HCW, tem-se a seguinte relação em função do alcance em metros dos dados medidos conforme a figura 51.

Figura 51 – Comparação transceptores modulação FSK.



Fonte: Autor.

5.4 Resultados dos Testes com o LoRa

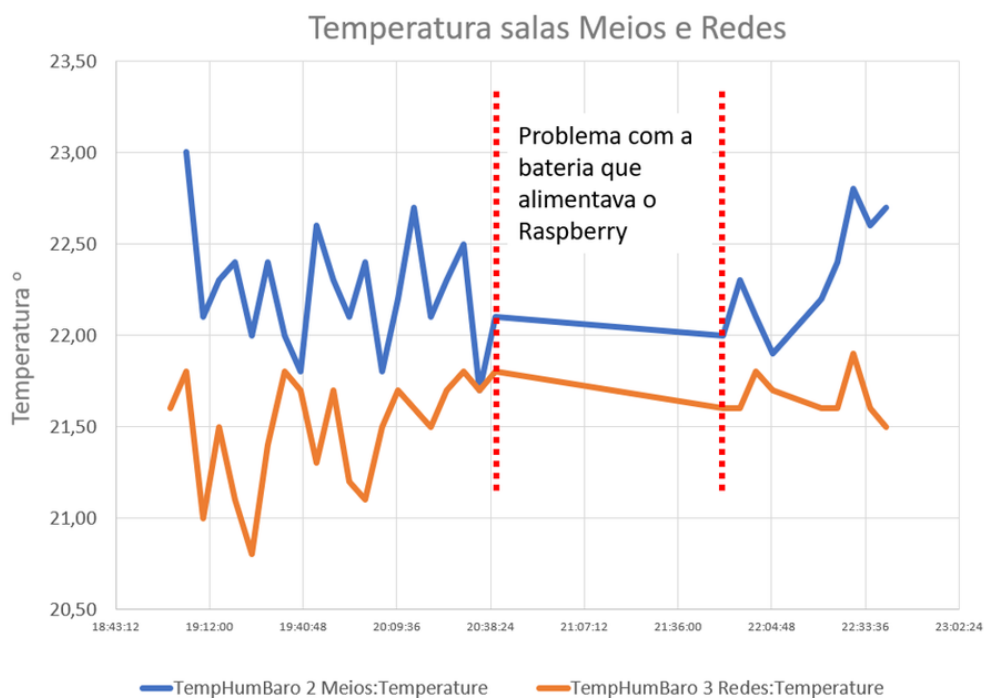
5.4.1 Resultado dos testes em ambiente fechado

Nos testes utilizando LoRa, nos laboratórios de Redes, Meios, Fotônica, corredor de ligação dos laboratórios de Redes, Meios e Sala dos Técnicos da PUC-Campinas, foram feitas coletas de dados referentes à temperatura, à umidade e à pressão barométrica. Apesar de o nó-sensor no Laboratório de Fotônica estar distante aproximadamente 20 metros do nó-base e existirem algumas paredes como obstáculos, devido ao alto poder de penetração do LoRa a comunicação não apresentou problemas.

O sensor BME280 apresentou-se estável e com bom funcionamento, sendo que os nós-sensores funcionaram adequadamente com as pilhas AA. E o *Raspberry* alimentado por uma bateria de 2.1 A apresentou algumas falhas que foram solucionadas ao trocar a alimentação para a rede elétrica convencional com uma fonte de 3 A. A figura 52 apresenta dados de temperatura comparados entre o laboratório de Meios (azul) e o de Redes (laranja). Os dados coletados nesses laboratórios sofrerem maiores

alterações em função da constante movimentação de alunos e ao seu sistema de acionamento do ar condicionado serem por compressor rotativo o que gera uma melhor visualização do funcionamento dos sensores que captam o ambiente.

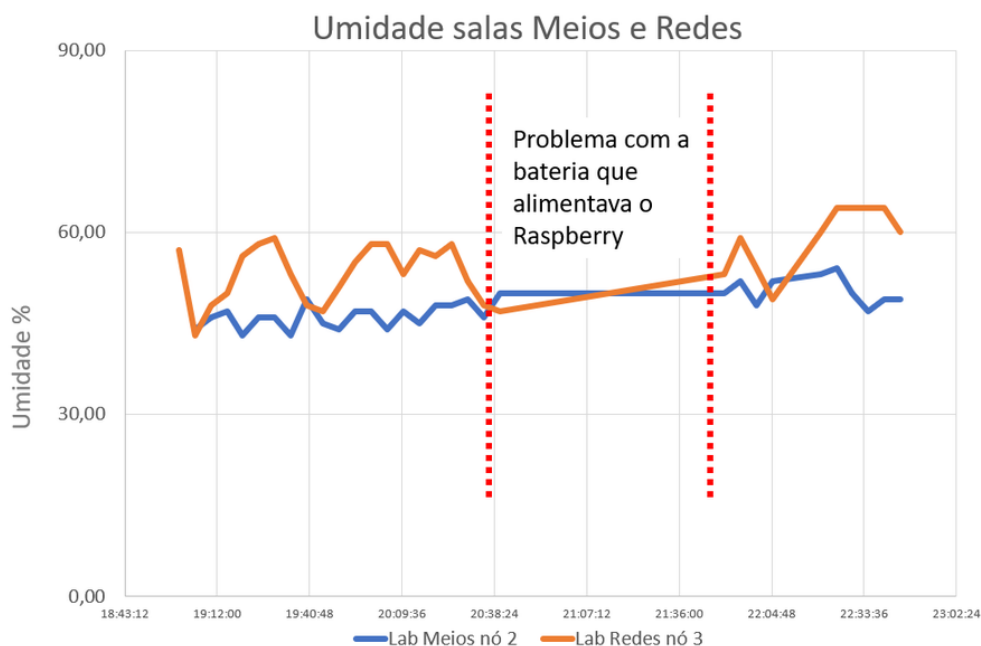
Figura 52 – Comparativo temperatura.



Fonte: Autor.

Foram coletados também, dados de umidade dos laboratórios que podem ser visualizados na figura 53.

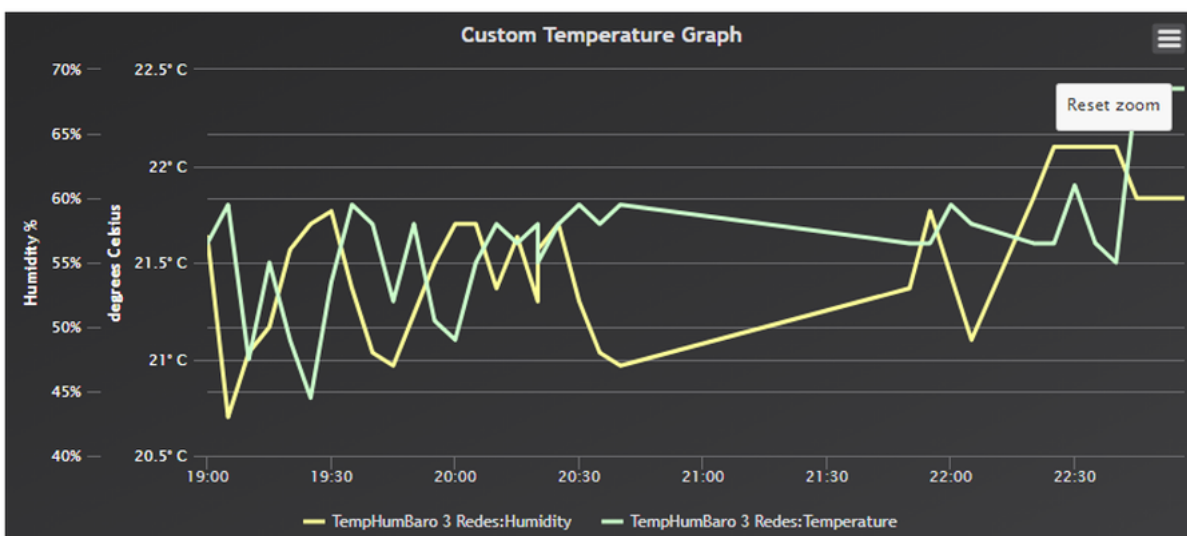
Figura 53 – Comparativo umidade.



