

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ÉDSON FLORES**

**Implementação de Rede Mesh Utilizando Comunicação de Longo Alcance para  
Sensoriamento Remoto de Produção Agrícola.**

**São Leopoldo**

**2021**

ÉDSON FLORES

Implementação de Rede Mesh Utilizando Comunicação de Longo Alcance para  
Sensoriamento Remoto de Produção Agrícola.

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Graduado em  
Engenharia, pelo Curso de Engenharia  
Elétrica da Universidade do Vale do Rio  
dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Lucio Rene Prade

São Leopoldo

2021

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos sempre é uma tarefa nada fácil, e não é apenas pela possibilidade de esquecer alguém, mas sim pelo fato que é uma tarefa de retrospectivas, de balanços, em processos de críticas e autocríticas de uma trajetória.

Agradeço a todos os professores e colegas do curso de Engenharia Elétrica da Unisinos e a Instituição Unisinos. Agradeço ao Professor Dr. Lúcio Renê Prade por toda dedicação e orientação para a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus familiares por todos os tipos de ajudas, diretas e indiretas. prestadas, e tenho certeza de que ficaram felizes com a conclusão desta etapa.

Agradeço aos meus amigos de trabalho na Petrobrás (REFAP), amigos estes que estão alinhados na defesa da Petrobrás como Empresa Pública e voltada para o desenvolvimento soberano do País, que neste momento resistem a uma política de desmonte e destruição de um patrimônio que é do Povo Brasileiro.

Agradeço a minha companheira Patrícia Wiebbelling, pela paciência, pela ajuda e por inúmeros momentos de minha ausência, pois realizar um Curso Superior é uma escolha que gera momentos de ausências e de dificuldades.

Agradeço também aos amigos Pedro Emílio, Álvaro Duquia e o Ricardo Landal, que me ajudaram várias vezes a realizar os testes neste trabalho.

Vivemos neste momento inúmeros problemas referente à pandemia do COVID e ao negacionismo. Isto trouxe inúmeros impactos no cotidiano da nossa sociedade. Muitos perderam entes queridos devido ao COVID. Particularmente além do meu Sogro Sílvio Wiebbelling, perdi dois grandes amigos de forma repentina, que são o Estevão Fontoura Ribeiro e o Alexandre Luerce Duquia, amigos de inúmeras jornadas de trabalho na REFAP e no Sindicato dos Petroleiros. Também faço o registro de outras duas perdas: a amiga Mara Chittolina, coordenadora de um curso Pré-ENEM/Vestibular gratuito na cidade de Esteio, voltado para jovens de famílias de origem da classe trabalhadora ingressarem nas Universidades, como também a perda de minha mãe (ambas não foram por COVID, mas o COVID dificultou visitas e uma melhor processo de despedida). Faço este registro destes momentos tristes, pois é um processo vivido em nossa sociedade no qual temos que tirar lições.

Dedico este trabalho ao meu pai e minha mãe (In Memoriam).

“Do rio que tudo arrasta se diz que é violento. Mas  
ninguém diz violentas as margens que o comprimem”  
*(Bertolt Brecht)*

## RESUMO

O desenvolvimento de microcontroladores de baixo custo, com possibilidade simultânea de múltiplas formas de comunicação (*Wifi*, *Bluetooth* e *LoRa*), e o incremento da capacidade de memória e de núcleos de processamento possibilitaram o crescente número de aplicações de sensoriamento e controle na indústria e na produção agrícola. O propósito deste trabalho foi a construção de um dispositivo eletrônico que utiliza o microcontrolador ESP32 com tecnologia de comunicação de longo alcance *LoRa (Long Range)* capaz de estabelecer uma rede dinâmica de sensoriamento conhecida como Rede *Mesh (Mesh Network)* confiável, com baixo consumo de energia e com pouca necessidade de infraestrutura na sua aplicação em campo. A necessidade de coletar dados via sensores em cenários que envolvem grandes distâncias, com dificuldades de infraestruturas como energia elétrica, internet e cabos de comunicação, está presente nos mais diversos campos da agricultura, como também na indústria, meio urbano e até mesmo em um campus universitário. Pode-se mudar a forma como coletar as variáveis de interesse e o processamento destes dados, porém é necessária uma rede confiável para obtê-los. Então cabe ressaltar que constituindo uma rede dinâmica confiável, esta rede pode servir para inúmeros propósitos bastando a modificação dos sensores utilizados. A Rede *Mesh* de múltiplos saltos, propiciando vantagens como uma maior área de cobertura e menor custos quando comparada à uma rede *LORAWAN* (formatada principalmente para redes do tipo estrela e com necessidade de concentradores para sua expansão). Neste trabalho, foi desenvolvido e testado uma proposta de Rede *Mesh* para sensoriamento remoto envolvendo cinco nós de rede distribuídos em diferentes cenários, testados em uma área industrial por facilidade de meios logísticos para realização de testes envolvendo grandes distâncias, obtendo-se sucesso na formação de uma Rede *Mesh* com até dois saltos de comunicação entre os dispositivos da rede. Foi analisado aspectos como a formação da tabela de vizinhos, a formação das rotas, o número de saltos de comunicação e a leitura de sensores de temperatura e umidade nos nós que compõe a rede, verificando o sucesso da comunicação por meio do cálculo de perdas de pacotes.

**Palavras-chave:** ESP32, Rede Mesh, LoRa, Sensoriamento Remoto

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rede de sensores e o nó raiz (Root) ou Gateway .....	22
Figura 2 – Arquitetura de uma rede Wi-Fi tradicional .....	23
Figura 3 – Ideia básica de uma Rede Mesh.....	24
Figura 4 – Modulação LoRa .....	26
Figura 5 – Arquitetura LoRaWAN.....	34
Figura 6 – Camadas do Protocolo LoRaWAN .....	35
Figura 7 – Exemplo do formato do Pacote LoRa.....	36
Figura 8 –Variação da frequência em função do tempo de um pacote LoRa.....	36
Figura 9 – Gateway Heltec dois canais .....	38
Figura 10 – Gateway Heltec 8 canais.....	38
Figura 11 – Comparativo entre tecnologias de comunicação sem fio .....	39
Figura 12 – Fardos na colheita de algodão .....	42
Figura 13 – Incêndio em produção algodão .....	42
Figura 14 – Concentração de chamas em incêndio de fardos de algodão.....	43
Figura 15 – Incêndio em unidade de processamento de algodão .....	44
Figura 16 – Rede Mesh em Universidade .....	45
Figura 17 – PDR% em função da distância e de SF .....	46
Figura 18 – Tempo de informação do ar em milissegundos em função de BW e SF.....	47
Figura 19 – PDR% para cada nó e Rede Mesh com múltiplos saltos .....	48
Figura 20 – Instalação dos sensores nós e o Gateway.....	48
Figura 21 – Hardware utilizado nos dispositivos nós.....	49
Figura 22 – Mapa de uma Rede LoRaWAN subterrânea em Zurique.....	51
Figura 23 – Topologia com Repetidores LORAWAN e Rede Mesh subterrânea .....	53
Figura 24 –Imagem da Rede Mesh subterrânea .....	53
Figura 25 – Dispositivo Repetidor LoRaWAN instalado em poste.....	54
Figura 26 – Rede Subterrânea consolidada com LORAWAN e Mesh Síncrona .....	55
Figura 27 – Fluxograma do plano de execução do trabalho .....	56
Figura 28 – Placa WiFi LoRa ESP 32 da Heltec .....	58
Figura 29 – Placa ESP 32 LoRa <i>Wireless Stick Lite</i> .....	60
Figura 30 – Estrutura da IDE SDK IDF 4.0 para ESP32 .....	62
Figura 31 – Exemplo de termopar tipo sonda PT100 .....	63
Figura 32 – MAX31865 para condicionar o sinal do PT100 .....	64

Figura 33 – MAX6675 para condicionar Termopar tipo K .....	65
Figura 34 – Módulo com o sensor Bosh BME680 .....	66
Figura 35 – Sensor DHT22.....	67
Figura 36 – Sistema ABRAPA de identificação de fardos de algodão .....	68
Figura 37 – Malha inicial de rede com 4 nós .....	70
Figura 38 – Distribuição dos nós para permitir verificar saltos .....	71
Figura 39 – Terminal para conexão da bateria de 3,7V - 1000 mAh na placa Heltec V2.....	75
Figura 40 – Montagem do protótipo em caixa plástica.....	76
Figura 41 – Dispositivo para Teste de Campo .....	77
Figura 42 – Estados da rede Mesh .....	79
Figura 43 – Fluxograma do Processo de Recepção de um Pacote .....	85
Figura 44 – Distribuição da rede Mesh no Cenário 0 .....	86
Figura 45 – Nó Master identificou os 4 vizinhos .....	87
Figura 46 – Formação de Tabela de Rotas no Cenário 0 .....	87
Figura 47 – Master coletando informações dos vizinhos no Cenário 0 .....	88
Figura 48 – Cálculo de Perda de pacotes no Cenário 0.....	88
Figura 49 – Aprendizagem correta de rotas até a etapa 167 .....	89
Figura 50 – Inconsistência no Número de Saltos .....	90
Figura 51 – Inconsistência nos Saltos e Endereços Não Existentes na Rede .....	90
Figura 52 – Erro de Roteamento e Saltos .....	91
Figura 53 – Cenário 1, Distribuição dos Sensores .....	92
Figura 54 – Descobrimo o Vizinho no Cenário 1 .....	93
Figura 55 – Aprendendo as Rotas no Cenário 1 .....	94
Figura 56 – Alteração da tabela de roteamento devido a métrica .....	95
Figura 57 – Master Solicitando Dados no Cenário 1 .....	96
Figura 58 – Perda de Pacotes no Cenário 2 .....	96
Figura 59 – Cenário 2.....	97
Figura 60 – Descobrimo os Vizinhos no Cenário 2 .....	97
Figura 61 – Aprendendo as Rotas no Cenário 2 .....	98
Figura 62 – Master Solicitando Dados Cenário 2.....	98
Figura 63 – Perda de Pacotes no Cenário 2 .....	99
Figura 64 – Cenário 3.....	99
Figura 65 – Descobrimo os Vizinhos no Cenário 3 .....	100

Figura 66 – Aprendendo as Rotas no Cenário 3 .....	101
Figura 67 – Master Solicitando Dados no Cenário 3 .....	102
Figura 68 – Perda de Pacotes no Cenário 3 .....	102
Figura 69 – Cenário 4 .....	103
Figura 70 – Descobrimo o Vizinho no Cenário 4 .....	103
Figura 71 – Aprendendo as Rotas no Cenário 4 .....	104
Figura 72 – Perda de Pacotes no Cenário 4 .....	104
Figura 73 – Cenário 5.....	105
Figura 74 – Master identificou 2 vizinhos .....	105
Figura 75 – Aprendendo as Rotas no Cenário 5 .....	106
Figura 76 – Perdas de Pacote no Cenário 5 .....	106
Figura 77 - Pinagem da Placa Heltec V2 .....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequências de Transmissão LoRa no mundo .....	27
Tabela 2 – Valores Teóricos da Taxa de Transmissão em função do SF .....	30
Tabela 3 – Influência do Fator de Espalhamento na Sensitividade do Receptor .....	32
Tabela 4 – Relação de custos para 5 dispositivos .....	77

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 : Especificações da placa Heltec.....	58
Quadro 2 – Especificações Técnicas do Chip ESP32.....	59
Quadro 3 – Especificações técnicas do Chip LoRa SX1276.....	59
Quadro 4 – Especificações Técnicas do display OLED .....	60
Quadro 5 – Especificações técnica do sensor PT100 .....	63
Quadro 6 – Especificações técnicas do sensor DHT22 .....	67
Quadro 7 – Especificação do Formato Pacote .....	81

## LISTA DE SIGLAS

<i>ADR</i>	Adaptative Data Rate
<i>ANATEL</i>	Agência Nacional de Telecomunicações
<i>ANTT</i>	Agência Nacional de Transporte Terrestre
<i>AP</i>	Ponto de Acesso ( <i>Access Point</i> )
<i>bps</i>	Bits por segundo
<i>BW</i>	Largura de Banda ( <i>Bandwidth</i> )
<i>CCS</i>	Tecnologia de modulação de espalhamento espectral ( <i>Chirp Spread Spectrum</i> )
<i>CR</i>	Taxa de Código ( <i>Code Rate</i> )
<i>CRC</i>	Cyclic Redundancy Check
<i>dB</i>	Decibéis
<i>dBm</i>	Decibéis com a potência de referência de 1mW
<i>GSM</i>	<i>Groupe Special Mobile</i>
<i>IoT</i>	Internet das Coisas ( <i>Internet of Things</i> )
<i>I<sub>2</sub>C</i>	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
<i>IDE</i>	Interface de desenvolvimento
<i>ISM</i>	Faixa de frequência não licenciada de uso industrial, científico ou na medicina ( <i>Industrial, Scientific and medical</i> )
<i>LoRa</i>	Tecnologia de comunicação de longo alcance ( <i>Long Range</i> )
<i>MAC</i>	Endereço de Controle de Acesso à uma placa de rede ( <i>Media Access Control</i> )
<i>PDA</i>	Assistente Digital Pessoal ( <i>Personal Digital Assistant</i> )
<i>RFC</i>	<i>Request For Comments</i>
<i>RFID</i>	<i>Radio-Frequency Identification</i>
<i>RSSF</i>	Rede de Sensores sem fio
<i>RSSI</i>	<i>Received Signal Strenght Indication</i>
<i>SF</i>	Fator de Espalhamento ( <i>Spreading fator</i> )
<i>SNR</i>	Relação Sinal Ruído
<i>SPI</i>	Serial Peripheral Interface
<i>UTC</i>	<i>Coordinated Universal Time</i>

<i>W</i>	Watt -Unidade de Potência Elétrica
Wifi	Tecnologia de comunicação sem fio ( <i>Wireless Fidelity</i> )
<i>WSN</i>	Rede de Sensores sem fio ( <i>Wireless Sensor Network</i> )

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 Definição do Tema ou Problema.....	18
1.2 Delimitações do Trabalho.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo Geral .....	19
1.3.2 Objetivos Específicos .....	20
1.4 Justificativa.....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 REDE DE SENSORES SEM FIO (RSSF)</b> .....	<b>21</b>
2.1.1 Rede de sensores Wi-Fi tradicional.....	22
2.1.2 Rede Mesh.....	23
<b>2.2 TECNOLOGIA DE MODULAÇÃO LORA</b> .....	<b>24</b>
2.2.1 Modulação LoRa .....	25
2.2.2 Frequência da Portadora.....	26
2.2.3 Largura de Banda ( <i>BW</i> ).....	27
2.2.4 Razão de Código ( <i>Code Rate -CR</i> ).....	29
2.2.5 Parâmetro SF (Fator de Espalhamento Espectral).....	29
2.2.6 Sensibilidade do Receptor ( <i>S</i> ).....	31
2.2.7 Indicação de Intensidade do Sinal Recebido ( <i>RSSI</i> ).....	32
<b>2.3 LORAWAN®</b> .....	<b>33</b>
2.3.1 Camadas do Protocolo LoRaWAN .....	34
2.3.2 Formato do pacote LoRa.....	36
2.3.3 Gateway .....	37
2.3.4 Comparação com outras tecnologias de comunicação .....	39
<b>2.4 CULTIVO DE ALGODÃO E O PROBLEMA CAVITOMA</b> .....	<b>40</b>
<b>3 ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>45</b>
3.1 Monitoração com Rede Mesh em Campus Universitário .....	45
3.2 Rede Mesh LoRa em Dutos de Esgoto .....	50
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>56</b>
4.1 Microcontroladores com Comunicação LoRa.....	57
4.2 Interface de Desenvolvimento ( <i>IDE</i> ).....	61