Fonte: Autor.

Ao utilizar a ferramenta DOMOTICZ, obtém-se também gráficos gerados e um comparativo entre a relação da umidade e temperatura segundo a figura 54.

Figura 54 – Comparativo da relação entre umidade e temperatura para os dois laboratórios.



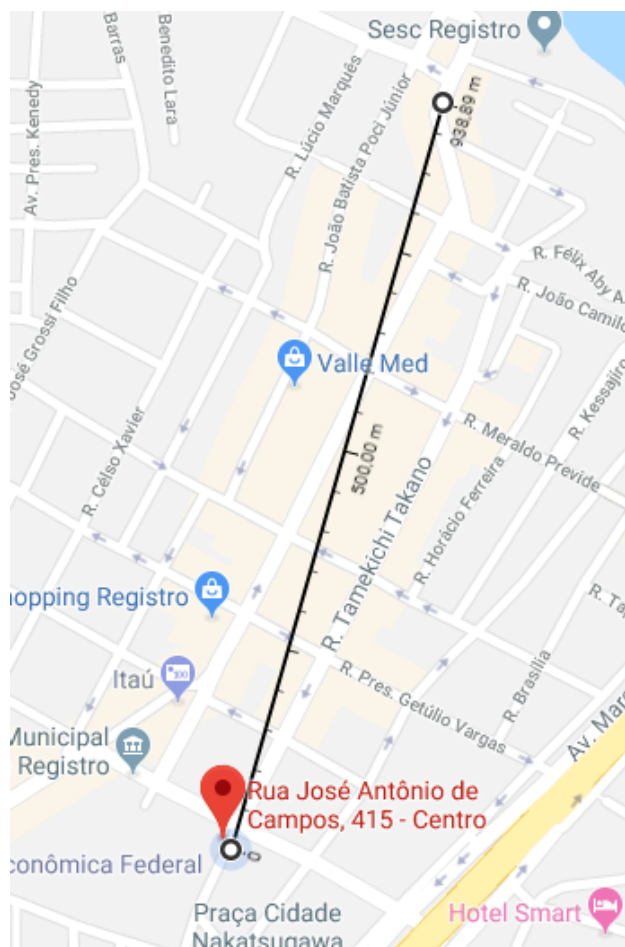
Fonte: Autor.

A biblioteca *Radiohead* adaptada apresentou-se estável e com um custo de processamento baixo em relação à biblioteca *Libelium*, sendo que os picos de processamento ficaram em 15% o que é um resultado que pode ser considerado como bastante adequado.

5.4.2 Resultados dos testes urbanos na cidade de Registro (SP)

Mesmo tratando-se de uma área irregular com aclives e declives, repleta de edificações de até 4 andares que geravam interferência na transmissão, foi obtido o resultado com alcance de cerca de 930m (figura 55). Somente a partir desse ponto teve início a queda da comunicação.

Figura 55 – Teste urbano Registro-SP.



Fonte: Google Maps adaptado.

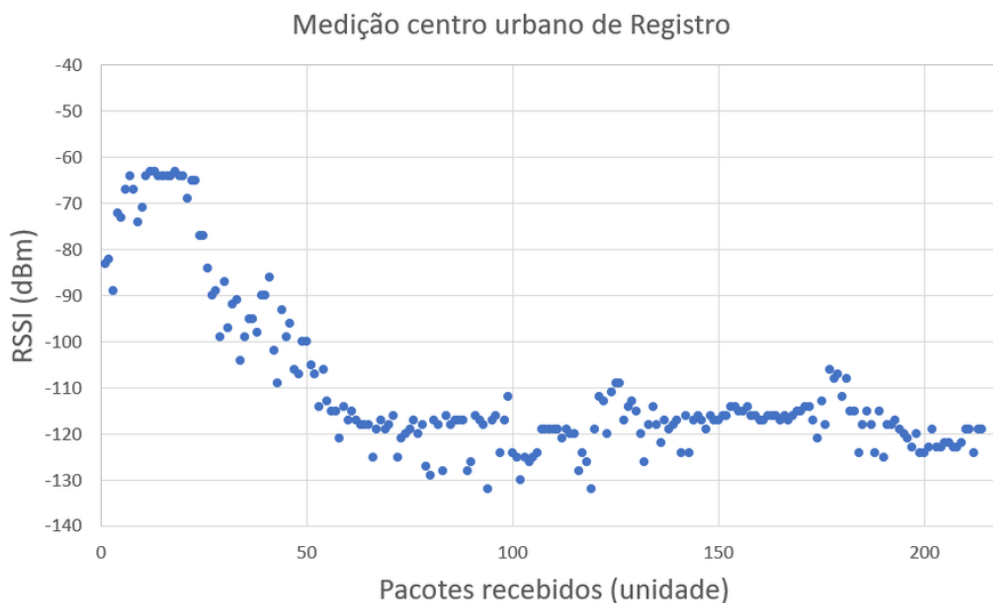
Nos teste com o nó-base no primeiro andar do prédio e o nó-sensor a 1,6m do solo o alcance máximo obtido foi de 200m, enquanto que modificando o *setup* para nó-base no quarto andar e o nó-sensor a 2,3 metros o alcance foi de aproximados 938m devido à menor interferência na comunicação. Após a realização dos testes ficou claro que a altura do posicionamento das antenas tanto do transmissor quanto do receptor tem influência direta ao resultado de alcance.

Outras configurações podem ser montadas, mas os resultados obtidos na segunda etapa dos testes foram positivos e mostraram que o LoRa tem alto poder de penetração, mesmo em áreas urbanas sujeitas à interferência de edificações, o que é o

caso do espaço urbano em que foram realizados os testes.

A figura 56 mostra que o sinal se estabiliza a aproximadamente 110 dBm no demonstrativo da relação de pacotes recebidos e a potência de sinal RSSI.

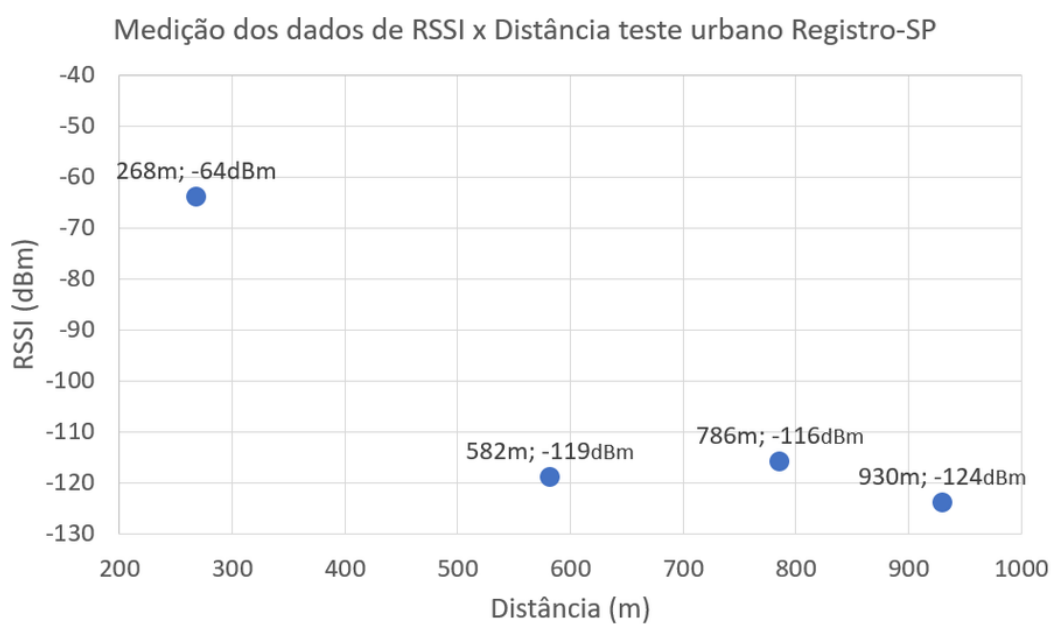
Figura 56 – Medição com o LoRa no centro urbano de Registro (SP).



Fonte: Autor.

A figura 57 mostra a leitura de RSSI x Distância em alguns pontos da medição.

Figura 57 – RSSI x Distância LoRa Registro (SP).



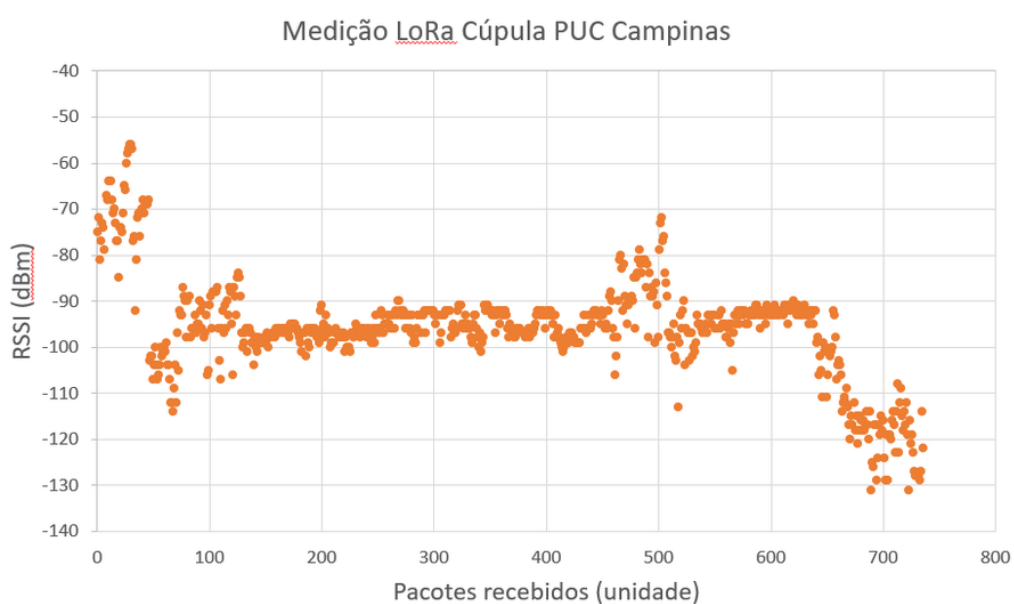
Fonte: Autor.

5.4.3 Resultados dos testes na cúpula da PUC-Campinas

O teste na Cúpula do Prédio CT/C2 da PUC-Campinas foi feito para confirmar a capacidade do LoRa quanto ao alcance de transmissão. Foi percorrido o trajeto desde o estacionamento da PUC até o final da Avenida Oscar Pedroso Horta (22°48'31.0"S 47°04'41.9"W), onde se verificou um RSSI de -129 dBm e um alcance de 3,79 Km.

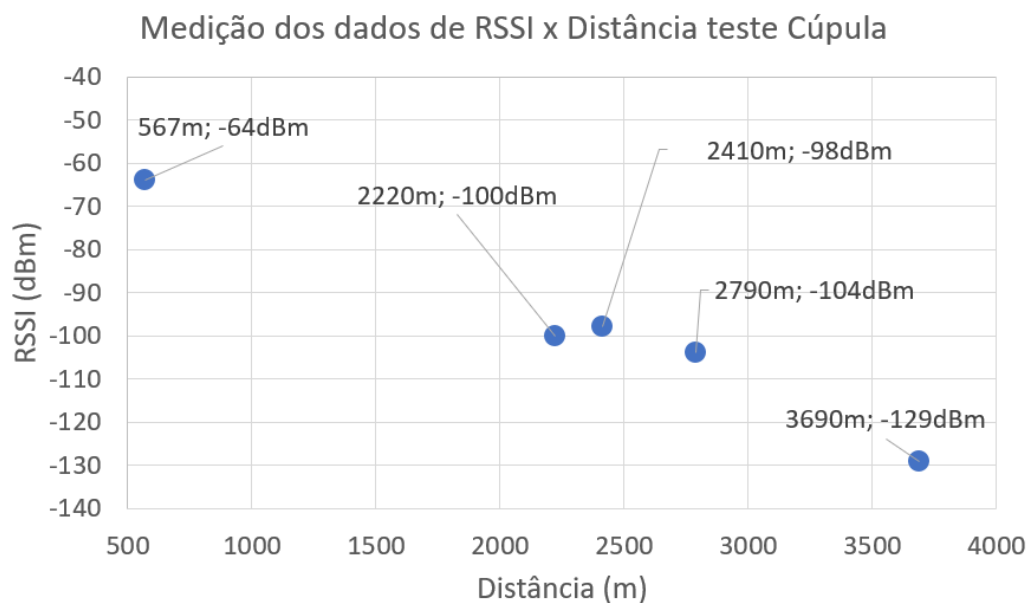
A figura 58 ilustra o RSSI do sinal em função do número de pacotes recebidos, próximo ao pacote de número 500 percebe-se uma melhora no sinal que se deve a leitura dos dados nesse momento estar com menos interferência.

Figura 58 – Medição com o LoRa na Cúpula da PUC-Campinas.



Fonte: Autor.

A figura 59 mostra a leitura de RSSI x Distância em alguns pontos da medição.

Figura 59 – RSSI x Distância LoRa teste cúpula PUC-Campinas.

Fonte: Autor.

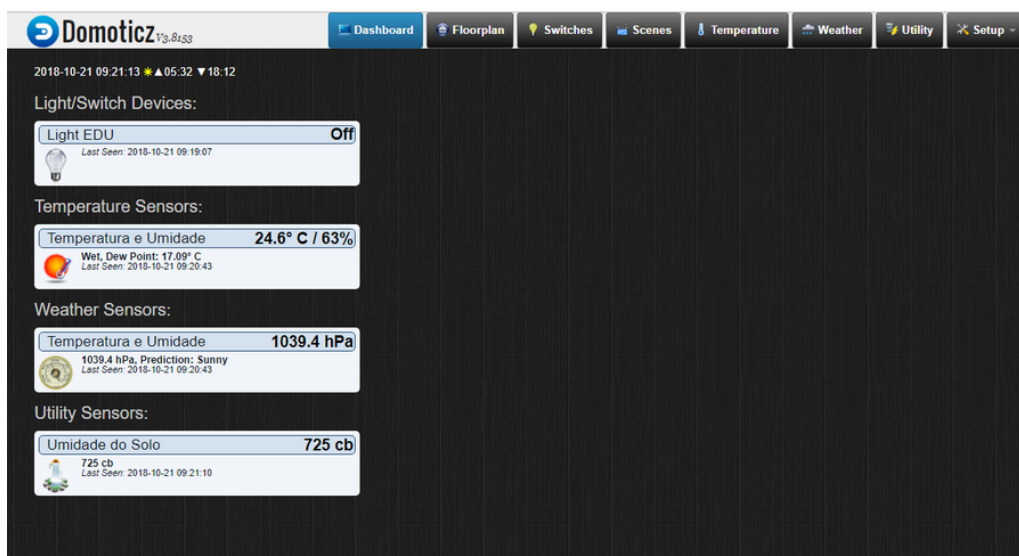
Nesse teste, foi possível compreender que as RSSF têm-se mostrado uma boa opção quanto à última milha em redes de comunicação. Por oferecer alto poder de penetração em áreas densas com edificações sem necessitar de obras para passagem de cabos como o caso da fibra óptica.