4.3 Definição dos sensores e integração ao módulo ESP32 Wifi, Bluetooth e rádio LoRa.....	62
4.4 Baterias e Gerenciamento de Energia .....	68
4.5 Desenvolvimento de um Protótipo com Robustez e Funcional para Testes .....	69
4.6 Definir uma Malha Inicial de Rede.....	69
4.7 Definir Critérios para Teste de Confiabilidade da Rede Mesh.....	72
4.8 Instalar a Rede Mesh e Definir a Malha de Cobertura .....	72
4.9 Verificação dos Resultados .....	72
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>74</b>
5.1 Hardware Desenvolvido .....	74
5.2 Protocolos e Rotinas de Implementação.....	77
5.2.1 Estados do Nó da Rede Mesh implementada .....	78
5.2.2 Cálculo da Métrica de Comunicação entre os Nós.....	79
5.2.3 Protocolo de Roteamento Desenvolvido .....	80
5.2.3.1 Endereços MAC (Camada de Acesso ao Meio).....	80
5.2.3.2 Formato do Pacote .....	81
5.2.3.3 Formato do Pacote <i>Hello</i> .....	82
5.2.3.4 Tabela de Roteamento de um Nó .....	82
5.2.3.5 Fluxograma do Software Embarcado .....	83
5.3 Cenários de Testes e Resultados .....	85
5.3.1 Cenário 0.....	86
5.3.1.1 Descobrimos os Vizinhos .....	86
5.3.1.2 Aprendendo as Rotas.....	87
5.3.1.3 Master Solicitando Dados.....	88
5.3.1.4 Cálculo de Perdas de Pacote .....	88
5.3.1.5 Problemas de Instabilidade da Rede Mesh .....	89
5.3.2 Cenário 1.....	91
5.3.2.1 Descobrimos os Vizinhos no Cenário 1.....	92
5.3.2.2 Aprendendo as Rotas no Cenário 1 .....	93
5.3.2.3 Master Solicitando Dados no Cenário 1 .....	95
5.3.2.4 Cálculo de Perdas de Pacote no Cenário 1.....	96
5.3.3 Cenário 2.....	97
5.3.3.1 Descobrimos os Vizinhos no Cenário 2.....	97
5.3.3.2 Aprendendo as Rotas no Cenário 2 .....	98

5.3.3.3 Master Solicitando Dados no Cenário 2 .....	98
5.3.3.4 Cálculo de Perda de Pacotes no Cenário 2.....	99
5.3.4 Cenário 3.....	99
5.3.4.1 Descobrimo os Vizinhos no Cenário 3.....	100
5.3.4.2 Aprendendo as Rotas no Cenário 3 .....	100
5.3.4.3 Master solicitando Dados no Cenário 3.....	101
5.3.4.4 Perda de Pacotes no Cenário 3 .....	102
5.3.5 Cenário 4.....	103
5.3.5.1 Descobrimo os Vizinhos no Cenários 4.....	103
5.3.5.2 Aprendendo as Rotas no Cenários 4.....	104
5.3.6 Cenário 5.....	105
5.3.6.1 Descobrimo os Vizinhos no Cenários 5.....	105
5.3.6.2 Aprendendo as Rotas no Cenários 5.....	106
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>107</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO A – PINAGEM DA PLACA ESP32 HELTEC .....</b>	<b>114</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O principal requisito aplicado aos dispositivos na Internet das coisas (IoT) é fornecer uma conectividade eficaz para garantir uma comunicação remota confiável e transferência de dados em um ambiente sem fio. Este conceito para dispositivos IoT é denominado 6A (*Anything, Anytime, Anyone, Anyplace, Any service e Any network*). A fim de desenvolver ainda mais a IoT e expandir a área de suas aplicações, são necessárias soluções poderosas, de baixo custo e baixo consumo de energia para os dispositivos IoT (OMRE, 2012).

As tecnologias baseadas em IoT redesenharam quase todos os setores, incluindo a “agricultura inteligente”, que mudou o setor de abordagens estatísticas para qualitativas (AYAZ *et al.*, 2019), destacando o potencial de utilização de sensores sem fio e as técnicas de comunicação associadas à estes sensores e os desafios de integrar estes sensores as aplicações agrícolas tradicionais e suas atividades como preparação do solo, controle de pragas e insetos, temperatura, umidade do ar, irrigação, e diversos monitoramentos que vão desde a etapa de semeadura até a colheita e controle de produção.

Entre os inúmeros desafios, pode-se citar a tarefa de construir uma rede de dinâmica confiável e como integrar os sensores à esta rede, qual a comunicação sem fio utilizada, as questões de disponibilidade de energia e a viabilidade de conexão com a rede de Internet (nuvem) quando possível, como também as distâncias de comunicação envolvidas. Neste trabalho, a rede dinâmica é a Rede Mesh, em que um nó (que pode ser um ponto de sensoriamento) pode se comunicar com qualquer outro nó desta rede, e na eventual falha de um nó, a rede faz automaticamente um novo roteamento de caminho garantindo que a informação chegue ao local de interesse.

A Rede Mesh difere-se das redes Wi-Fi de infraestrutura tradicional porque os nós não são necessários para se conectar a um nó central. Em vez disso, os nós têm permissão para se conectar com nós vizinhos. Os nós são mutuamente responsáveis por retransmitir as transmissões uns dos outros. Isso permite que uma rede Mesh tenha uma área de cobertura muito maior, pois os nós ainda podem alcançar a interconectividade sem a necessidade de estar ao alcance do nó central. Da mesma forma, a Rede Mesh também é menos suscetível à sobrecarga, pois o número de nós permitidos na rede

não é mais limitado por um único nó central (ESPRESSIF SYSTEMS, 2016)

A tecnologia de comunicação LoRa (*Long Range*) tem se tornado cada vez mais utilizada na conectividade da IoT. Por permitir comunicação de distâncias na ordem de quilômetros (de 5 km nas áreas urbanas e até 15 km nas áreas rurais com baixo consumo de energia), ela se tornou uma boa opção para empresas que buscam soluções práticas, com menores dependências de provedores e por atender bem desde a indústria até o campo. Os custos de manutenção são baixos, mas é necessário investimento para a infraestrutura. A comunicação via rádio LoRa podem atingir distâncias ainda maiores. Em 16 de abril de 2021 foi alcançado incríveis 832 km na comunicação de um sensor LORAWAN acoplado a um balão de gás hélio (LORA QUEBRA RECORDE ENVIANDO DADOS A MAIS DE 800 KM DE DISTÂNCIA, [s. d.]). Um outro bom exemplo foi em 5 de outubro de 2021, em que uma mensagem LoRa foi enviada e refletida em direção a lua usando o radiotelescópio Dwingeloo, e recebida pelo mesmo chip após 2,44 segundos, percorrendo uma distância de 730360 km (FIRST LORA MESSAGE BOUNCED OFF THE MOON – DWINGELOO RADIO TELESCOPE | CAMRAS, [s. d.]).

A construção de redes de sensores com comunicação sem fio tem crescido na indústria e no campo. (ALCARAZ; LOPEZ, 2010) traz um estudo sobre a segurança nas aplicações das redes sem fio no ramo industrial, e este é um dos fatores que levam ao predomínio das redes cabeadas em aplicações industriais. Em contrapartida as inúmeras aplicações de redes sem fio e suas tecnologias tem impulsionado inúmeras aplicações no campo, com comprovados ganhos de lucratividade na chamada agricultura de precisão em um cenário de aumento da responsabilidade econômica, ambiental e social, redução de massa trabalhadora no campo, restrição para o aumento da área cultivada e aumento da carga de trabalho para controle e monitoramento do processo produtivo e exigência de disponibilizar dados para rastreamento do produto (SOBRE O TEMA - PORTAL EMBRAPA, [s. d.]). Neste caso, a comunicação em grande distância sem fio em uma rede de sensores passa a ter relevância fundamental devido às dificuldades físicas de cabeamento e infraestrutura.

Quanto a produtividade, tem-se o aspecto das perdas de produção por tragédias climáticas ou fatores ambientais. No trabalho de (YARALI; AHSANT;

RAHMAN, 2009) tem em seu escopo: Rede Mesh sem fio é solução chave para aplicações rurais e de emergências. Um exemplo de perdas e de emergência são os incêndios no cultivo, armazenamento e processamento de algodão no Brasil.

O algodão armazenado em fardos após a colheita pode sofrer um processo de combustão ou ignição espontânea devido a um processo exotérmico de oxidação bacteriana, muito comum nas fibras de algodão ou à decomposição da celulose. Este processo de fermentação do algodão é chamado de Cavitoma, e sofre influência direta da umidade e da temperatura e gera possibilidades de incêndios catastróficos nos fardos acumulados ao longo da lavoura, no transporte e no armazenamento destes fardos para processamento (INCÊNDIO EM ALGODÃO É RISCO PERMANENTE EM PARTE DA CADEIA DE PRODUÇÃO, [s. d.]

O presente trabalho propõe a construção de uma rede dinâmica de sensores (Rede Mesh) com a utilização de módulos do microcontrolador ESP32 com comunicação LoRa, buscando evitar perda de produção por incêndios espontâneos no cultivo e processamento do algodão. Neste caso, cada nó de sensoriamento faz a medição de variáveis como a temperatura, umidade do ar ou outra variável de interesse, e estes sensores são ligados ao microcontrolador ESP32 com tecnologia de comunicação LoRa.

De acordo com Omre (2012), o ESP32 é um sistema de baixo custo e baixo consumo de energia em uma série de circuito integrado de microcontroladores com recursos de Wi-Fi e Bluetooth, e uma estrutura altamente integrada alimentada por um microprocessador de 32 bits de duplo núcleo e com sistema de operação em tempo real (FreeRTOS), permitindo um complexo gerenciamento de multitarefas. Além disso, o ESP32 pode estar integrado ao módulo SX1278 que permite a tecnologia de comunicação LoRa (Long Range – Longo Alcance) e baixo consumo de energia, incluindo também a comunicação WiFi, como ocorre nas placas produzidas pela empresa Heltec (WiFi LoRa 32) ou placas similares. Com isso, cada módulo neste caso pode ser um nó de sensoriamento de uma rede dinâmica que se comunicam através da tecnologia de comunicação LoRa e utilizar o recurso de comunicação WiFi permitindo também ser um dispositivo *Gateway*, com suporte para comunicação TCP/IP por exemplo (XU *et al.*, [s. d.]).

A Rede Mesh e tecnologia comunicação com de longas distâncias LoRa aplica-se perfeitamente ao cenário de cultivo de algodão, pois os fardos formados durante a colheita ficam a céu aberto e afastados um dos outros em pleno campo,

em distâncias na ordem de quilômetros, a comunicação dos nós pode ocorrer praticamente sem obstáculos, como também usar este sensoriamento quando os fardos estão muitas vezes empilhados e separados por data de colheita até mesmo dentro de uma unidade de processamento. Os dados obtidos e a própria rede formada podem ser monitorados em uma central de processamento, e se a infraestrutura permitir, ter dispositivos na rede que fazem a função de Gateway, permitindo a transmissão destes dados via rede de internet (nuvem).

### **1.1 Definição do Tema ou Problema**

Coletar dados em fardos de algodão como temperatura, umidade do ar e alguma outra variável de interesse, analisá-los em tempo real auxiliando na prevenção do fenômeno Cavitoma, evitando um incêndio de grandes proporções, perda de produção, maquinário e desastre ambiental é uma tarefa de alta relevância econômica e social.

Para isso é necessário um estudo que desenvolva a construção de uma Rede Mesh confiável, que utiliza a técnica de comunicação LoRa, com baixo consumo de energia, confiável e com pouca necessidade de infraestrutura, permitindo analisar estes dados em tempo real e contribuir o processo decisório das ações de prevenção ao sinistro de perda de produção por incêndio e outras questões relevantes à produção algodoeira.

Para isso também é necessário um estudo dos tipos de sensores que possam ser utilizados e como monitorar estas variáveis de interesse, fazendo o acoplamento a um microcontrolador e ter uma análise de dados que realmente tenham consistência em prever a possibilidade de incêndio devido ao fenômeno da Cavitoma.

### **1.2 Delimitações do Trabalho**

Este trabalho visa desenvolver um dispositivo eletrônico de baixo custo e baixo consumo de energia, que possibilite seu uso prático no campo, inserido junto aos fardos de algodão, monitorando em tempo real variáveis de interesse como temperatura e umidade do ar, variáveis estas relacionadas ao fenômeno de

incêndios espontâneos nos fardos de algodão pelo processo conhecido como Cavitoma. Este dispositivo, terá capacidade de formar uma Rede Mesh por comunicação LoRa

De forma praticamente automática, este dispositivo inserido ou junto à um fardo de algodão deve ter a capacidade de se comunicar com outros dispositivos idênticos ou semelhantes formando uma Rede Mesh, capaz de trocar informação entre os dispositivos e transmiti-los à uma central de controle, onde possam ser analisados em tempo real.

### **1.3 Objetivos**

Os objetivos estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema eletrônico de baixo custo, baixo consumo, com baixa necessidade de infraestrutura, capaz de formar uma rede dinâmica inteligente (Rede Mesh), que possa ser facilmente acoplado aos fardos de produção de algodão, monitorando variáveis relacionadas ao processo de Cavitoma ou outros processos, e o monitoramento em tempo real dos dados obtidos permita a tomada de decisões, que evitem a geração de incêndios espontâneos nos fardos de algodão ou ações sobre um processo. O fato incentivador deste trabalho é o cenário do cultivo de algodão, em que se tem características de grandes distâncias envolvidas, dificuldade de acesso a infraestruturas como energia elétrica, Internet e instalação de comunicação por cabos devido a movimentação do solo e do estoque. Porém, estas características são comuns em outros tipos de agriculturas, como também em indústrias, meio urbano e até mesmo um campo universitário. Muitas vezes, as variáveis são semelhantes, o que muda é a forma de obtê-las e o processamento dos dados.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Monitorar ao longo do tempo e analisar estas variáveis de interesse em tempo real que possam prever o fenômeno da Cavitoma, como temperatura e umidade do ambiente;
- b) Integrar estes sensores à um microcontrolador ESP32 construindo um dispositivo de uso prático (sem necessidade de grandes infraestruturas no campo), e com baixo consumo de energia.
- c) Desenvolver um software que adquira os dados de campo, faça um processamento destes dados para que sejam transmitidos em uma baixa taxa de transmissão de bits, de acordo com a tecnologia de transmissão LoRa;
- d) Desenvolver o software que seja capaz de formar a rede dinâmica inteligente (Rede Mesh) com confiabilidade e capacidade de monitoramento desta rede.

### 1.4 Justificativa

No ano de 2020 foram inúmeros incêndios em fazendas de algodão no Estado de Mato Grosso do Sul, atingindo à lavoura, fardos e maquinários. O grupo Terra Santa Agro calcula ter perdido 3,5% de sua produção por causa do fogo em um pátio de armazenagem, uma perda calculada em aproximadamente R\$ 18 milhões (INCÊNDIO EM FAZENDA DE ALGODÃO CAUSA PERDA DE R\$ 18 MILHÕES EM MT - REVISTA GLOBO RURAL | ALGODÃO, [s. d.]). Este é um problema recorrente, e tem um fator de agravamento no cenário de grandes incêndios na Amazônia e Pantanal.

Um dispositivo de baixo custo e baixo consumo de energia, capaz de formar uma rede dinâmica de transmissão dos dados de forma automática, de fácil manejo nas condições de campo, adaptado à pouca necessidade de infraestrutura, pode contribuir na tomada de decisão das ações que evitem a ocorrência destes incêndios em cultivo de algodão, além de contribuir de forma decisiva na segurança e na lucratividade, nos aspectos de preservação da natureza e nos aspectos sociais, abre um espectro de outras aplicações tanto para grandes extensões de terra como também em pequenas e médias propriedades.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, foi realizado revisões bibliográficas que abordam conceitos importantes relacionados a comunicação LoRa e aos objetivos deste trabalho.