Dessa maneira, os *gateways* poderão ser ligados às redes de fibra óptica dos sistemas padrão de telefonia já existentes e os dados obtidos através das RSSF poderão estar disponíveis na Internet de forma transparente para o usuário.

5.5 Resultados do Sistema de Irrigação

Nos testes para construção do Sistema de Irrigação (SI), foram utilizados 3 *Radio Boards* como nós-sensores e 1 *Raspberry PI Zero* como *gateway*/nó-base, todos se comunicando através de 4 transceptores nRF24L01. Nessa etapa de testes poderia ter sido usado qualquer transceptor entre o LoRa, RFM69HCW e nRF24L01 porém o que apresentava maior facilidade de configuração física era o nRF24L01 por possuir antena integrada e o alcance necessário para a aplicação proposta. A figura 60 apresenta a tela inicial do Domoticz já configurado com os sensores.

Figura 60 – Tela inicial do Domoticz para o Sistema de Irrigação.



Fonte: Autor.

O principal nó-sensor, denominado Light EDU, é o responsável pela abertura e fechamento da válvula solenoide. Também apresenta a funcionalidade de abertura e fechamento remoto por agendamento de horário e pode ser executado como consequência de programação em blocos conforme figura 61.

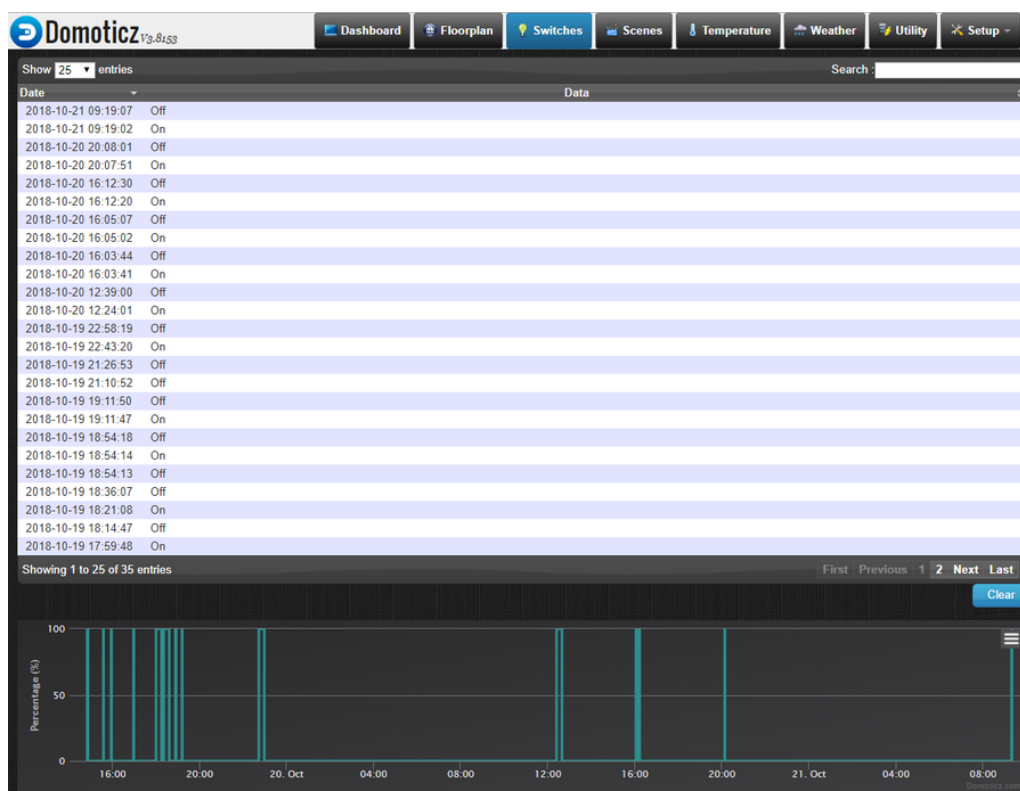
Figura 61 – Programação por blocos.



Fonte: Autor.

Outra característica do sensor é a geração de um log em tempo real com a data e hora das mudanças de estado do relé. A figura 62 apresenta relatório simplificado do estado de abertura (ON) e fechamento (OFF) da válvula que fica registrado na base de dados do sistema.

Figura 62 – Logs do relé.



Fonte: Autor.

O Sistema de irrigação também entrega dados referentes à umidade do solo com sensor de baixo custo, conforme figura 63. A configuração deste sensor genérico teve certa dificuldade e a leitura numérica ficou invertida em função da umidade do solo. Em trabalhos futuros sugere-se a utilização um novo sensor com fabricante que ofereça suporte.

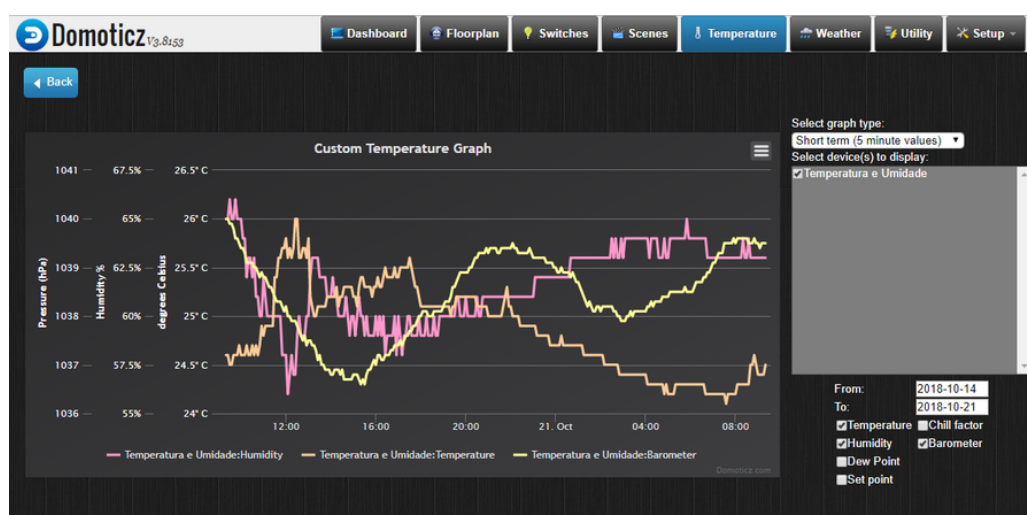
Figura 63 – Logs do Sensor de umidade do solo.



Fonte: Autor.

Finalmente o Sensor BME280 da Bosch, já testado anteriormente, com a tripla função de leitura da umidade relativa do ar, temperatura e pressão barométrica conforme figura 64.

Figura 64 – Sensor BME280 da Bosch.



Fonte: Autor.

6 Conclusão

Neste trabalho, foi proposta a implementação de uma RSSF para IoT de baixo custo e *open source*. Foi construído um *hardware* de referência chamado *Radio Board* que possibilitou a utilização de diferentes tipos de transceptores e se mostrou prático e funcional. Outro fator importante que envolveu a criação do *hardware* próprio é o controle total da aplicação desde a camada mais baixa até a interface do usuário, objetivo que foi alcançado no projeto.