### 2.1 REDE DE SENSORES SEM FIO (RSSF)

Conforme (BEATRYS RUIZ *et al.*, 2003) o objetivo de uma rede de sensores sem fio é coletar e, eventualmente, controlar um ambiente. As redes de sensores diferem de outras redes, tendo algumas características únicas, por exemplo, auto-organização e restrições severas de energia, além disso os nós sensores são projetados em pequenas dimensões ( $\text{cm}^3$  ou  $\text{mm}^3$ ) e esta limitação de tamanho acaba impondo limitações de recursos dos nós, capacidade da fonte de energia, processador e transceptor. São apresentados elementos pertinentes para a avaliação de uma rede, com métricas de referência para avaliação de desempenho tais como atraso, número de mensagens perdidas, consumo de energia e precisão de informação, considerando uma aplicação de coleta e disseminação de dados contínua e análise dos efeitos do gerenciamento desta rede.

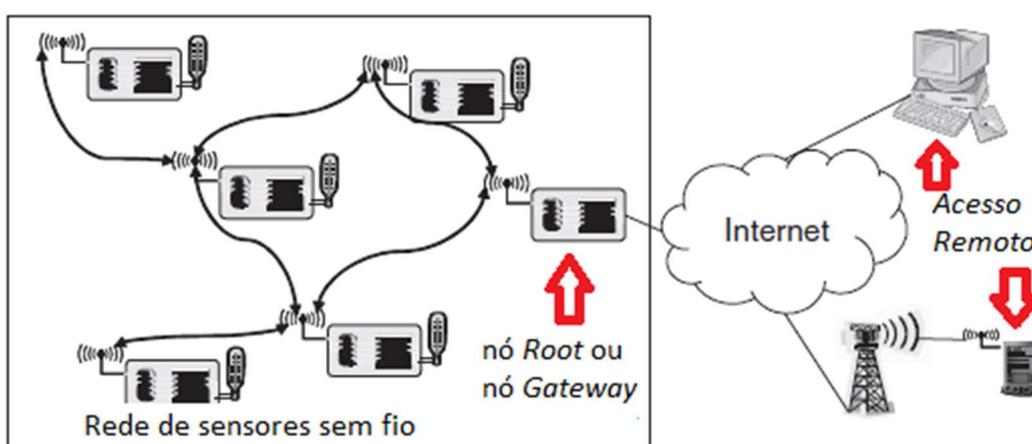
De acordo com KARL e WILLIG (2005), trazem uma definição geral de Rede de Sensores sem Fio, que denominando estas redes como WSN (*Wireless Sensor Network*):

As WSN 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 (KARL; WILLIG, 2005).

Para implementação prática, uma rede formada somente por nós de sensoriamento é insuficiente, mas ter capacidade de interagir com outros dispositivos de informação, como um trabalhador coletando informações aproximando um PDA (*Personal Digital Assistant*) através de uma comunicação específica. Por exemplo, a rede se comunica com outros nós por comunicação

LoRa, mas o módulo ESP32 pode permitir uma coleta de dados ou uma informação instantânea por comunicação WiFi e Bluetooth, como também ter dispositivos capazes de concentrar a informação e ser um nó raiz (*root*) que pode servir para se comunicar com uma central de monitoramento da rede ou ser um dispositivo Root (raiz), também chamado em várias literaturas de dispositivo *Gateway* (Porta de Entrada) para a comunicação via endereço *MAC* (*Media Access Control*) para comunicação com a rede de internet. Este conceito é mostrado na Figura 1:

Figura 1 – Rede de sensores e o nó raiz (Root) ou Gateway

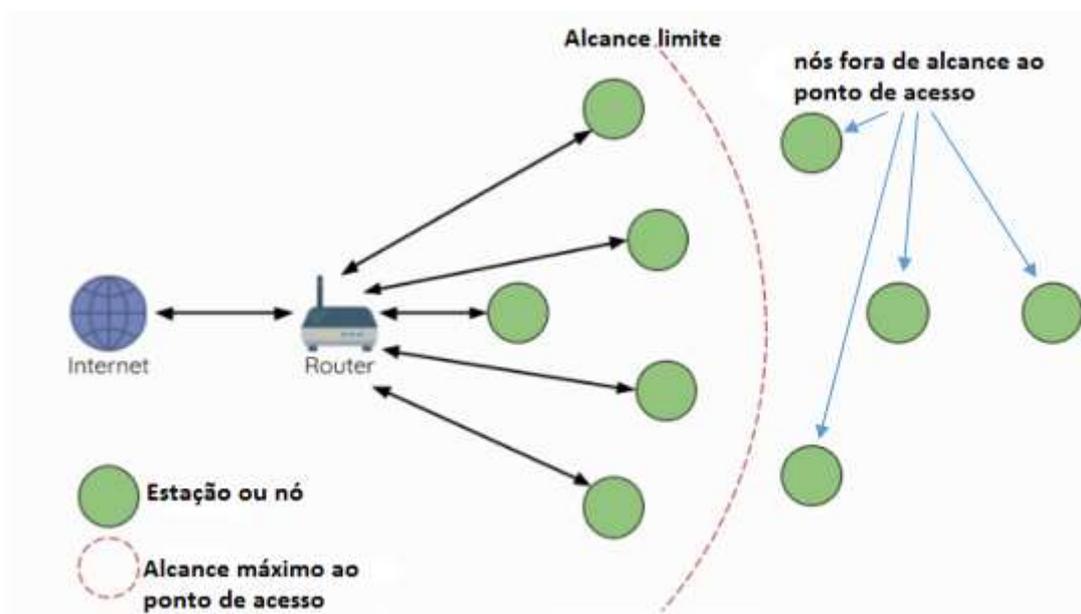


Fonte: KARL e WILLIG (2005) – Adaptado pelo Autor

### 2.1.1 Rede de sensores Wi-Fi tradicional

Uma rede Wi-Fi de infraestrutura tradicional é uma rede ponto-a-multiponto onde um único nó central conhecido como ponto de acesso (AP) é conectado diretamente a todos os outros nós conhecidos como estações. O ponto de acesso é responsável por arbitrar e encaminhar as transmissões entre as estações. Alguns também retransmitem as transmissões de / para uma rede IP externa por meio de um roteador. As redes Wi-Fi de infraestrutura tradicional sofrem a desvantagem de uma área de cobertura limitada devido ao requisito de que cada estação deve estar dentro do alcance para se conectar diretamente ao ponto de acesso, conforme mostrado na Figura 2. Além disso, as redes Wi-Fi tradicionais são suscetíveis à sobrecarga, pois o número máximo de estações permitidas na rede é limitado pela capacidade do AP.

Figura 2 – Arquitetura de uma rede Wi-Fi tradicional



Fonte: Adaptado de ESP-MESH - ESP32 - ESP-IDF PROGRAMMING GUIDE LATEST DOCUMENTATION

### 2.1.2 Rede Mesh

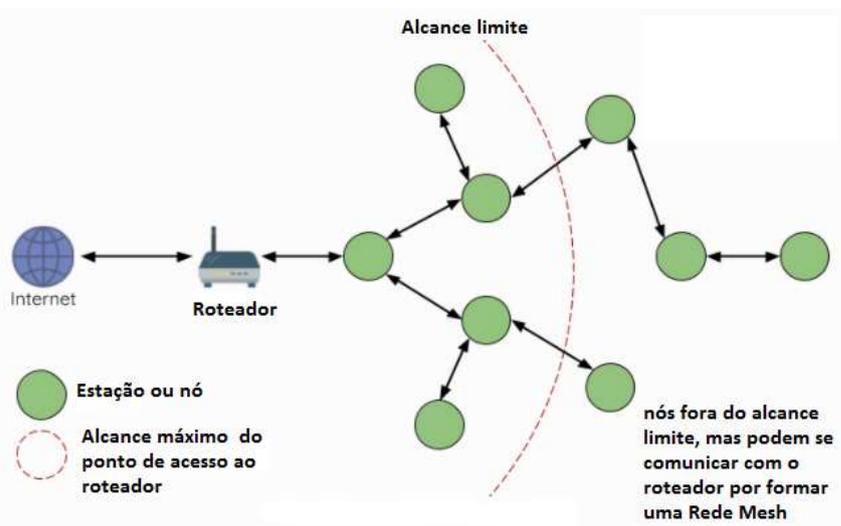
Uma Rede Mesh difere de uma rede Wi-Fi de infraestrutura tradicional porque os nós não são forçados a se conectar a um nó central. Em vez disso, os nós têm permissão para se conectar com nós vizinhos. Os nós são mutuamente responsáveis por retransmitir as transmissões uns dos outros. Isso permite que uma Rede Mesh tenha uma área de cobertura muito maior, pois os nós ainda podem alcançar a interconectividade sem a necessidade de estar ao alcance de um nó central, conforme mostrado na Figura 3. Por consequência também é menos suscetível à sobrecarga, pois o número de nós permitidos na rede não é mais limitado por um único nó central.

A Rede Mesh é uma rede **ad hoc** (ad hoc é uma expressão latina para “esta finalidade”, para “este objetivo”), é uma rede não estruturada, e múltiplos saltos (multi-hop) podem ser efetuados caso necessário para efetuar a comunicação.

A arquitetura multi-hop permite redução do consumo de energia na transmissão, pois evita que todos os nós da rede precisem transmitir informações diretamente ao nó que faz comunicação com o gateway, e pode enviar a informação por um caminho mais curto. Em contrapartida, os dispositivos mais próximos ao Gateway têm maior consumo de energia pois tem a função de repassar as informações de outros nós.

No propósito deste trabalho, foi utilizado a tecnologia de comunicação LoRa (*Long Range*) e a formação da rede acontece de forma dinâmica, sendo que uma estação (nó) se liga a outro nó conforme critérios definidos, como por exemplo, parâmetros que expressam a perda de potência do sinal emitidos pelos vizinhos.

Figura 3 – Ideia básica de uma Rede Mesh



Fonte: Adaptado de ESP-MESH - ESP32 - ESP- IDF PROGRAMMING GUIDE LATEST DOCUMENTATION

## 2.2 TECNOLOGIA DE MODULAÇÃO LORA

Nos inúmeros propósitos para aplicações de IoT, em muitos casos é necessária uma rede de alto alcance para cobrir a dispersão dos sensores que compõe um sistema de rede. Na tentativa de solucionar o problema de alcance, a empresa Semtech desenvolveu a tecnologia LoRa (*Long Range*), que é uma técnica de modulação chamada de *Spread Spectrum* (Espalhamento Espectral), derivada da tecnologia CCS (*Chirp Spread Spectrum*).

O objetivo deste capítulo foi abordar sobre a da técnica de modulação LoRa (camada física da comunicação), pois ao abordar o tema LoRa de uma maneira geral pode-se confundir também com o protocolo LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network Protocol*), que envolve quatro camadas de comunicação conforme veremos em capítulo posterior.

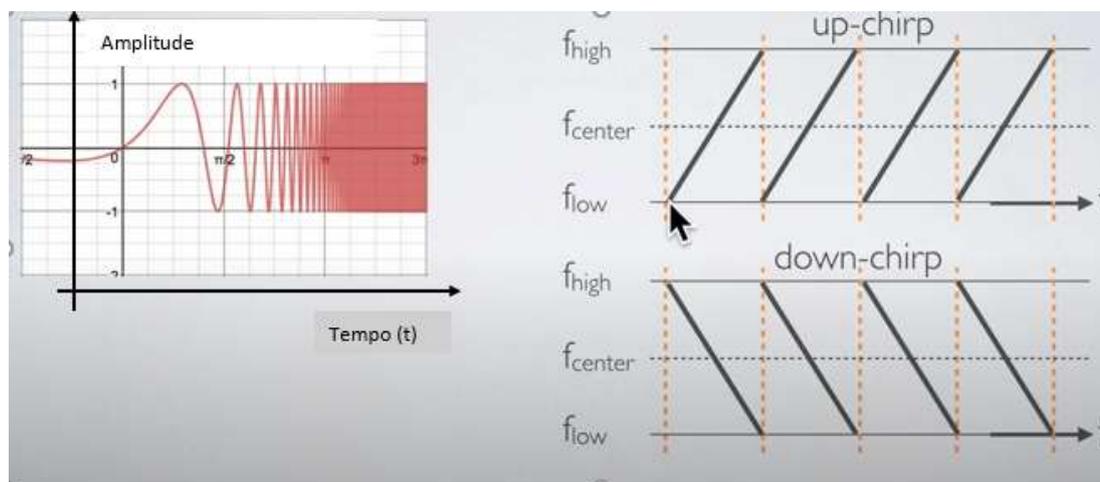
Cabe ainda ressaltar que cada nó da rede consiste em um sistema que contém sensores e um microcontrolador (que tem um programa embarcado para previamente tratar e processar os dados obtidos) e um transceptor, que é um módulo de rádio capaz de modular e demodular o sinal de transmissão.

### 2.2.1 Modulação LoRa

Espalhamento espectral (*spread spectrum*) é a tecnologia na qual a energia média do sinal transmitido é espalhada sobre uma largura de faixa muito maior do que a largura de faixa que contém a informação (TELECO.COM.BR, [s. d.]).

A modulação de sinais na arquitetura LoRa por espalhamento espectral é propagada em faixas de frequência não licenciadas ISM (*Industrial, Scientific and medical*), o que, legalmente, facilita a sua utilização por entidades e, ao mesmo tempo, barateia o custo de seu uso. Um pulso Chirp é um sinal cuja frequência varia monotonamente. Se aumentamos a frequência temos um "Up-Chirp" e se ela decresce temos um "Down-Chirp". Os Chirps são deslocados ciclicamente, isto é, quando se atinge a frequência mais alta retorna-se para a frequência mais baixa (LORA - REDES DE COMPUTADORES I, [s. d.]) Portanto, a informação que qualquer sinal carrega é dada pelos saltos de frequência, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Modulação LoRa



Fonte: Adaptado de LORA - REDES DE COMPUTADORES I [s. d.]

Pode-se observar à esquerda da Figura 4, o deslocamento de frequência central ( $f_{center}$ ) da portadora e à direita da mesma figura temos o conceito de Chirp (Up-Chirp e Down-Chirp). Quando ao longo do tempo (*time*) a frequência se desloca de uma frequência menor ( $f_{low}$ ) para uma frequência maior ( $f_{High}$ ) chamamos de Up-Chirp. Quando ao longo do tempo a frequência se desloca de uma frequência maior para uma frequência menor chamamos de Down-Chirp. A direita da Figura 4, observa-se a variação do sinal no eixo do tempo, mantendo a amplitude constante.

Conforme (ORTIZ *et al.*, 2019), os parâmetros de configuração disponíveis para a customização da camada física são os seguintes: a frequência da portadora, a largura de banda (BW), a taxa de código (*Code Rate-CR*) e o Fator de Espalhamento (FS). A seguir foi apresentado o que corresponde cada um destes parâmetros.

### 2.2.2 Frequência da Portadora

A frequência da portadora define a frequência central da banda de transmissão. As frequências de transmissão não licenciadas ISM (Industrial, Scientific and Medical) são na ordem dos MHz. Para o Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), a faixa de frequências

regulamentada para ISM está entre 915 e 928MHz (ANATEL - RESOLUÇÃO No 705, DE 21 DE DEZEMBRO DE 2018, [s. d.]).

A Tabela 1 apresenta as frequências não licenciadas ISM de transmissão LoRa pelo mundo. Observa-se que para a China e para o continente europeu tem-se duas faixas de frequências.

Tabela 1 – Frequências de Transmissão LoRa no mundo

Países ou Continente	Frequência (MHz)
Estados Unidos	902-928
Austrália	915-928
China	779-787 e 470-510
Europa	863-870 e 433
Brasil	902-928

Fonte: Elaborado pelo autor

### 2.2.3 Largura de Banda (*BW*)

A largura de banda do sinal é a diferença entre a maior e a menor frequência que compõem o sinal transmitido (ROBSON MATEUS, [s. d.]). Na técnica de modulação LoRa, a largura de banda do sinal transmitido pode ser programável nos valores de 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz.

Um conceito teórico importante em transmissão de dados, é que a taxa de transmissão de dados está relacionada com a largura de banda e com o ruído. Através do Teorema de Nyquist, prova-se que é possível estabelecer um limite teórico para a taxa máxima de transmissão dos sinais em uma rede de comunicação.