Os testes iniciais foram realizados com o transceptor CC1101 que, ao utilizar o *hardware Radio Board* junto ao transceptor E07-915MS10 da CDEByte, apresentou resultados significativos de alcance de até 410 metros de distância entre o nó-sensor e o nó-base com visada direta. Configurado na frequência de 915MHz e sincronizando os canais com o *hardware* BE900, também foi possível a comunicação entre ambos de forma transparente. Vale ressaltar que a relação de custo do rádio construído foi de apenas 10% do valor praticado no mercado pelo BE900. Em contrapartida o desempenho com relação ao alcance foi superior em aproximadamente 911%.

Na mesma categoria, de médio alcance, testou-se o RFM69 que teve desempenho superior ao CC1101 com alcance de 698 metros, aproximadamente 70% melhor.

O transceptor nRF24L01 mostrou-se como principal opção quanto ao fator custo. Por ser amplamente comercializado e de fácil aquisição (mesmo no Brasil a um custo de R\$5,00) é o mais utilizado na escolha para composição de material didático para transmitir os conceitos de RSSF.

Quanto ao LoRa, obteve-se o resultado esperado para testes em ambiente fechado realizados na PUC-Campinas. No teste externo, em área urbana com obstáculos, a meta inicial de 1000 metros foi alcançada. Outro resultado expressivo foi o fato desse transceptor ser eficiente no percurso de 3,79 Km entre a cúpula do prédio CT, do Bloco C2, na PUC Campinas e a última medição na realizada na Cidade Universitária/UNICAMP.

O transceptor CC1101 já está há algum tempo no mercado, porém não tem compatibilidade com a plataforma *MySensors*. O *firmware* disponível para sua utilização é o da plataforma RADIUINO que tem por conceito 5 camadas. Apesar de ser *open source*, o RADIUINO não oferece documentação nem fórum para compartilhamento de dúvidas entre os usuários.

A construção dos dispositivos de IoT deu suporte para atender à necessidade de um Sistema de irrigação para o Agronegócio. No desenvolvimento da pesquisa, percebeu-se que a solução quanto à RSSF seria determinada em função da aplicação, o que levou à comparação, por meio de testes práticos, de quatro diferentes transceptores

que atendessem a diferentes especificações de alcance e custo e, dessa forma, ter opções para atender à demanda.

A escolha da RSSF para uma aplicação real de Sistema de Irrigação para o Agronegócio exige que seja feita uma análise no momento em que um local for escolhido para comportar o sistema, quesitos como tamanho da área e possíveis interferências no sinal são fundamentais para determinar qual o melhor transceptor a ser usado. Nos testes realizados foram observados os seguintes resultados, conforme a tabela 7.

Tabela 7 – Tabela comparativa transceptores LoRa, RFM69HCW e nRF24L01.

Transceptor	Alcance obtido	Aplicação no meio rural	Aplicação no meio urbano
Lora	3,79Km	Atende grandes áreas	Melhor escolha
RFM69HCW	698m	Atende médias áreas	Não testado em área urbana
nRF24L01	Não testado / < que 100m	Atende pequenas áreas	Não indicado

Fonte: Autor.

Numa situação ideal, onde o custo não seja relevante, a primeira escolha de rádio para construção de uma RSSF em soluções IoT para o agronegócio é, certamente, o transceptor LoRa que apresenta o melhor desempenho quanto ao fator alcance. Quando a área a oferecer cobertura for menor, entende-se que por ter um custo da ordem de 50% do LoRa, o RFM69HCW se apresenta como segunda melhor opção.

Para trabalhos futuros o foco em segurança, análise de consumo de energia e customização das ferramentas *open source* apresentadas nesse trabalho são de grande importância. A utilização da técnica adotada para a construção de novos dispositivos de baixo custo, deixa como legado acadêmico um *setup* que atende a situações específicas tanto no agronegócio quanto em outras áreas de IoT onde as RSSF se façam necessárias e sigam a mesma lógica de desenvolvimento.

Referências

- AB, E. Cellular networks for Massive IoT. v. 1, n. January, p. 1 – 13, 2016. Disponível em: <https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp_iot.pdf>.
- ABD-EL-BARR, M. I.; YOUSSEF, M. A. M.; AL-OTAIBI, M. M. WIRELESS SENSOR NETWORKS – PART I : TOPOLOGY AND DESIGN ISSUES Abstract. n. May, p. 1165 – 1168, 2005.
- ADELANTADO, F. et al. Understanding the Limits of LoRaWAN. n. September, p. 34 – 40, 2017.
- AIRSPAYCE. *RadioHead Packet Radio library for embedded microprocessors*. 2018. Disponível em: <<http://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/>>. Acesso em: 24/05/2018.
- ARDUINO. *A Brief Introduction to the Serial Peripheral Interface (SPI)*. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>>. Acesso em: 23/05/2018.
- ASÍN, A.; GASCÓN, D. Libelium White paper - 50 Real IoT success stories after ten years of experience in the market. 2017. Disponível em: <<http://www.libelium.com/resources/white-papers/>>. Acesso em: 13/05/2018.
- ATMEL CORPORATION. *8-bit AVR Microcontrollers ATmega328*. 2016. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Summary.pdf>. Acesso em: 22/05/2018.
- BHATTACHARYA, A.; VAUGHAN, R. The Antenna Correlation Coefficient in Wireless Sensor Networks Multipath environment and the antenna voltage correlation coefficient Correlation coefficient as the inner product of element patterns. n. August, p. 19 – 22, 2017.
- BOSCH. *BME280 Data Sheet*. 2018. Disponível em: <https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BME280_DS002-13.pdf>. Acesso em: 01/10/2018.
- CARRANCO, J. S. et al. Comparative analysis of meteorological monitoring using an integrated low-cost environmental unit based on the internet of things (IoT) with an automatic meteorological station (AWS). 2017.
- CARRILLO, D.; SEKI, J. Rural area deployment of internet of things connectivity: LTE and LoRaWAN case study. 2017.
- CDEBYTE E01-ML01D. *E01-ML01D Datasheet V1.0*. 2018. Disponível em: <<http://www.cdebyte.com/en/product-view-news.aspx?id=110>>. Acesso em: 01/10/2018.
- CDEBYTE E01-ML01DP5. *E01-ML01DP5 Datasheet V1.0*. 2018. Disponível em: <<http://www.cdebyte.com/en/product-view-news.aspx?id=109>>. Acesso em: 01/10/2018.
- CHENGDU EBYTE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD. *E07- 915MS10 Datasheet v 1.0*. 2017. Disponível em: <<http://www.cdebyte.com/en/downpdf.aspx?id=179>>. Acesso em: 18/11/2017.

DOMOTICZ. *Site sobre o Domoticz*. 2018. Disponível em: <https://www.domoticz.com/wiki/About_Domoticz>. Acesso em: 01/10/2018.

FACCHINI, F. et al. On the Performance of 169 MHz WM-Bus and 868 MHz LoRa Technologies in Smart Metering Applications. 2017.

FERRERO, F.; LIZZI, L.; LPWAN, A. Low-cost Antenna Technology for LPWAN IoT in Rural Applications. p. 121 – 126, 2017.

HIRATA, T.; TERADA, K.; TOYOTA, M. Proposal of a Power Saving Network for Rice Fields Using LoRa. n. Gcce, p. 2 – 5, 2017.

HOPE MICROELECTRONICS CO.,LTD. *RFM69HCW ISM TRANSCEIVER MODULE v1.1*. 2018. Disponível em: <<http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM69HCW-V1.1.pdf>>. Acesso em: 01/10/2018.

HOPERF MICROELECTRONICS CO.,LTD. *RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module V1.0*. 2018. Disponível em: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM95_96_97_98W.pdf>. Acesso em: 22/05/2018.

IBGE. *Brasil : uma visão geográfica e ambiental no início do século XXI*. 2016. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv97884.pdf>>. Acesso em: 12/05/2018.