O teorema de Nyquist diz que a capacidade de um canal será (idealmente) igual ao dobro da largura de banda vezes o logaritmo do número de níveis discretos (TANENBAUM; TRADUÇÃO; DE SOUZA, [s. d.]), conforme a Equação 1.

$$\text{Taxa máxima de dados} = 2BW(\log_2 V)$$

1

Sendo:

- $BW$  = Largura de Banda do canal de transmissão.

- V corresponde ao número de níveis do sinal (para um sinal digital teríamos dois níveis de tensão para representar o estado lógico 0 e o estado lógico 1).
- Taxa máxima de dados = Taxa de transmissão de dados em bits por segundo (bps).

Quanto ao efeito do ruído na taxa de transmissão, todo sinal elétrico ao propagar-se por um meio de transmissão pode sofrer algum tipo de perturbação ou degradação. Assim, os "ruídos" são perturbações de natureza aleatória, causadas por agentes externos ao sistema ou a um subproduto um processamento em um circuito eletrônico.

Em telecomunicações, a relação sinal ruído é um termo para a razão entre as potências de um sinal contendo algum tipo de informação e o ruído de fundo, conforme a Equação 2 (ROBSON MATEUS, [s. d.]).

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \quad 2$$

Sendo:

- $P_{sinal}$  = Potência elétrica do sinal transmitido em Watts [W].
- $P_{ruído}$  = Potência elétrica do ruído de interferência Watts [W];
- $SNR$  é a relação sinal-ruído (adimensional)

Por sua vez, a potência do sinal transmitidos, a potência do sinal ruído e a relação sinal-ruído podem ser expressas em decibéis (dB), conforme mostrado na Equação 3 e Equação 4. A relação Sinal-Ruído (SNR) em decibéis é expressa na Equação 5.

$$P_{sinal,db} = 10\log_{10}(P_{sinal}) \quad 3$$

$$P_{ruído,db} = 10\log_{10}(P_{ruído}) \quad 4$$

5

$$SNR_{db} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) = P_{sinal,db} - P_{ruído,db}$$

O Teorema de Shannon relaciona a taxa máxima teórica de transferência de dados em bits por segundo (bps) com a relação à largura de Banda e Sinal-Ruído (TANENBAUM; TRADUÇÃO; DE SOUZA, [s. d.]), conforme mostrado na Equação 6.

$$taxa\ máxima\ de\ dados = BW \log_2(1 + SNR) \quad 6$$

Relacionando este conceito a modulação LoRa, permite-se a seleção de três larguras de banda (125Hz, 250Hz e 500Hz). A seleção de uma maior largura de banda de transmissão permite uma taxa de transmissão de dados mais alta (portanto, menor tempo no ar), porém mais suscetível a interferências de ruídos.

#### 2.2.4 Razão de Código (Code Rate -CR)

Conforme Ortiz et al. (2019), a razão de código CR define quantos bits são utilizados para a redundância da mensagem, para realizar a recuperação de erros. A taxa de codificação ( $T_c$ ) é definida conforme a Equação 7.

$$T_c = \frac{4}{4+CR}, \text{ com } CR \in \{1,2,3,4\} \quad 7$$

#### 2.2.5 Parâmetro SF (Fator de Espalhamento Espectral)

Na Figura 4, foi visto o conceito de salto chirp (Up-Chirp e Down-Chirp), que é um deslocamento crescente ou decrescente na frequência de transmissão. Este salto de frequência, quando decodificado, representa um símbolo. Um símbolo representa um ou mais bits de dados e apresenta  $2^{SF}$  valores possíveis (em binário seria equivalente a um número de  $SF$  bits). De modo enfático, o fator de espalhamento (SF) representa o número de bits da modulação. Na prática, ele representa a duração de um Chirp, ou seja, quanto maior o SF, mais longo é o Chirp

e mais bits serão transmitidos por Chirp. A cada incremento no SF, o tempo no ar e um Chirp dobra (LORA - REDES DE COMPUTADORES I, [s. d.]).

Conforme Ortiz et al. (2019), o Fator de Espalhamento (SF) é um valor configurável de 7 a 12 e considerando o Fator de Espalhamento e a Largura de Banda (BW), podemos encontrar a taxa de transmissão ( $R_b$ ) em bits por segundo (bps), conforme a Equação 8.

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}}, \text{ com } SF \in \{7,8,9,10,11,12\} \quad 8$$

Utilizando-se taxa de codificação, define-se uma taxa máxima de transmissão teórica em bps (ORTIZ et al., 2019), conforme a Equação 9:

$$R_b = SF * \frac{Tc \cdot BW}{2^{SF}}, \text{ com } SF \in \{7,8,9,10,11,12\} \quad 9$$

A título de exemplo, a Tabela 2 exibe os valores teóricos de taxa de transmissão de diferentes valores de espalhamento, para um CR igual à 4/5 e uma largura de banda de 500 kHz.

Tabela 2 – Valores Teóricos da Taxa de Transmissão em função do SF

Fator de Espalhamento	Taxa de transmissão Teórica (bits/s)
SF 7	21875
SF 8	12500
SF 9	7031
SF 10	3906
SF 11	2148
SF 12	1172

Fonte: (ORTIZ *et al.*, 2019) – Adaptado pelo autor

Conforme a folha de dados (SEMTECH CORPORATION, 2013), a relação de taxa de Chirps ( $R_c$ ), em valores de Chirps por segundo (cps) é definida pelo fator de espalhamento (SF) e a taxa de transmissão (RB), conforme a Equação 10.

$$R_c = 2^{SF} * R_b \quad 10$$

### 2.2.6 Sensibilidade do Receptor (S)

Para entender melhor como implementar um projeto de rádio usando o formato de modulação LoRa, é necessário examinar brevemente os fatores que influenciam a sensibilidade do receptor de rádio.

Conforme a folha de dados (SEMTECH CORPORATION, 2013), este parâmetro considera fatores como relação Sinal Ruído, Ruído Termal, Ruído de 1Hz da Largura de Banda e um fator de ruído da própria configuração de hardware do módulo LoRa SX1272/3/6/7/8. A Sensibilidade do Receptor (S) em dB, é calculada conforme a Equação 11.

$$S = -174 + 10 \log_{10} BW + NF + SNR \quad 11$$

Sendo:

- O valor de -174 corresponde a um ruído de 1 Hz da Largura de Banda e pode ser influenciada pela temperatura do receptor.
- BW é a Largura de Banda.
- NF é o ruído do receptor em dB, para uma dada implementação de hardware.
- SNR é a relação sinal ruído em dBm, que se define como um nível de potência de sinal em relação ao nível de referência de referência de 1 mW, conforme a Equação 12.

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \quad 12$$

A Tabela 3 mostra a influência do Fator de Espalhamento (FS) no tempo de transmissão no ar e na sensibilidade do receptor, dado um *Code Rate* CR=2 e uma Largura de Banda BW= 250kHz.

Tabela 3 – Influência do Fator de Espalhamento na Sensitividade do Receptor

SF	Tempo no ar da transmissão [ms]	Sensitividade [dBm]
12	528,4	-134
10	132,1	-129
8	39,2	-124

Fonte: SEMTECH CORPORATION (2013) – Adaptado pelo autor

Ao aumentar o fator de Espalhamento, a taxa de transferência de dados em bps é diminuída, conforme mostra a Tabela 2, porém a relação sinal-ruído (SNR) é significativamente melhorada. Este conhecimento é relevante ao fazer o balanço da necessidade de aumentar a taxa de transferência de dados e o alcance da comunicação.

#### 2.2.7 Indicação de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI)

A indicação de intensidade do sinal recebido, do termo em inglês *Received Signal Strength Indication (RSSI)* é a potência do sinal recebido em miliwatts e é medida em dBm. É um parâmetro importante pois é um valor determinante para o programa embarcado que constrói de forma automática a Rede Mesh, definido para um nó qual o dispositivo mais próximo fará a conexão de rede (ou seja, qual dispositivo será escolhido como 'pai') e até mesmo as possibilidades de salto de comunicação caso necessário. O RSSI é uma medida de quão bem um receptor pode "ouvir" um sinal de um emissor (LORA — LORA DOCUMENTATION, [s. d.]).

O RSSI é medido em dBm e é um valor negativo, e quanto mais próximo de zero, melhor é o sinal.

Os valores de RSSI típicos são:

- RSSI mínimo = -120 dBm, e é considerado um sinal fraco.
- RSSI a partir de -30 dBm, o sinal é considerado forte.

## 2.3 LORAWAN®

O propósito deste trabalho é desenvolver uma rede Mesh com tecnologia de comunicação LoRa para construir uma rede de sensores. Porém, ao abordar o tema LoRa surge inevitavelmente a Rede LoRaWAN.

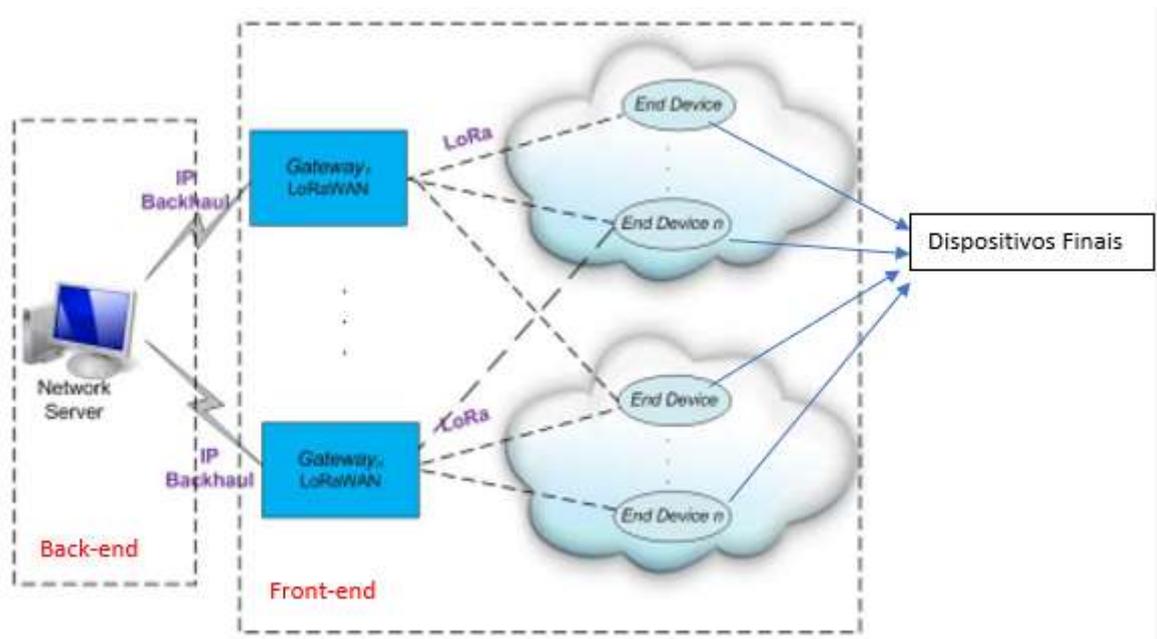
O protocolo LoRaWAN® pertence a associação LoRa Alliance®. A especificação LoRaWAN® é um protocolo de rede de baixa potência, área ampla de rede (LPWAN) projetada para conectar ‘coisas’ operadas por bateria, com comunicação sem fio à internet, em redes regionais, nacionais ou globais e tem como alvo os principais requisitos da Internet das Coisas (IoT), como comunicação bidirecional, segurança de ponta a ponta, mobilidade e localização (ABOUT LORAWAN® | LORA ALLIANCE®, [s. d.]).

A LoRa Alliance® é uma associação aberta sem fins lucrativos que cresceu para mais de 500 membros desde seu início em março de 2015, tornando-se a maior aliança de crescimento mais rápido no setor de tecnologia. Seus membros colaboram estreitamente e compartilham experiências para promover e impulsionar o sucesso do protocolo LoRaWAN® como o padrão global aberto líder para conectividade LPWAN IoT segura e de nível de operadora. Com a flexibilidade técnica para atender a uma ampla gama de aplicativos IoT, tanto estáticos quanto móveis, e um programa de certificação para garantir a interoperabilidade, o LoRaWAN® já foi implantado pelas principais operadoras de rede móvel globalmente, com ampla expansão contínua em 2020 (ABOUT LORA ALLIANCE® | LORA ALLIANCE®, [s. d.]).

Conforme Lavric e Popa (2017), a rede LoRaWAN é implementada usando a topologia de rede estrela. A estrutura desta arquitetura pode ser separada em back-end e uma parte de front-end. A parte de back-end consiste em um servidor de rede que armazena as informações recebidas dos sensores. O front-end consiste no módulo gateway e os nós dos dispositivos finais. O Gateway atua como uma ponte entre os nós de dispositivos finais e os servidores de rede. A informação entre o servidor de rede e os módulos do Gateway são enviados através da conexão IP. Os módulos do dispositivo final não têm recursos de roteamento, e as mensagens são enviadas diretamente para o concentrador de Gateway através de um mecanismo

de um salto (*hop*). A tecnologia LoRaWAN tem uma taxa de transferência de dados que variam entre 0,3 kbps e 50 kbps. A fim de maximizar a vida útil da bateria, os dispositivos gerenciam sua potência de comunicação de rádio frequência e possui uma razão de transferência de dados adaptativa conhecida como *ADR* (*Adaptative Data Rate*). A arquitetura LoRaWAN é mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Arquitetura LoRaWAN



Fonte: Lavric e Popa (2017) – Adaptado pelo autor

### 2.3.1 Camadas do Protocolo LoRaWAN

O protocolo de comunicação LoRaWAN possui 4 camadas distintas, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Camadas do Protocolo LoRaWAN



Fonte: LORA (s. d.) – Adaptado pelo autor

Conforme (LAVRIC; POPA, 2017), os dispositivos finais na Rede LoRaWAN podem ser classificados como Classe A, Classe B ou Classe C, conforme o mecanismo de comunicação envolvido.

- Dispositivos Classe A: Possuem capacidade de comunicação bidirecional. O intervalo de tempo durante o qual o dispositivo está transmitindo é seguido por dois intervalos de tempos curtos durante o qual o dispositivo pode receber informações. Dispositivos desta categoria podem receber dados do servidor depois de terem enviado informações, buscando eficiência energética. Se alguém enviar os dados, irá esperar pelo próximo envio agendado.

- Dispositivos Classe B: Também têm capacidade de comunicação bidirecional e um intervalo de tempo adicional que permite que eles recebam dados. Além dos intervalos de tempo aleatórios durante o qual os dados podem ser recebidos que o dispositivo tipo A permite, o dispositivo tipo B também pode usar uma série de recepção por um tipo de mensagem tipo *Beacon* (mensagem farol, para sincronização da comunicação) enviada pelo Gateway. Dispositivos Classe C: Possuem capacidade de comunicação bidirecional e duração de tempo ilimitada para receber informação. O único intervalo de tempo que deixa de receber informações é quando o dispositivo está enviando. Adequado para dispositivos atuadores.

### 2.3.2 Formato do pacote LoRa

O pacote de informações LoRa é composto por vários elementos, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Exemplo do formato do Pacote LoRa

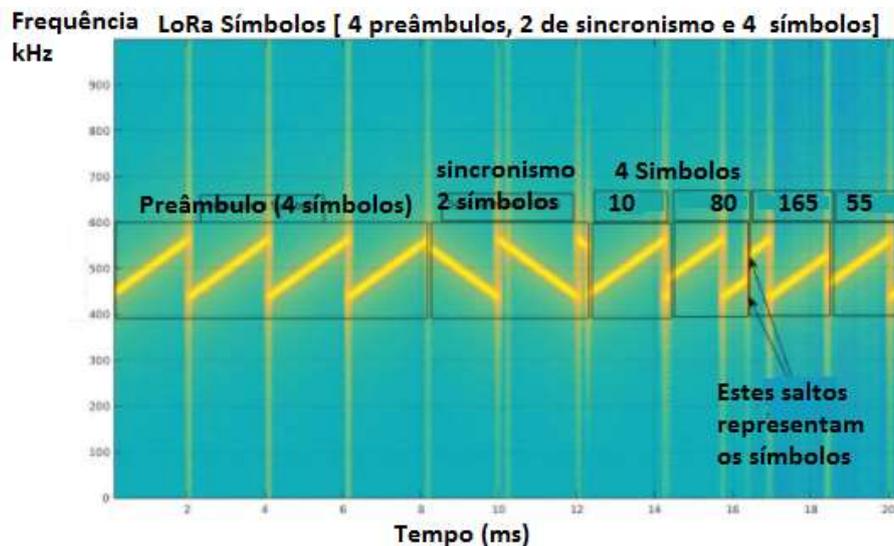


Fonte: Semtech Corporation (2013)

Na Figura 7, o termo CRC corresponde a verificação cíclica de redundância (do inglês, *CRC - Cyclic Redundancy Check*) que é um método de detecção de erros normalmente usada em redes digitais e dispositivos de armazenamento para detectar mudança acidental em cadeias de dados.