KARL, H.; WILLIG, A. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 2005.

KENG, D.; KOO, S. G. M. Spatial Standards for Internet of Things. n. iThings, 2014.

KIM, D. H. et al. Design and implementation of object tracking system based on LoRa. p. 463 – 467, 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7899535/>>.

KLC CONECTORES. *Site fabricante nacional de Antenas*. 2018. Disponível em: <<http://www.klc.ind.br/2013/>>. Acesso em: 24/05/2018.

LACEY, B. et al. *Site MySensors*. 2018. Disponível em: <<https://www.mysensors.org/>>. Acesso em: 01/10/2018.

LAVRIC, A.; POPA, V. Internet of Things and LoRa TM Low-Power Wide- Area Networks : A Survey. 2017.

LIBELIUM. *Enabling the Smart Agriculture Revolution*. 2016. Disponível em: <<http://www.libelium.com/white-paper-enabling-the-smart-agriculture-revolution/>>. Acesso em: 13/05/2018.

LIBELIUM WASPMOTE. *Waspote-LoRa-868MHz_915MHz-SX1272*. 2017. Disponível em: <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote_lora_868mhz_915mhz_sx1272_networking_guide.pdf>. Acesso em: 24/05/2018.

LORA ALLIANCE. *What is the LoRaWAN™ Specification?* Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lorawan>>. Acesso em: 01/10/2018.

LORA ALLIANCE. *LoRaWAN 1.1 Specification*. 2017. Disponível em: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawan_tm_specification_-v1.1.pdf>. Acesso em: 24/05/2018.

- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *INTERCÂMBIO COMERCIAL DO AGRONEGÓCIO*. 2017. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/relacoes-internacionais/documentos/intercambio-comercial-do-agronegocio-10a-edicao/IntercambioComercial2017_web.pdf>. Acesso em: 12/05/2018.
- NORDIC SEMICONDUCTOR. *nRF24L01 Product Specification*. 2007. Disponível em: <<http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01>>. Acesso em: 24/05/2018.
- PENA, R. A. *O que é Agronegócio?* 2018. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-agronegocio.htm>>. Acesso em: 12/05/2018.
- PEREIRA, V. Q. Estimativa da PER, Protocolo de Coleta de RSSI e Determinação de Melhoras Rotas em RSSF. p. 100 –, 2016.
- PHAM, C.; RAHIM, A.; COUSIN, P. Low-cost, long-range Open IoT for smarter rural African Villages. 2016.
- RADIOIT ELETRÔNICA LTDA. *Datasheet – Especificações Técnicas, v 1.5*. 2012. Disponível em: <<http://www.radioit.com.br/datasheets/BE900-Datasheet-v1.5.pdf>>. Acesso em: 10/10/2017.
- RF WIRELESS WORLD. *LoRaWAN Classes | Class A, Class B, Class C | RF Wireless World*. 2017. Disponível em: <<http://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LoRaWAN-classes.html>>. Acesso em: 18/11/2017.
- RIVERA, J.; MEULEN, R. van der. *Gartner Says the Internet of Things Installed Base Will Grow to 26 Billion Units By 2020*. 2013. Disponível em: <<https://www.gartner.com/newsroom/id/2636073>>. Acesso em: 12/04/2018.
- ROOPAEL, M. et al. Cloud of Things in Smart Agriculture : Intelligent Irrigation Monitoring by Thermal Imaging. *IEEE CLOUD COMPUTING*.
- SATHISHKUMAR, J. Enhanced Location Privacy Algorithm for Wireless Sensor Network in Internet of Things. p. 208 – 212, 2016.
- SEMTECH. *AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, Application Note*. 2015. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>>. Acesso em: 15/02/2018.
- SEMTECH. *SX1301 Datasheet*. 2017. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1301.pdf>>. Acesso em: 24/05/2018.
- SILVA, L. R. B. da. *Método para aferição de distância entre nós sensores baseado em RSSI*. 2014. Dissertação (Mestrado). Disponível em: <<http://tede.bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br:8080/jspui/handle/tede/543>>.
- TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver*. 2017. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf>>. Acesso em: 18/11/2017.
- USMONOV, M.; GREGORETTI, F. Design and Implementation of a LoRa Based Wireless Control for Drip Irrigation Systems. 2017.

VARSIER, N.; SCHWOERER, J. Capacity limits of LoRaWAN technology for smart metering applications. 2017.

ZAMBALDE, A. L. et al. Internet social networks in Brazilian agribusiness: knowledge, webometry and interaction. p. 1 – 6, 2011.

ZIEGLER, S. Considerations on IPv6 Scalability for the Internet of Things – towards an Intergalactic Internet. v. 6, p. 4 – 7, 2017.

Anexos

ANEXO A – Medição de RSSI CDEByte CC1101

A tabela 6 testifica as medições apresentadas anteriormente no formato de gráfico. Os dados de RSSI estão dispostos na tabela em ordem decrescente de cima para baixo da esquerda para direita.

Tabela 8 – RSSI CDEByte CC1101.

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-85.5	-83.0	-75.0	-73.0	-67.0	-67.0	-66.0	-59.5	-51.0	-52.0
-85.5	-83.0	-75.0	-79.5	-71.5	-67.0	-71.0	-52.5	-54.0	-52.5
-85.5	-76.5	-76.5	-81.0	-71.0	-71.0	-76.0	-60.0	-68.0	-44.5
-85.5	-83.0	-72.5	-80.5	-69.0	-71.0	-63.5	-63.5	-53.5	-60.0
-85.5	-84.0	-72.0	-80.5	-68.5	-69.0	-65.0	-51.0	-57.0	-53.5
-85.5	-78.5	-77.0	-82.0	-72.0	-66.5	-64.5	-55.5	-52.0	-46.5
-85.5	-81.5	-71.0	-75.5	-66.5	-67.5	-65.0	-57.0	-57.0	-46.5

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-84.5	-76.5	-73.5	-81.0	-72.0	-75.0	-59.5	-57.0	-59.5	-49.5
-84.5	-77.0	-75.0	-72.5	-76.5	-71.0	-60.5	-57.0	-59.5	-61.0
-84.5	-80.5	-74.5	-75.5	-81.5	-68.5	-67.5	-54.5	-54.5	-54.0
-84.5	-75.5	-74.5	-75.5	-81.5	-76.0	-65.5	-56.0	-55.5	-50.5
-84.5	-75.5	-77.5	-81.0	-81.5	-76.0	-62.0	-62.5	-52.0	-47.5
-84.5	-79.0	-79.5	-70.0	-75.5	-76.0	-64.0	-66.5	-51.5	-47.5
-83.5	-82.5	-70.0	-75.0	-69.0	-76.0	-66.0	-60.5	-53.0	-47.5
-83.5	-83.0	-78.0	-79.0	-70.5	-69.5	-65.0	-57.0	-55.0	-48.5
-83.5	-76.5	-75.0	-71.5	-70.5	-69.0	-64.5	-58.5	-62.0	-52.0
-83.5	-82.0	-74.0	-72.5	-66.0	-69.0	-65.0	-65.5	-53.0	-49.5

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-85.0	-75.0	-80.5	-75.5	-69.5	-69.5	-63.5	-64.0	-54.5	-49.0
-85.0	-74.5	-79.0	-73.5	-68.0	-69.5	-64.5	-66.5	-65.5	-47.5
-82.5	-80.0	-82.0	-76.5	-69.0	-81.5	-64.0	-62.5	-56.0	-53.0
-87.0	-83.0	-80.5	-72.0	-71.0	-75.0	-66.5	-59.5	-52.0	-48.5
-81.0	-75.5	-72.5	-73.5	-68.0	-71.0	-66.5	-58.5	-55.0	-49.5
-80.5	-75.5	-78.5	-71.0	-67.5	-68.0	-65.0	-63.0	-57.5	-48.5
-81.0	-74.0	-76.0	-71.0	-71.0	-65.0	-65.0	-82.0	-57.0	-45.0
-80.5	-76.0	-78.5	-70.0	-68.5	-65.5	-64.0	-65.0	-56.0	-51.5
-82.0	-76.5	-75.0	-71.0	-73.0	-67.0	-59.0	-64.0	-48.0	-49.0
-82.0	-79.5	-75.5	-72.0	-68.5	-67.5	-59.0	-60.0	-49.5	-45.0