Na Figura 8 apresenta um exemplo de como é um formato de pacote com a variação da frequência em função do tempo.

Figura 8 –Variação da frequência em função do tempo de um pacote LoRa



Fonte: LoRa - Redes de Computadores I (s. d.) – Adaptado pelo Autor

### 2.3.3 Gateway

O Módulo Gateway é uma das ferramentas mais importantes em uma rede LoRa e é o equipamento responsável pela ponte entre os protocolos LoRa/LoRaWAN e a internet via conexão Wifi. Como o objetivo de uma rede de sensores IoT é a captura de dados para a aplicação, pode ser imprescindível o transporte desses dados pela internet. Desta forma, é necessário que exista uma interface de processamento para identificar um pacote do protocolo LoRa/LoRaWAN, capturar seus dados e informações importantes, reencapsular em um pacote do protocolo IP e enviá-lo para um servidor de internet, que, futuramente, o encaminha para a camada de aplicação. Essa interface de processamento é o módulo gateway, que conta com um transceptor para a comunicação LoRa e um módulo de Wi-Fi (IEEE 802.11) para a comunicação com um servidor via internet.

Existem vários modelos de Gateway e a escolha do dispositivo depende do número de canais da rede, da aplicação, do ambiente que será instalado.

A Figura 9 mostra um Gateway de dois canais, produzido pela Heltec, ao custo de 39 Dólares (HT-M00 DUAL CHANNEL LORA GATEWAY – HELTEC AUTOMATION, [s. d.]).

Figura 9 – Gateway Heltec dois canais



Fonte: HT-M00 Dual Channel LORA Gateway– Heltec Automation (s. d.)

A Figura 10 mostra um outro Gateway de 8 canais também produzido e comercializado pela empresa Heltec, porém ao custo de 499 Dólares, destinado a condições mais severas de operação (ambiente sujeito às vibrações e ruídos).

Figura 10 – Gateway Heltec 8 canais



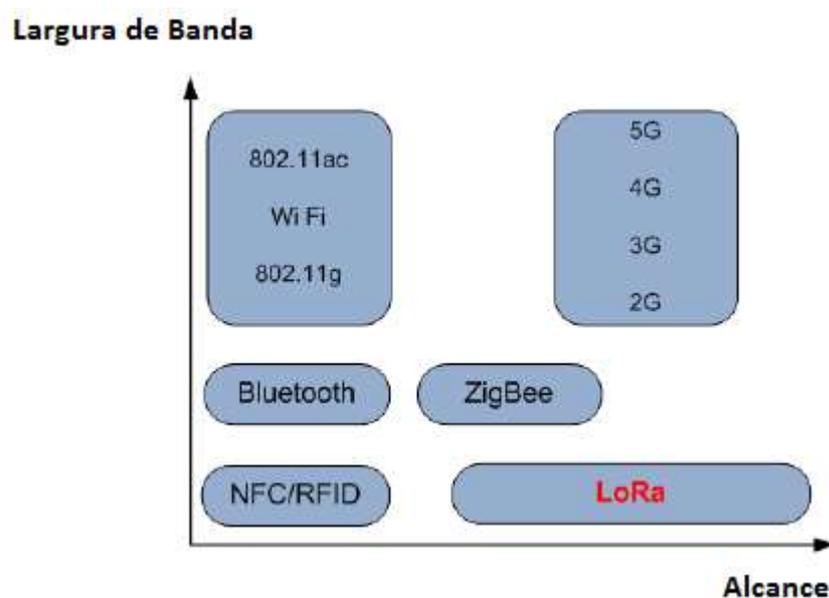
Fonte: HT-M02 Edge LoRa Gateway – Heltec Automation (s. d.)

### 2.3.4 Comparação com outras tecnologias de comunicação

A tecnologia LoRa é um padrão de comunicação em que se tem o compromisso de comunicação de longo alcance, porém com uma baixa taxa de transmissão de dados. Portanto, não é propósito desta comunicação transferir imagem, vídeos ou informações de grande tamanho.

A Figura 11 traz uma comparação entre tecnologias de comunicação sem fio, em relação ao alcance e taxa de dados de transmissão. Conforme os aspectos teóricos, quanto menor a largura de banda menor é a taxa de transferência de dados.

Figura 11 – Comparativo entre tecnologias de comunicação sem fio



Fonte: Lavric e Popa (2017) – Adaptado pelo autor

## 2.4 CULTIVO DE ALGODÃO E O PROBLEMA CAVITOMA

O estudo do problema Cavitoma no cultivo de algodão serviu de inspiração para a realização deste trabalho, embora não seja o objetivo específico deste. Trata-se de um exemplo em que as condições de logística e infraestrutura, como grandes distâncias envolvidas, ausência de energia elétrica e rede de Internet, a dificuldade de comunicação por cabos (tanto pela distância como pelo manejo do solo e movimentação de colheitadeiras), poucos obstáculos (campo aberto) um ambiente propício para a comunicação LoRa e uma rede dinâmica inteligente (rede *Mesh*).

O processo de combustão ou ignição espontânea depende de uma ação química (processo exotérmico de fermentação, sujeita a oxidação bacteriana), muito comum nas fibras do algodão. Ela oxida e libera calor, se estiver confinada, o calor não pode escapar e pode haver ignição. A fermentação do algodão é denominada de Cavitoma. O fogo tem início e desenvolvimento muito lento, desencadeando-se de forma violenta quando chega a superfície do empilhamento com combustão alimentada pelo ar (INCÊNDIO EM ALGODÃO É RISCO PERMANENTE EM PARTE DA CADEIA DE PRODUÇÃO, [s. d.]

Cavitoma é um termo inventado na década de 1950 para descrever os danos microbiológicos à fibra do algodão ou à decomposição da celulose na fibra por micro-organismos. Esta atividade microbiológica prejudicial começa no campo, quando o caroço maduro aberto está exposto ao tempo úmido ou chuvoso e pode continuar enquanto a semente do algodão estiver no caroço e quando a fibra é armazenada em fardo.

No caso das algodozeiras, os incêndios nos depósitos, geralmente não podem ser controlados em sua fase inicial e tendem a ser bastante severos. Num armazenamento em blocos sólidos, o fogo se inicia normalmente na face exterior e se propaga para cima, desenvolvendo-se em forma de leque, porém o calor inicia no centro do bloco. O fogo na base aquece o material imediatamente acima, dando início à sua combustão, além disso, o calor gerado entra em contato com outros blocos ou prateleiras que são separados por corredores e também começam a arder (INCÊNDIO EM ALGODÃO É RISCO PERMANENTE EM PARTE DA CADEIA DE PRODUÇÃO, [s. d.]

Algodão em pluma é o produto resultante da operação de beneficiamento do algodão em caroço. No transporte desse produto, a Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT), considera que o algodão em pluma naturalmente apresenta umidade, o que é considerado aceitável, desde que respeitado o limite para este teor, até 10%, (Observe-se que a comercialização de algodão não é feita com umidade superior a esse percentual). A umidade do algodão em pluma, acima desse percentual ocasiona fermentação, podendo causar a sua combustão espontânea, por causa do aumento da temperatura. Tal fato é indicativo de periculosidade para fins de transporte. Quando o algodão em pluma apresentar alto teor de umidade, e somente nessa condição, passa a ser considerado produto perigoso para fins de transporte.

Cuidados e precauções devem ser tomados para evitar a umidificação do algodão em pluma, porque pode, na decomposição deste, liberar gases inflamáveis, e ocasionar risco de que a carga se inflame durante o transporte, além do que a movimentação dos fardos na carroceria, pode gerar atrito (energia estática) e facilitar a combustão.

Outro fato é em áreas de armazenagem, os registros de incêndio indicam que 60% dos incêndios ocorrem entre 18h e 6h (INCÊNDIO EM ALGODÃO É RISCO PERMANENTE EM PARTE DA CADEIA DE PRODUÇÃO, [s. d.]).

Como medidas de segurança para evitar os incêndios pode-se citar:

- Espaçamento e altura adequada no empilhamento de fardos, evitando o empilhamento excessivo próximo à estrutura de cobertura e de luminárias, e instalação de *sprinklers* e extintores de incêndio, com rede de hidrantes.
- Fracionamento das áreas e separação horizontal, evitando que em caso de incêndio ele se propague para outra linha de armazenamento de fardos.
- Sistema de detecção de incêndio automáticos, que possibilite detecção em do incêndio em estágio inicial.
- Rotina de ronda nas instalações, o que é uma questão difícil pelas distâncias envolvidas.

O processo de formação de fardos na colheita do carvão é mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Fardos na colheita de algodão



Fonte: Incêndio em algodão é risco permanente na cadeia de produção (s. d.)

A Figura 13 mostra perda completa de um pátio de produção.

Figura 13 – Incêndio em produção algodão



Fonte: Incêndio em fazenda de algodão causa perda de R\$ 18 Milhões em MT -  
Revista Globo Rural | Algodão (s. d.)

A Figura 14 também mostra um incêndio em um pátio de algodão, com prejuízo de 20 Milhões de Reais à empresa, mas ilustra bem aspectos da propagação e locais de concentração de chamas. Pode ser um fato relevante a concentração de gases inflamáveis no espaço os fardos.

Figura 14 – Concentração de chamas em incêndio de fardos de algodão



Fonte: Incêndio causa prejuízo de R\$ 20 milhões à empresa de Algodão | TV Taquaril – Rede Record (s. d.)

A Figura 15 mostra uma unidade de processamento em uma fazenda em Rondônia, em que mostra a distribuição do estoque e a unidade de processamento, e é um dos locais possíveis para instalação da Rede Mesh com comunicação LoRa projetada neste trabalho. Podemos notar que existem cores diferentes dos fardos, que são em função da diferenciação da safra, como também um incêndio em uma pilha centralizada, nos dando uma noção dos aspectos de construção de malha.

Figura 15 – Incêndio em unidade de processamento de algodão



Fonte: Elaborada pelo autor

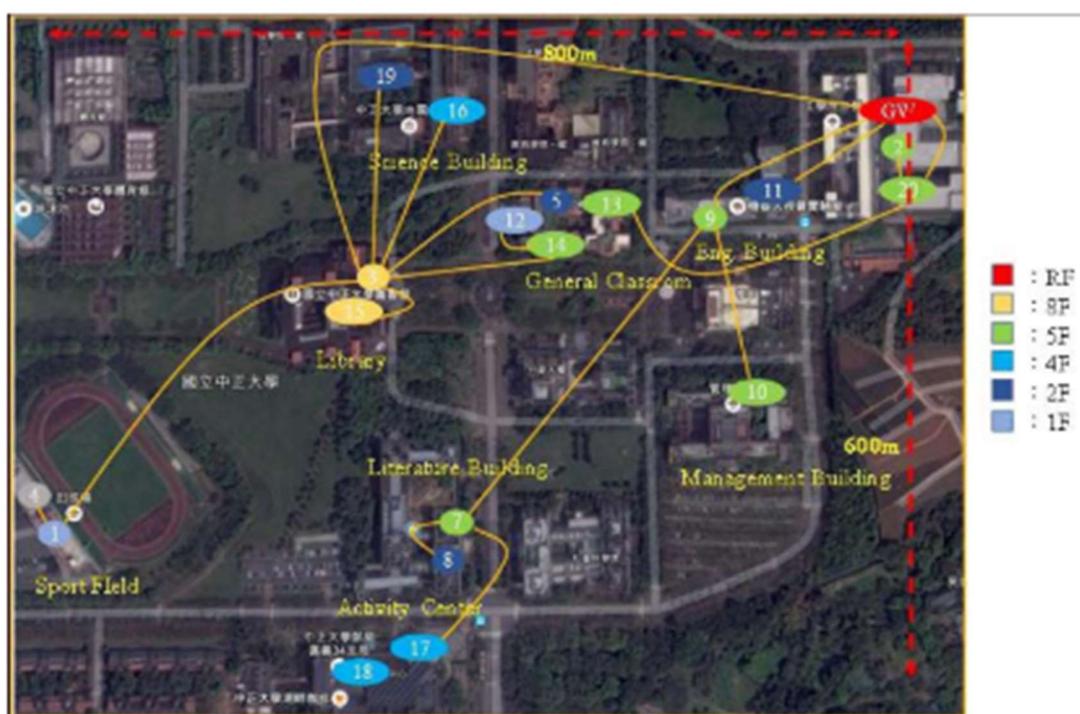
### 3 ESTADO DA ARTE

Este capítulo destaca alguns trabalhos que abordam o tema da construção de Rede Mesh relacionados com comunicação LoRa.

#### 3.1 Monitoração com Rede Mesh em Campus Universitário

O trabalho de (LEE; KE, 2018) corresponde a construção de uma Rede Mesh com comunicação LoRa em um Campus Universitário, rede formada por 19 sensores e um Gateway (GW), em uma área de 800 m x 600 m, com os dados coletados em um intervalo de 1 minuto. A distribuição de sensores é mostrada na Figura 16

Figura 16 – Rede Mesh em Universidade



Fonte: Lee e Ke (2018)

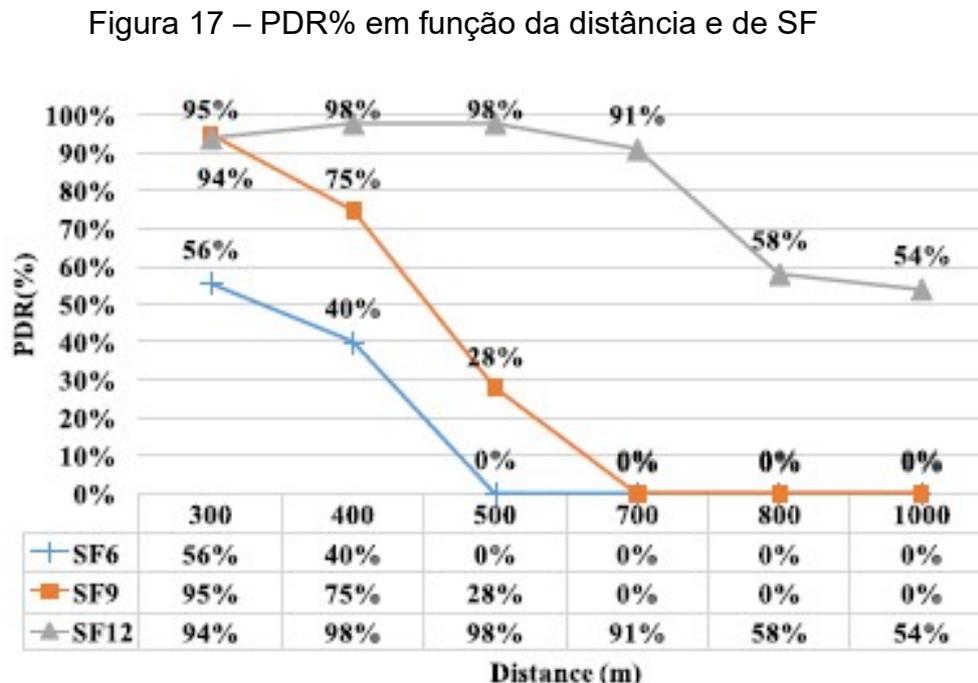
A legenda à direita na Figura 16 corresponde ao piso (andar predial) em que os respectivos sensores estão instalados. Neste trabalho, além das distâncias

envolvidas para a construção da rede, temos também os obstáculos relacionados à sensores em andares diferentes.