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-85.0	-76.5	-79.0	-70.0	-73.5	-69.5	-58.5	-59.5	-53.5	-45.0
-85.0	-75.5	-78.5	-71.0	-67.5	-69.0	-59.5	-59.0	-48.5	
-85.0	-81.0	-73.5	-71.5	-71.0	-71.0	-66.0	-60.5	-55.5	
-82.0	-71.5	-76.0	-69.0	-69.0	-67.5	-59.5	-57.0	-53.0	
-80.5	-75.5	-76.5	-71.0	-65.5	-66.0	-58.0	-52.0	-47.5	
-83.5	-75.5	-76.0	-74.5	-69.5	-70.5	-61.0	-54.0	-57.5	
-82.0	-76.0	-83.0	-70.5	-68.5	-62.0	-60.0	-58.0	-49.0	
-77.5	-75.0	-75.5	-70.5	-69.0	-65.5	-55.5	-51.5	-51.0	
-83.0	-75.0	-74.5	-72.5	-72.5	-68.5	-59.5	-54.5	-46.5	
-79.5	-70.0	-76.5	-70.5	-68.5	-67.5	-57.5	-52.5	-46.0	

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-84.0	-71.5	-73.0	-70.0	-68.5	-68.5	-59.5	-57.5	-47.5	
-83.0	-80.0	-73.0	-70.5	-68.0	-65.5	-56.5	-59.0	-47.5	
-79.5	-75.0	-80.5	-72.5	-67.0	-70.0	-64.5	-54.5	-44.5	

Fonte: Autor.

ANEXO B – Medição RSSI BE900

A tabela 7 testifica as medições apresentadas anteriormente no formato de gráfico. Os dados de RSSI estão dispostos na tabela em ordem decrescente de cima para baixo da esquerda para direita.

Tabela 9 – Medição RSSI BE900.

RSSI 1	RSSI 2	RSSI 3	RSSI 4	RSSI 5	RSSI 6	RSSI 7	RSSI 8	RSSI 9	RSSI10
-85,5	-79,5	-75	-80,5	-72,5	-67	-71	-59,5	-54,5	-47,5
-85,5	-76,5	-76,5	-80,5	-69	-69	-65	-63,5	-68	-52,5
-85,5	-78,5	-77	-75,5	-72	-75	-59,5	-57	-52	-53,5
-84,5	-77	-75	-75,5	-81,5	-76	-65,5	-54,5	-59,5	-61
-84,5	-75,5	-77,5	-70	-70,5	-69,5	-66	-66,5	-52	-47,5
-83,5	-83	-78	-71,5	-69,5	-69,5	-65	-58,5	-55	-48,5

RSSI 1	RSSI 2	RSSI 3	RSSI 4	RSSI 5	RSSI 6	RSSI 7	RSSI 8	RSSI 9	RSSI10
-85	-75	-79	-73,5	-71	-75	-64	-66,5	-54,5	-47,5
-81	-83	-72,5	-73,5	-71	-65	-65	-58,5	-52	-49,5
-80,5	-74	-78,5	-70	-68,5	-67,5	-59	-65	-57	-49
-85	-79,5	-79	-70	-71	-71	-59,5	-59,5	-49,5	
-82	-81	-76	-69	-69,5	-70,5	-58	-57	-55,5	
-82	-75,5	-83	-70,5	-72,5	-68,5	-55,5	-58	-57,5	
-79,5	-75	-76,5	-70,5	-68	-65,5	-59,5	-52,5	-46,5	

Fonte: Autor.

ANEXO C – Medição RSSI LoRa Cúpula PUC-Campinas

A tabela 8 mostra as medições coletadas durante todo o percurso feito da Cúpula da PUC-Campinas até a Unicamp, apresentados no formato de gráfico anteriormente. Os dados de RSSI estão dispostos na tabela em ordem crescente de cima para baixo da esquerda para direita.

Tabela 10 – Teste cúpula PUC Campinas.

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-75	-93	-99	-101	-93	-96	-93	-97	-93	-115
-72	-87	-97	-97	-95	-96	-96	-103	-93	-121
-81	-89	-100	-97	-93	-97	-95	-97	-91	-118
-77	-90	-98	-98	-93	-97	-96	-97	-92	-115
-73	-98	-98	-95	-99	-97	-92	-102	-93	-116
-74	-90	-97	-96	-97	-98	-89	-100	-93	-118
-79	-89	-97	-97	-93	-97	-88	-101	-93	-116

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-67	-98	-98	-97	-93	-97	-90	-99	-92	-118
-68	-96	-96	-98	-93	-96	-96	-93	-92	-117
-64	-96	-97	-96	-92	-98	-98	-95	-92	-114
-64	-96	-96	-96	-92	-96	-106	-95	-93	-117
-64	-93	-97	-96	-92	-96	-102	-95	-91	-120
-68	-97	-96	-97	-92	-97	-98	-96	-92	-114
-71	-95	-96	-97	-92	-96	-90	-97	-91	-131
-70	-95	-96	-98	-98	-95	-81	-96	-95	-125
-73	-90	-97	-96	-96	-93	-80	-96	-91	-126
-77	-92	-96	-96	-95	-92	-83	-95	-92	-117

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-77	-96	-96	-97	-97	-92	-92	-97	-91	-117
-85	-91	-96	-99	-97	-92	-82	-93	-91	-129
-74	-98	-97	-98	-96	-93	-89	-93	-90	-124
-74	-97	-98	-96	-92	-93	-91	-95	-91	-117
-75	-93	-95	-99	-91	-92	-95	-95	-92	-119
-71	-106	-95	-93	-91	-93	-91	-93	-93	-115
-65	-105	-95	-96	-91	-96	-90	-93	-91	-118
-66	-91	-96	-96	-95	-93	-90	-96	-92	-116
-60	-89	-95	-97	-96	-92	-89	-96	-93	-124
-58	-96	-96	-96	-95	-92	-90	-96	-93	-129

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-57	-88	-96	-92	-93	-93	-85	-93	-93	-119
-56	-88	-97	-93	-96	-92	-96	-93	-92	-129
-56	-88	-98	-97	-95	-93	-85	-96	-91	-119
-57	-88	-99	-95	-96	-95	-84	-92	-92	-119
-77	-87	-101	-95	-96	-98	-81	-95	-93	-120
-76	-96	-97	-95	-98	-93	-79	-95	-93	-116
-92	-103	-97	-93	-99	-98	-82	-95	-95	-114
-81	-107	-97	-95	-95	-97	-84	-98	-92	-117
-72	-96	-102	-96	-93	-96	-81	-98	-93	-123
-71	-92	-96	-93	-93	-98	-81	-96	-92	-114

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-76	-97	-99	-93	-96	-99	-81	-95	-95	-108
-71	-91	-100	-96	-98	-100	-87	-99	-92	-123
-70	-96	-96	-96	-100	-101	-82	-95	-92	-112
-68	-90	-97	-92	-97	-100	-98	-105	-99	-109
-71	-93	-96	-93	-101	-99	-84	-97	-98	-115
-69	-87	-96	-90	-99	-98	-89	-93	-106	-118
-69	-88	-96	-90	-98	-99	-87	-95	-102	-114
-69	-95	-97	-92	-91	-99	-89	-93	-105	-117
-68	-106	-98	-93	-92	-97	-88	-92	-111	-112
-103	-87	-97	-92	-91	-98	-99	-95	-99	-119

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-102	-89	-99	-92	-91	-97	-86	-93	-101	-131
-102	-93	-92	-93	-92	-98	-91	-92	-100	-116
-107	-85	-91	-96	-92	-98	-98	-92	-111	-121
-104	-84	-96	-96	-92	-99	-79	-93	-106	-119
-100	-85	-95	-93	-93	-99	-73	-92	-101	-123
-104	-89	-98	-93	-92	-99	-72	-95	-102	-127
-107	-97	-93	-96	-93	-99	-77	-95	-101	-128
-106	-100	-97	-97	-97	-99	-76	-95	-100	-128
-104	-99	-96	-93	-93	-96	-84	-93	-92	-128
-100	-97	-97	-99	-92	-96	-86	-93	-93	-128

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-102	-96	-100	-98	-92	-96	-89	-92	-98	-129
-101	-101	-99	-99	-95	-93	-97	-92	-107	-127
-100	-96	-99	-96	-92	-96	-97	-93	-104	-114
-101	-96	-99	-93	-93	-97	-98	-93	-103	-122
-99	-97	-97	-93	-93	-96	-100	-91	-104	
-104	-99	-96	-93	-92	-93	-98	-91	-106	
-104	-99	-97	-97	-92	-96	-95	-92	-114	
-107	-104	-97	-93	-93	-96	-102	-93	-112	
-112	-98	-98	-93	-96	-95	-103	-96	-111	
-112	-100	-97	-92	-98	-93	-98	-92	-112	

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	RSSI5	RSSI6	RSSI7	RSSI8	RSSI9	RSSI10
-114	-101	-98	-97	-95	-92	-113	-93	-109	
-109	-98	-98	-92	-96	-92	-99	-92	-113	
-104	-99	-97	-92	-97	-92	-93	-93	-117	
-112	-99	-101	-92	-97	-93	-96	-95	-120	
-97	-99	-98	-92	-98	-93	-92	-91	-115	
-105	-99	-100	-92	-98	-93	-90	-92	-117	
-92	-98	-100	-92	-96	-95	-104	-93	-112	
-93	-99	-100	-92	-97	-92	-96	-92	-118	

Fonte: Autor.

ANEXO D – Medição centro urbano da cidade de Registro

A tabela 9 mostra as medições coletadas durante todo o percurso do centro da cidade de Registro-SP, os dados estão dispostos na integra confirmando os dados apresentados no formato de gráfico anteriormente. Os dados de RSSI estão dispostos na tabela em ordem crescente de cima para baixo da esquerda para direita.

Tabela 11 – Medição centro urbano da cidade de Registro.

RSSI 1	RSSI 2	RSSI 3	RSSI 4	RSSI 5	RSSI 6	RSSI 7	RSSI 8	RSSI 9	RSSI10
-83	-65	-99	-119	-128	-119	-118	-115	-106	-124
-82	-77	-96	-117	-126	-121	-114	-115	-108	-124
-89	-77	-106	-119	-116	-119	-118	-114	-107	-123
-72	-84	-107	-118	-117	-120	-122	-116	-112	-119
-73	-90	-100	-116	-118	-120	-117	-116	-108	-123

RSSI 1	RSSI 2	RSSI 3	RSSI 4	RSSI 5	RSSI 6	RSSI 7	RSSI 8	RSSI 9	RSSI10
-67	-89	-100	-125	-132	-128	-119	-117	-115	-123
-64	-99	-105	-121	-117	-124	-118	-117	-115	-122
-67	-87	-107	-120	-116	-126	-117	-116	-124	-122
-74	-97	-114	-119	-124	-132	-124	-116	-118	-123
-71	-92	-106	-117	-117	-119	-116	-116	-115	-123
-64	-91	-113	-120	-112	-112	-124	-117	-118	-122
-63	-104	-115	-118	-124	-113	-117	-116	-124	-119
-63	-99	-115	-127	-125	-120	-116	-117	-115	-119
-64	-95	-121	-129	-130	-111	-117	-116	-125	-124

RSSI 1	RSSI 2	RSSI 3	RSSI 4	RSSI 5	RSSI 6	RSSI 7	RSSI 8	RSSI 9	RSSI10
-64	-95	-114	-117	-125	-109	-119	-115	-118	-119
-64	-98	-117	-118	-126	-109	-116	-115	-118	-119
-64	-90	-115	-128	-125	-117	-117	-114	-117	
-63	-90	-117	-116	-124	-114	-117	-114	-119	
-64	-86	-118	-118	-119	-113	-116	-117	-120	
-64	-102	-118	-117	-119	-115	-116	-121	-121	
-69	-109	-118	-117	-119	-120	-114	-113	-123	
-65	-93	-125	-117	-119	-126	-114	-118	-120	

Fonte: Autor.

ANEXO E – Medição RFM69HCW

A tabela 10 mostra as medições coletadas durante o teste com o RFM69HCW na cidade de Registro-SP, os dados estão dispostos na integra confirmando os dados apresentados no formato de gráfico anteriormente. Os dados de RSSI estão dispostos na tabela em ordem crescente de cima para baixo da esquerda para direita.

Tabela 12 – Medição RFM69HCW.

RSSI 1	RSSI 2	RSSI 3	RSSI 4	RSSI 5	RSSI 6	RSSI 7	RSSI 8	RSSI 9	RSSI10
-39	-29	-62	-59	-72	-77	-89	-85	-85	-90
-38	-28	-55	-64	-70	-73	-90	-79	-92	-91
-44	-28	-48	-63	-72	-75	-83	-86	-96	-90
-49	-28	-47	-62	-66	-78	-81	-88	-89	-90
-48	-28	-51	-66	-78	-80	-85	-78	-95	-87
-37	-28	-63	-61	-69	-81	-80	-88	-95	-88

RSSI 1	RSSI 2	RSSI 3	RSSI 4	RSSI 5	RSSI 6	RSSI 7	RSSI 8	RSSI 9	RSSI10
-43	-28	-60	-61	-73	-77	-88	-90	-94	-87
-36	-27	-57	-71	-70	-73	-94	-84	-92	-87
-49	-27	-68	-70	-78	-73	-78	-85	-94	-89
-40	-28	-57	-66	-72	-77	-88	-87	-95	-90
-42	-28	-59	-77	-72	-81	-93	-89	-94	-89
-35	-29	-60	-68	-76	-76	-85	-93	-94	-91
-42	-28	-61	-68	-74	-84	-85	-95	-93	-89
-28	-28	-71	-69	-74	-85	-91	-84	-89	-87
-31	-30	-58	-76	-71	-84	-84	-87	-95	-90
-28	-28	-58	-76	-73	-77	-86	-88	-91	-85

RSSI 1	RSSI 2	RSSI 3	RSSI 4	RSSI 5	RSSI 6	RSSI 7	RSSI 8	RSSI 9	RSSI10
-27	-28	-61	-66	-76	-81	-83	-90	-88	-89
-29	-27	-66	-73	-72	-86	-85	-92	-90	-91
-27	-31	-72	-63	-69	-80	-83	-93	-88	-91
-28	-39	-61	-79	-76	-81	-87	-89	-87	-89
-29	-28	-70	-78	-89	-81	-83	-95	-86	-91
-43	-31	-57	-70	-72	-82	-90	-90	-92	-90
-36	-37	-62	-69	-95	-92	-94	-90	-87	-91
-27	-44	-61	-76	-78	-83	-88	-89	-91	-94
-28	-45	-59	-80	-85	-86	-84	-90	-91	-94

Fonte: Autor.