Um dos critérios neste trabalho para análise de desempenho da rede analisada é a taxa de entrega de pacotes *PDR* (*Packet Delivery Ratio*), variando-se parâmetros como a Largura de Banda (BW) e o Fator de Espalhamento (SF). A construção da rede Mesh foi construída com a característica de ser gerenciável, pois através do dispositivo Gateway é possível coletar informações sobre o roteamento, intensidade do sinal recebido (RSSI) e relação sinal-ruído (SNR).

Como condição de teste inicial, a potência de saída foi fixada em 20 dBm e a largura de banda BW de 125 kHz, dois nós foram colocados 1 m acima do solo e o transmissor envia 200 pacotes, que é colocado em linha com transmissão considerando os obstáculos fixos e móveis entre eles (sejam carros, pedestres e edifícios).

A Figura 17 mostra a relação de perdas de pacotes percentual (PDR%) em função da distância para diferentes valores de SF.



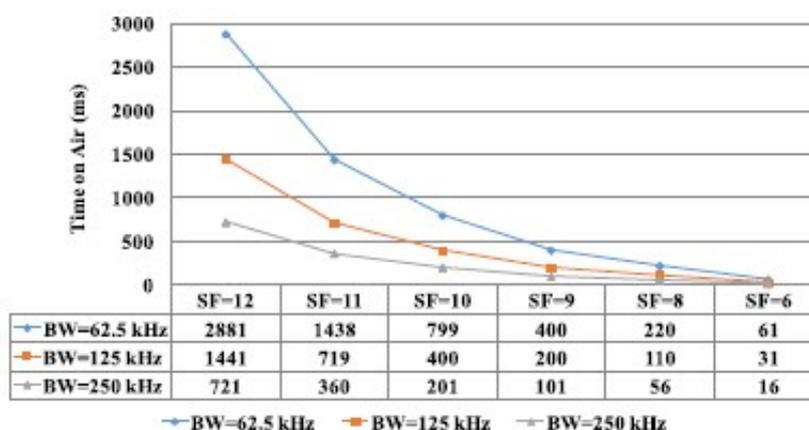
Fonte: Lee e Ke (2018)

Observa-se na Figura 17 que para garantir uma menor perda de pacotes em função da distância, o SF tem que ser aumentado, porém isso significa uma menor

taxa de dados. Da mesma forma, no trabalho, é modificado o valor da Largura de Banda e os valores de SF para garantir a comunicação entre pisos.

Outro item avaliado neste trabalho, é a avaliação do tempo da informação no ar para diferentes larguras de banda e diferentes valores de SF. Isto é mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Tempo de informação do ar em milissegundos em função de BW e SF



Fonte: Lee e Ke (2018)

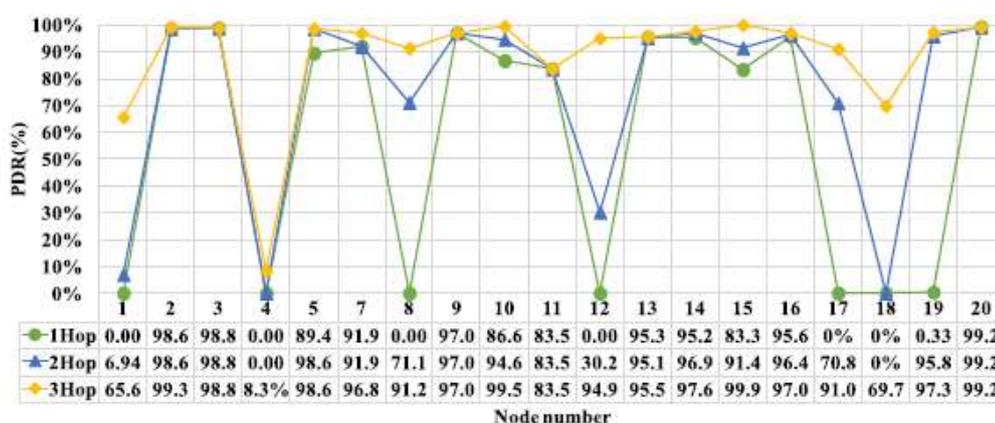
No experimento em escala de campus, teve 19 nós LoRa (originalmente, foi instalamos 20 nós, mas o nó 6 foi perdido durante experimento), distribuídos em uma área de 800 m × 600 m em um campus universitário. Definiu-se que o Gateway (GW) coletasse dados em Intervalos de 1 minuto por oito dias. Nesta configuração, para cada nó, a latência máxima é de 60 s, dependendo de quando o nó foi consultado pelo GW. Cada nó é consultado pelo Gateway a cada minuto, então será consultado  $60 \text{ (min)} \times 24 \text{ (h)} \times 8 \text{ (dias)} = 11.520$  vezes (pacotes) se um nó estiver conectado à rede durante todos os oito dias. Os parâmetros LoRa PHY foi definido para SF = 12 e BW = 250 kHz. Neste experimento, o foco foi apenas no desempenho da comunicação e o conteúdo de pacotes de dados não foi considerado. Os nós formam uma rede sem fio Rede Mesh automaticamente e o Gateway coleta dados dos nós periodicamente com base em uma rede com possibilidade de múltiplos saltos (*multi-hop*).

No experimento de Lee e Ke (2018), os nós não têm permissão de envio de dados ativamente, e quem decide o nó a ser consultado é o gerenciamento do Gateway, e isto traz de desvantagem uma maior latência.

O experimento de Lee e KE (2018) não faz um estudo da segurança de informação e do consumo de energia.

O resultado deste experimento é mostrado na Figura 19. Observa-se o contexto em que os múltiplos saltos propiciaram o aumento da taxa de entrega de pacotes. Este fato não ocorreu de forma exceto para o nó 4. Este estudo apoia a afirmação que a solução de Rede Mesh LoRa e a possibilidade de múltiplos saltos como solução para aumentar o PDR% sem implantar um GW adicional, evitando custos de infraestrutura associados ao sensor de IoT de coleta dados, diferente da Rede LoRaWAN em que a solução para este problema passaria necessariamente por custo de instalação de mais um Gateways.

Figura 19 – PDR% para cada nó e Rede Mesh com múltiplos saltos



Fonte: Lee e KE (2018)

A instalação de alguns destes sensores e da antena de Gateway é mostrada na Figura 20.

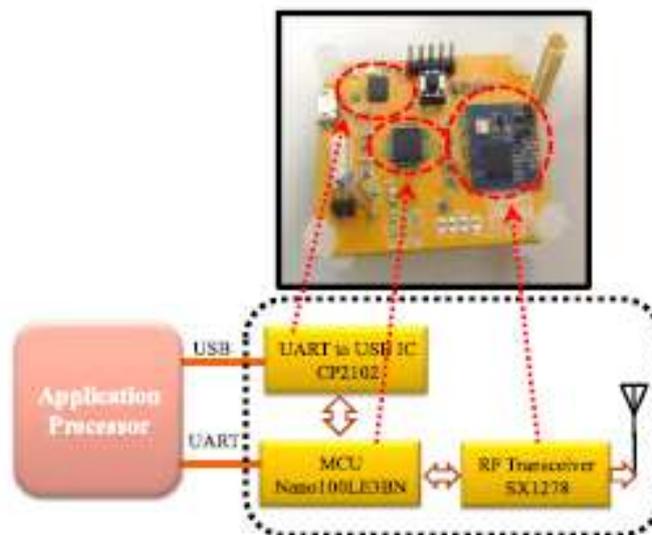
Figura 20 – Instalação dos sensores nós e o Gateway



Fonte: Lee e Ke (2018)

O hardware utilizado para os dispositivos nós constou de um microcontrolador Nuvoton NANO100LE3BN Cortex M0, a ponte CP2102 da Silicon Labs para fazer a comunicação USB e UART, e para o rádio usou o transceptor SX1278 da SEMTEH. Esta arquitetura é mostrada na

Figura 21 – Hardware utilizado nos dispositivos nós



Fonte: Lee e Ke (2018)

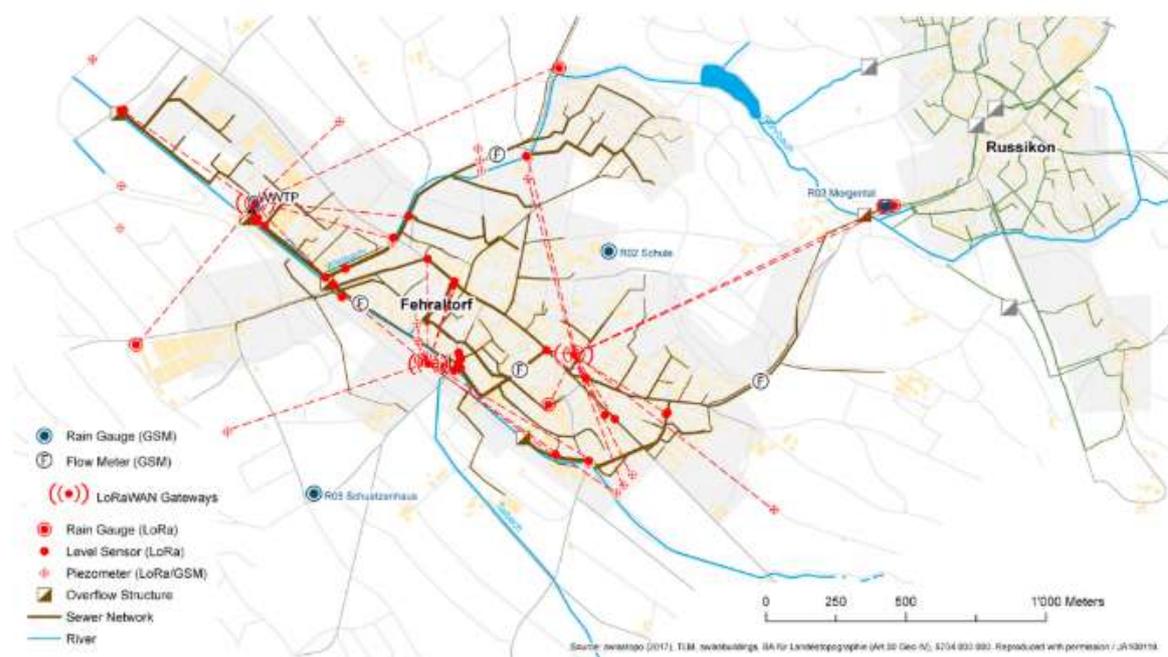
### 3.2 Rede Mesh LoRa em Dutos de Esgoto

Ebi *et al.* (2019) propõe uma rede de malha LoRa síncrona para monitorar a infraestrutura de dutos de esgotos subterrâneos, obtendo informação em tempo real para prevenir enchentes urbanas e transbordamento de esgotos. Discute as limitações de alcance do padrão LoRaWAN e os problemas relacionados à perda de pacotes de dados nos nós de sub-superfície e apresenta como solução para a perda de pacotes uma proposta de Rede Mesh LoRa síncrona, por meio de roteamento multi-hop em malha e sincronização de tempo precisa por meio de GPS opcional ou sinalização de tempo real.

Os equipamentos que formam a rede de sensores têm que ser robustos para resistir às condições agressivas desfavoráveis e permitir um longo ciclo de duração de bateria, pois também são instalados em áreas de difícil acesso. Comparando com as tecnologias disponíveis quanto ao alcance de longas distâncias, alta eficiência energética individual e dispositivos de baixo custo, a opção LoRaWAN pareceu adequada devido ao baixo custo de componentes, ser de protocolo aberto e possibilidade de usar banda de frequência não licenciada.

A Figura 22 apresenta um mapa da rede subterrânea de Sensores LoRaWAN no ano de 2018, em Fehraltordf (Zurique, Suíça) apresentando dois gateways, sensores piezômetros tecnologia LoRa e GSM (*Groupe Special Mobile*, que é tecnologia móvel para uso em celulares), em um total de 62 sensores distribuídos em sensores que monitoram chuvas, níveis de água em rios e esgotos, condutividade dielétrica em açudes, ar e águas residuais, bem como nível de água subterrânea, temperatura e condutividade em uma resolução temporal de 1 a 5 minutos.

Figura 22 – Mapa de uma Rede LoRaWAN subterrânea em Zurique



Fonte: Ebi *et al.* (2019)

O período de teste desta rede LoRaWAN refere-se há 5 meses (de janeiro a maio de 2017) com 25 sensores LoRaWAN, com 18 sensores abaixo do solo, com uma confiabilidade limitada de transmissão de dados (Razão de Erro de entrega de pacotes – PER% de 12%), calculada em 25 sensores e uma distância máxima de alcance ao Gateway de 500m, em que ainda a comunicação é possível.

O conceito de PER é uma relação entre o número de pacotes recebidos pelo Gateway e o número de pacotes esperados, conforme mostra a Equação 13

$$PER = 1 - \frac{\sum_T \text{Pacotes Recebidos}}{\sum_T \text{Pacotes esperados}} \quad 13$$

Na prática, esta rede LoRaWAN fornece cobertura de longo alcance acima do solo e de médio alcance para o subsolo. Para solucionar o problema de alcance seria necessário aumentar o número de Gateways, o que envolve custos de

instalação, disponibilidade de alimentação AC, solicitação de instalação em propriedades particulares e acesso à internet.

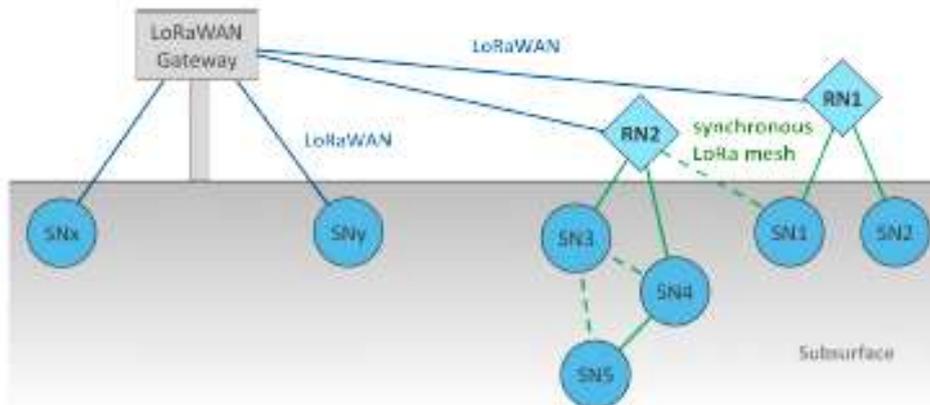
Outro problema diagnosticado na Rede de Sensores LoRaWAN os valores de sensores recebidos desviam-se em vários segundos, dificultando carimbar data e hora até chegar ao Gateway, dependendo da taxa de dados e da latência, fato que pode não ser relevante na maioria dos casos, mas pode ser relevante em uma questão de providência emergencial.

Para solucionar o problema, são utilizados repetidores intermediários (RN) e a partir deles ocorre a formação de sub-redes individuais, ou seja, nós sensores (SN). Os repetidores estão acima do solo e possuem conectividade LoRaWAN a um gateway e atua como um raiz para nós filhos (sensores), que são posicionados remotamente no subsolo. Para este fim, estende-se a arquitetura LPWAN original de um mero tipo de estrela para uma topologia de malha hierárquica, permitindo uma transmissão multi-hop e assim alcançar um roteamento mais flexível e de maior cobertura. Ao contrário dos gateways LoRaWAN, os repetidores não precisam de acesso à Internet. Tratando-se de hardware e firmware, tanto os repetidores (RN) e nós de sensores (SN) são idênticos, funcionam com o mesmo tipo de bateria, mas preenchem diferentes funções operacionais, e a comunicação entre os nós repetidores e nós de sensores é sincronizada com alto tempo de precisão.

Em uma rede LORAWAN o parâmetro SF e Potência de Transmissão são variáveis na operação da rede. Nesta nova configuração, chamada de Rede Mesh LoRa síncrona, o parâmetro SF foi fixado em 9 e a potência de transmissão em 14 dBm. Na prática, coexistem uma Rede LORAWAN e uma Rede Mesh, destinada aos sensores subterrâneos. A nova topologia chamada de Rede Mesh Síncrona é mostrada na Figura 23.

A Figura 24 mostra a conexão da Rede Mesh subterrânea. A Figura 25 mostra a instalação de um repetidor com comunicação LORAWAN.

Figura 23 – Topologia com Repetidores LORAWAN e Rede Mesh subterrânea



Fonte: Ebi *et al.* (2019)

A hora do sistema transmitida pelo RN corresponde à hora universal coordenada (*UTC – Coordinated Universal Time*). Assim, cada um dos nós é fornecido com informações UTC que permitem um tempo de informação absoluto, com uma melhor precisão de tempo, mesmo que as informações da sub-rede são capturadas em tempos diferentes.

Figura 24 –Imagem da Rede Mesh subterrânea



Fonte: Ebi *et al.* (2019)

Figura 25 – Dispositivo Repetidor LoRaWAN instalado em poste



Fonte: Ebi *et al.* (2019)

Como conclusão do trabalho, é demonstrado que o desempenho da sub-rede Mesh apresenta valores de PER% menores que 12%, em um desempenho superior à rede LoRaWAN inicial.

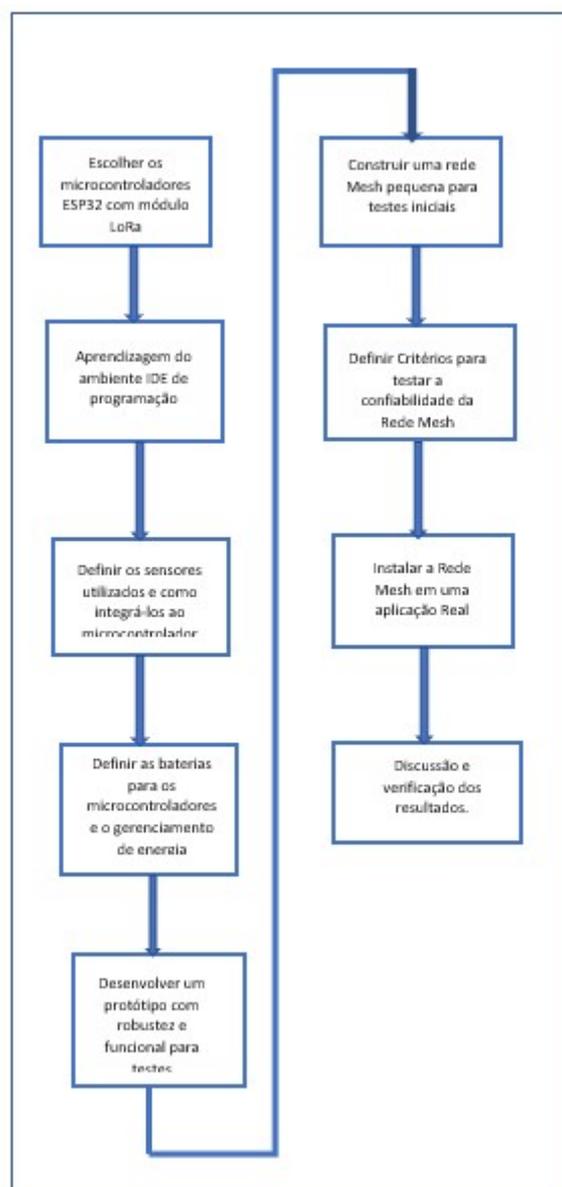
Também no trabalho (EBI *et al.*, 2019), é apresentado um mapa de uma rede estável, aplicando esta técnica mista de Rede LoRaWAN e Rede Mesh Síncrona. Este mapa de sensores é mostrado na Figura 26. Em destaque em vermelho, à esquerda no mapa, uma sub rede Mesh Síncrona, formada pelos nós numerados n70, n64, n78, n75, n72 e n74.



## 4 METODOLOGIA

Com o princípio de alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi elaborado um plano de execução (roteiro) para o desenvolvimento do trabalho, através do fluxograma apresentado na Figura 27:

Figura 27 – Fluxograma do plano de execução do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

Os itens apresentados a seguir descrevem resumidamente cada uma destas propostas.

#### 4.1 Microcontroladores com Comunicação LoRa

Como discutido nos objetivos do trabalho, o propósito é a construção de uma Rede Mesh de sensores com baixo custo.

A proposta inicial é a utilização de placas de microcontroladores em que já estivesse à disposição no laboratório da Unisinos para testes iniciais, que é a placa modelo Heltec Wifi LoRa 32 915 Mhz V2. A Placa WiFi LoRa 32 é uma placa de desenvolvimento voltada ao mundo da Internet das Coisas (IOT) e possui as dimensões de 25 mm x 52 mm x 10mm. A placa é mostrada Figura 28. O preço em dólar desta placa de US\$ 18.20 (LORA, 2019). A Figura 28 mostra a placa utilizada.

É equipada com ESP32, WiFi, Bluetooth Low Energy e o processador Tensilica LX6 Dual Core operando com até 240 Mhz, trabalhando junto ao transceptor LoRa SX1276, Display OLED de 0,96 polegadas com resolução de 128 x 64 pixels, conector para bateria de lítio com circuito de carga e descarga para baterias de 3,7 V até 1000 mAh, interface USB serial através do chip CP2102 da Silicon LAB.

O chip SX1276, que é o modem remoto LoRa™, 915 MHz frequência, possui alta sensibilidade do rádio receptor (-148 dBm), saída de potência de +20 dBm, alta confiabilidade e a distância de comunicação de área aberta pode chegar até 2,6 Km.

Ressaltando também o aspecto desta placa conter um sistema de gerenciamento de carga e descarga, proteção contra sobrecarga, detecção de energia e possibilidade de comutação automática de energia de bateria.

A descrição da pinagem desta placa é mostrada no Anexo A, Figura 77.

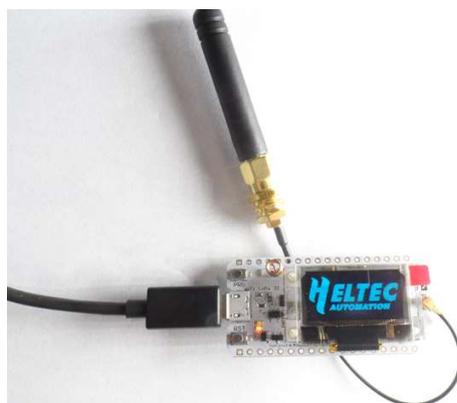
O Quadro 1 apresenta as especificações técnicas da placa Heltec utilizada neste trabalho.

O Quadro 2 apresenta a especificação do Chip ESP32.

O Quadro 3 apresenta as especificações técnicas do Chip LoRa SX1276.

O Quadro 4 apresenta as especificações técnicas do Display OLED 0,96”.

Figura 28 – Placa WiFi LoRa ESP 32 da Heltec



Fonte: LoRa (2019)

Quadro 1 : Especificações da placa Heltec

Item	Especificação Técnica da placa
Modelo	Heltec WiFi LoRa 32 868/915 MHz
CPU	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6
Fonte de alimentação USB (≥500 mA)	5 VDC
Fonte de alimentação da bateria de lítio (≥250 mA)	3,7 V a 4,2V (Não acompanha bateria)
Tensão de nível lógico	3,3 VDC
Processador	Xtensa 32-Bit LX6 Dual Core
Clock	80 a 240 MHz (Ajustável)
Memória ROM	448 kB
Memória SRAM	520 kB
Memória Flash Externa	32-Bit de acesso e 4 MB
GPIO	Digital IO (36), ADC 12-Bits (16 canais), DAC 8-Bits (2 canais)
WiFi 802.11 b/g/n	2.4 a 2.5 GHz
Segurança WiFi	WPA / WPA2 / WPA2-Enterprise / WPS
Criptografia WiFi	AES / RSA / ECC / SHA
Bluetooth	4.2 BR / EDR e BLE (Bluetooth Low Energy)
Temperatura de trabalho	-40 °C à +85° C
Driver do Display	SSD1306
Interface do display	I <sup>2</sup> C
Chip Base LoRa	SX1276
Frequência de operação	915 MHz
Sensibilidade	-139 dBm (máximo)
Potência máxima	20 dBm
Modo de modulação	LoRa, FSK, GFSK e OOK
Taxa de transferência	0,018 a 37,5 kbps (LoRa)
Dimensões	51mm x 25mm x 8mm
Peso	15 g

Fonte: Adaptado de LoRa (2019)

Quadro 2 – Especificações Técnicas do Chip ESP32

Item	Características Técnicas do Chip ESP32
Chip Base	ESP32-D0WDQ6 (Datasheet ESP32)
CPU	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6
Clock	80 a 240 MHz (Ajustável)
Memoria ROM	448 kB
Memória SRAM	520 kB
Memória Flash Externa	32 bits de acesso e 4 MB
Tensão de Alimentação	2,7 a 3,6 VDC
Tensão de nível lógico	3,3 VDC (não tolera 5 V)
Corrente de consumo	80 mA (típica)
Corrente de consumo	500 mA (máxima)
Interfaces	Cartão SD, UART (3 canais), SPI (3 canais), SDIO, I <sup>2</sup> C (2 canais), I <sup>2</sup> S (2 canais), IR, PWM LED (2 canais) e PWM motor (3 canais)
Tipos GPIO	Digital IO (36), ADC 12-Bits (16 canais), DAC 8-Bits (2 canais), Sensor Capacitivo (10 canais); LNA pré-amplificador
WiFi 802.11 b/g/n	2,4 a 2,5 GHz
Segurança WiFi	WPA / WPA2 / WPA2-Enterprise / WPS
Criptografia WiFi	AES / RSA / ECC / SHA
Bluetooth	4.2 BR / EDR e BLE (Bluetooth Low Energy)
RTC Integrado	8 kB (Slow / Fast)
Sensor integrado	Temperatura e Hall
Temperatura de trabalho	-40 ° a +85 °C

Fonte: Adaptado de LoRa (2019)

Quadro 3 – Especificações técnicas do Chip LoRa SX1276

Item	Especificação Técnica Chip LoRa SX1276
Chip Base	SX1276
Frequência de operação	915 MHz
Sensibilidade	-139 dBm (máximo)
Tensão de Alimentação	1,8 a 3,7 VDC
Corrente de consumo	10,8 mA (RX - recepção) e 120 mA (TX - transmissão)
Potência máxima	20 dBm
Modo de modulação	LoRa, FSK, GFSK e OOK
Taxa de transferência	0,018 kbps a 37,5 kbps (LoRa)
Interface de comunicação	SPI
Temperatura de trabalho	-40 °C a +85 °C
Dimensões	17,0 mm x 17,3 mm x 2,6 mm (sem antena)

Fonte: Adaptado de LoRa (2019)

Quadro 4 – Especificações Técnicas do display OLED

Item	Especificações Técnicas do Display OLED 0,96"
Tensão de Trabalho	3,0 V a 5,0 V
Tensão Lógica	3,3 V - 5,0 V
Potência Máxima	80 mW
Resolução	128 x 64 pixels
Ângulo de Visão	> 160 Graus
Interface	I <sup>2</sup> C
Escrita	Branca
Driver	SSD1306
Dimensão do visor	1,90 cm x 2,73 cm
Dimensão total	2,78 cm x 2,73 cm x 0,41 cm

Fonte: Adaptado de LoRa (2019)

A própria Heltec fornece outras opções de placa ESP32 LoRa com custo menor e possui características muito semelhantes à placa Heltec V2. Por exemplo, a placa Heltec *Wireless Stick Lite* tem o custo em Dólar de US\$14,90 (LORA, H., [s. d.]), porém é uma placa que não possui display, mostrada na Figura 29.

Figura 29 – Placa ESP 32 LoRa *Wireless Stick Lite*



Fonte: LORA (2019)

## 4.2 Interface de Desenvolvimento (IDE)

A empresa Espressif é projetista e fabricante das placas de Circuito Impresso do Microcontrolador ESP 32 com alto nível de integração, envolvendo interruptores de antena embutidos, *Balun* de Rádio Frequência, amplificador de potência, amplificador de recepção de baixo ruído, filtros e módulos de gerenciamento de energia, Wifi, Bluetooth e rádio LoRa.

Sendo a fabricante deste dispositivo integrado, disponibiliza uma Interface de Desenvolvimento (IDE) conhecida como SDK IDF para programação do microcontrolador ESP32 e os periféricos associados. A grande vantagem em relação à outras interfaces de desenvolvimento (como a IDE Arduino e Platform IO), é que por ser nativa, permite uma melhor customização e melhor acesso dos recursos do ESP32 e dos rádios WiFi, Bluetooth LoRa, trabalhando com bibliotecas Nativas em C/C++ disponível pelo fabricante, que é a própria Espressif.

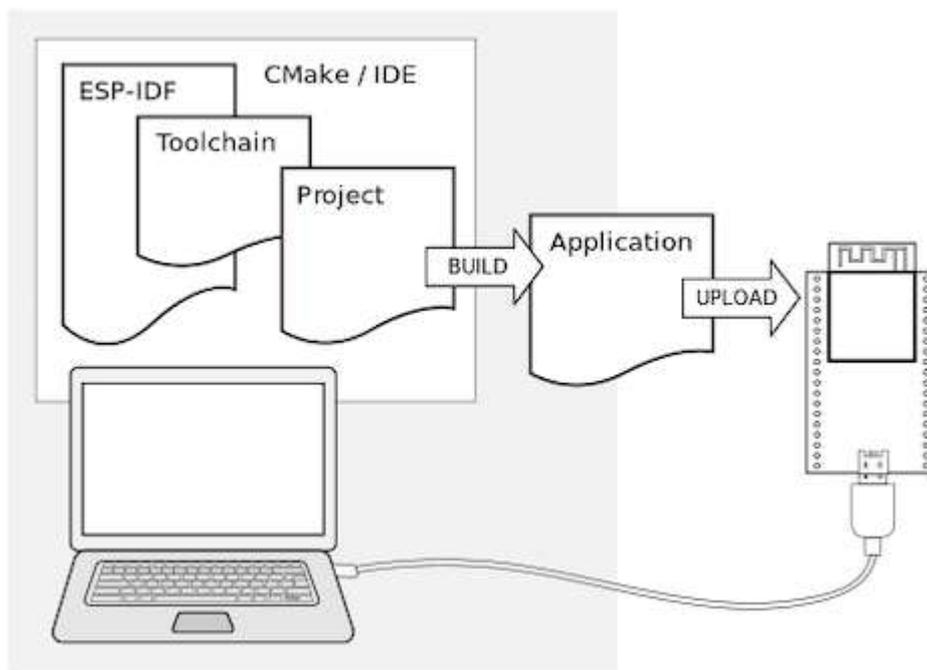
Outro fator é que o ambiente de desenvolvimento SDK IDF trabalha com o Sistema Operacional em Tempo Real (FreeRTOS), que permite uma programação não sequencial e com melhor controle dos tempos das rotinas e tarefas do programa.

Uma desvantagem, é que a programação nesta Interface de Desenvolvimento exige um maior tempo em aprendizado e é muitas vezes menos difundida em bibliografias.

Foi utilizado neste trabalho a versão SDK IDF 4.0, versão de Produção (versão estável). A estrutura para a compilação e gravação do programa em C/C++ na Placa ESP32 é apresentada na Figura 30.

O termo *Toolchain* representa o conjunto de ferramentas para compilar bibliotecas nativas, produzidas pelo fabricante Espressif.

Figura 30 – Estrutura da IDE SDK IDF 4.0 para ESP32



Fonte: Espressif System s. d.)

#### 4.3 Definição dos sensores e integração ao módulo ESP32 Wifi, Bluetooth e rádio LoRa

O fenômeno da Cavitoma, que é um processo de incêndio no algodão armazenados em fardos após a colheita tem como origem um processo de combustão ou ignição espontânea devido a um processo exotérmico de oxidação bacteriana, muito comum nas fibras de algodão ou à decomposição da celulose sofre influência direta da umidade e da temperatura

Conforme destacado no item 2.3.4, referente ao processo de Cavitoma, foi elencado alguns dados relevantes que possam auxiliar no processo de definição dos sensores: é uma reação exotérmica, libera calor a partir do centro dos fardos, em direção à superfície externa, tem influência da temperatura e umidade, ocorre fumaça (queima incompleta) e surgimento de chama ao romper a lona e ter contato com o ar. Outro fato é que existe surgimento de gases em locais de confinamento e 60% dos registros são entre às 18 h e 06 h.

Com a liberação de calor a partir do centro dos fardos, uma proposta é a inserção de um termopar, cujo elemento sensível de calor está em uma haste

metálica ao longo do centro do fardo. Esta medida de temperatura pode ser feita com um termopar tipo K ou um termopar PT100, adequando a sonda às dimensões do rolo de algodão, que possui 2,38 metros de altura e 2,5 metros de comprimento. Um modelo de termopar é mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Exemplo de termopar tipo sonda PT100



Fonte: PT100 Sensor de temperatura termopar do tipo sonda com 3 fios (-50 °C A + 350 °C) – Usinainfo (s. d)

O Quadro 5 apresenta as especificações técnicas do sensor PT100.

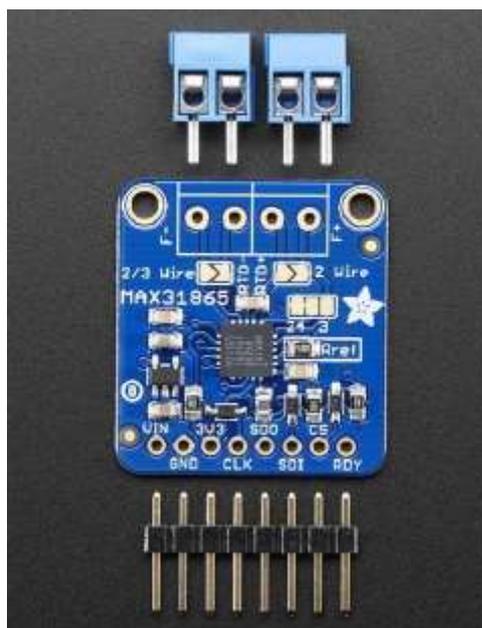
Quadro 5 – Especificações técnica do sensor PT100

Item	Especificações Técnicas do PT100
Modelo	PT100
Material da Sonda	Aço Inox
Faixa de medição	-50 °C ~ 350 °C
Comprimento do cabo	1,9 m
Comprimento da sonda	100 mm
Diâmetro da sonda	5 mm
Rosca	M8
Peso	45g

Fonte: PT100 Sensor de Temperatura Termopar Tipo Sonda com 3 fios (-50°C a +350°C) – Usinainfo (s. d.) – Adaptado pelo Autor

Para condicionamento do termopar à 3 fios, temos a possibilidade de utilizar o módulo MAX31865, com comunicação do tipo serial SPI (*Serial Peripheral Interface*), que é compatível com a comunicação serial do módulo ESP32 LoRa, possibilitando o condicionamento de termopares PT100 de 2, 3 ou 4 fios. Isto é mostrado na Figura 32.

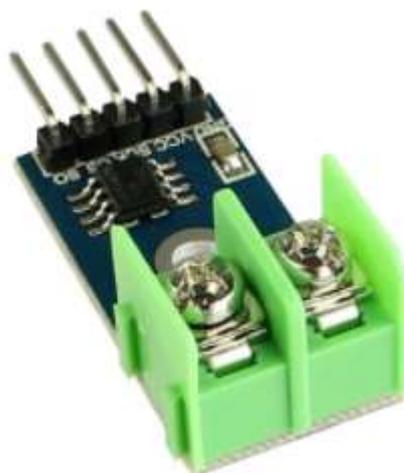
Figura 32 – MAX31865 para condicionar o sinal do PT100



Fonte: Ada (2017)

Se o Termopar Sonda for do Tipo K, temos o módulo MAX6675, que também possui comunicação serial SPI e faixa de temperatura de 0 °C à 1024 °C, mostrado na Figura 33.

Figura 33 – MAX6675 para condicionar Termopar tipo K



Fonte: MAX6675 - Módulo de leitura para termopar tipo K - Usinainfo (s. d.)

Para medição da umidade relativa do ar, temperatura ambiente e vapores orgânicos, pode-se utilizar o módulo BME680, que é produzido pela Bosh e possui comunicação serial I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*) e SPI (comunicações compatíveis com o módulo ESP32 LoRa), realizando medições de pressão atmosférica, temperatura ambiente, umidade do ar e VOC (vapores orgânicos). Mostra o módulo fabricado pela Adafruit com o sensor BME680 da Bosh, mas existe outros modelos de fabricação deste tipo de módulo no mercado destinado à integração IoT com o módulo ESP32. Isto é mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Módulo com o sensor Bosh BME680



Fonte: Dylan Herrada (2017)

Este sensor em destaque tem a possibilidade de realizar medições de Vapores Orgânicos (VOC) no ambiente, podendo ser fundamental para um alarme de incêndio. Em contrapartida, em custo menor, temos o módulo BME 280, que realiza as mesmas medições exceto as medições de VOC.

O BME680 e o BME280, são sensores de precisão da Bosch, podem medir umidade do ar com precisão de  $\pm 3\%$ , pressão barométrica com precisão absoluta de  $\pm 1$  hPa e temperatura com precisão de  $\pm 1,0$  ° C. Observe que este sensor, como todos os sensores de VOC, tem variabilidade e para obtermos medições precisas, precisamos calibrá-lo com fontes conhecidas de gases (gás padrão), e ter respostas comparativas.

Outra possibilidade para medições de temperatura e umidade é o sensor DHT22, mostrado na Figura 35.

As especificações técnicas do sensor DHT22 são apresentados no Quadro 6.

Figura 35 – Sensor DHT22



Fonte: Liu (2016)

Quadro 6 – Especificações técnicas do sensor DHT22

Item	Especificações Técnicas do Sensor DHT22
Tensão de Alimentação	3 a 5,5 V <sub>DC</sub>
Faixa de Corrente	0,5 a 2,5 mA
Faixa de Operação de Umidade	0 % - 100 %
Faixa de Operação de Temperatura	-40 °C a 125 °C
Dimensões (CxLxA)	34 mm x 16 mm x 8 mm (com pinos)
Peso	2,4 g

Fonte: Adaptado de Liu (2016)

Semelhante ao DHT22, temos o sensor DHT11, opção mais barata, porém com uma precisão para medição de umidade do ar menor (5 %) e faixa de temperatura até 0 °C a 50 °C. Porém, com menor custo, pode ser ideal para testes iniciais de uma Rede Mesh.

Também pode ser proposta a inclusão de sonda de sensores para medição da umidade intrínseca ao algodão, monitorando o aumento ou diminuição da umidade intrínseca, e esta informação pode contribuir na decisão de processamento de um grupo de fardos, ou na aceleração do processo Cavitoma.

Outra informação que pode ser necessário ser coletada é a identificação de produção, como etiquetas de código de barra ou etiquetas RFID (Radio-Frequency Identification). Com isso, no momento da instalação do nó sensorial ao fardo de algodão, identifica-se de qual fardo coleta-se a informação. A Figura 36 mostra um

exemplo destas etiquetas, colocadas automaticamente pelo maquinário que formam os fardos.

Todo o conjunto de informações dos diferentes sensores e medições, tem que ter um tamanho de informação em bytes minimizado ao máximo para ser transmitido, pois a comunicação LoRa possui uma baixa taxa de comunicação em bits por segundo e esta taxa de comunicação sofre influência dos parâmetros de comunicação de rádio LoRa (SF, BW), como também do tamanho da rede.

Figura 36 – Sistema ABRAPA de identificação de fardos de algodão



Fonte: SAI - Sistema ABRAPA de Identificação (s. d.)

#### 4.4 Baterias e Gerenciamento de Energia

Este é outro ponto relevante do projeto e impacta em custos devido ao preço de uma bateria de lítio com tensão e corrente adequada para alimentar todo o módulo de sensores propostos (ESP32, sensores, condicionamento dos sensores e transmissão LoRa e WiFi).

O módulo ESP32 da Heltec possui um conector para bateria de lítio de 3.7 V com controle integrado de carga e descarga para baterias de até 1000 mAh, tendo também proteção contra sobrecarga, detecção de energia e possibilidade de comutação automática de energia de bateria.

A informação da energia disponível em cada nó de sensor da rede Mesh é uma das informações que tem que ser transmitidas em rede, e o intervalo desta transmissão de informação tem que ser definido.

Além do tipo de conexão da bateria, a facilidade de recarga desta bateria ou a sua troca junto ao nó da rede, sendo que na maioria dos casos não há energia de rede elétrica disponível. Para recarga das baterias, pode-se acrescentar células fotovoltaicas acopladas ao protótipo do nó sensorial.

#### 4.5 Desenvolvimento de um Protótipo com Robustez e Funcional para Testes

O protótipo de um nó sensorial envolve colocar todos os dispositivos em uma caixa plástica, com integração de todos os sensores, condicionadores de sinais, placa ESP 32 com rádio LoRa, fixação de antenas e baterias.

Grande parte deste conjunto pode ser fixado em um protoboard ou em uma placa de circuito impresso, prevendo encaixe e fixação mecânica de todos os componentes do sistema (placa ESP32 com módulo LoRa, baterias, sensores, antena, entrada para cabos de comunicação serial e vedações).

Tem-se que ter em mente que este conjunto estará sob condições extremas, sob calor, chuva, poeiras e esta informação interna da caixa pode ser necessária ser transmitidas para monitoramento e correção dos dados.

Além disso, no manejo do dispositivo, deve ter boa resistência mecânica, evitando perdas por quebras ou infiltração de água de chuva.

#### 4.6 Definir uma Malha Inicial de Rede

Esta etapa consiste construir uma Rede Mesh pequena, com 3 a 5 nós, utilizando sensores de temperatura e umidade com sensor DHT11 ou com o sensor DHT22 (embora de custo mais elevado que o DH11, o sensor DHT22 tem maior precisão, e fornece valores de temperatura e humidade em ponto flutuante, em décimos de valor).

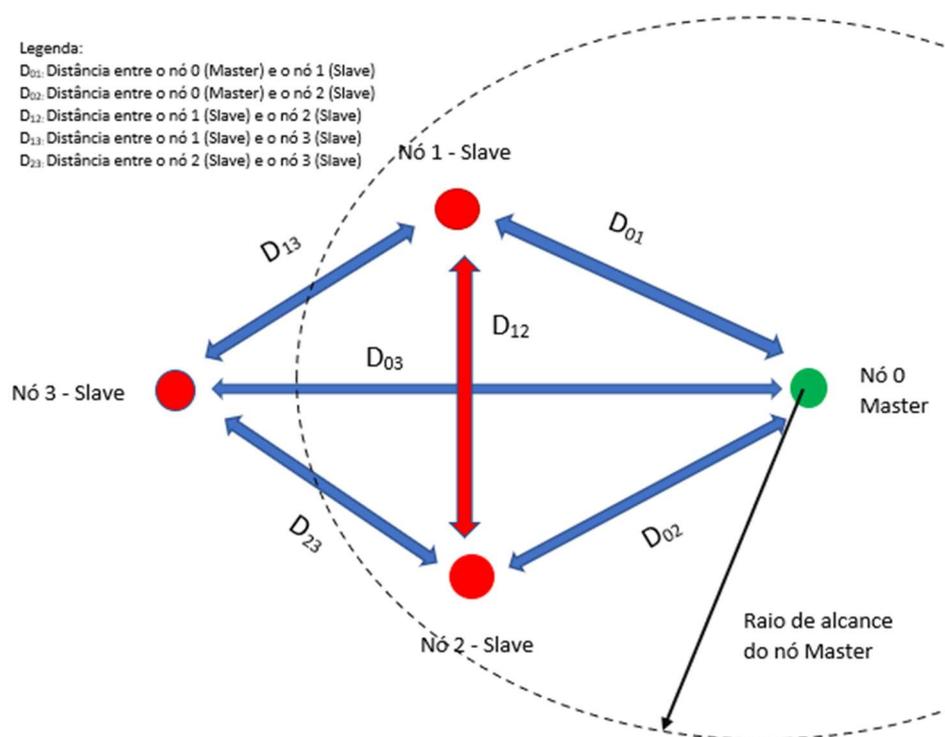
Para os primeiros estudos práticos de construção da rede e realizando testes de confiabilidade na transmissão de dados, modificando os parâmetros de comunicação LoRa após ter uma rede confiável.

Deve-se levar em conta a disponibilidade de poucos dispositivos para realizar testes da rede (devido aos custos envolvidos). Com poucos dispositivos deve-se

verificar quais os vizinhos detectados por cada nó e as rotas obtidas, variando-se as distâncias envolvidas.

Neste sentido, a proposta de configuração básica para os testes iniciais de criação de rotas é mostrada na Figura 37:

Figura 37 – Malha inicial de rede com 4 nós



Fonte: Elaborado pelo autor

O nó de rede é o dispositivo físico que contém um módulo ESP32 com comunicação LoRa e faz o sensoriamento de um local específico.

O Nó Master é definido como Nó 0, e corresponde ao nó em que concentraremos todas as informações da rede e onde futuramente terá comunicação com a Internet. Nos testes iniciais, o Nó Master será definido por nível alto em um GPIO do módulo ESP32, em que obtemos as informações de comunicação via monitor serial de um computador.

Os outros nós correspondentes (Nós 1,2,3...) correspondem a dispositivos distribuídos em campo aberto, obtendo informações de temperatura e umidade em locais específicos.

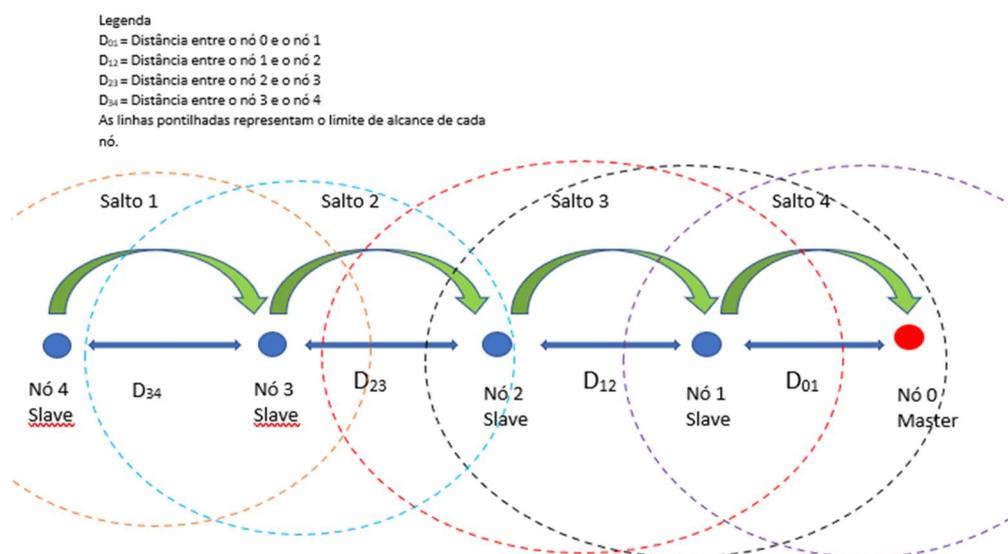
Na proposta apresentada na Figura 37, pode-se observar o comportamento da rede conforme as variações das distâncias entre os nós ( $D_{01}$ ,  $D_{02}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{13}$ ,  $D_{13}$ ).

A comunicação entre nós vizinhos é considerada um salto de comunicação. Como o nó 3 não está ao alcance do nó 0 (nó Master), para este se comunicar ao nó Master, ele tem que necessariamente se comunicar com um dos nós vizinhos e este vizinho se comunicar ao nó 0, portanto teremos dois saltos de comunicação. Nesta proposta, tem-se um limite máximo de 2 saltos de comunicação, porém é possível obter informações de escolha de rotas.

Conforme a Figura 37, para aumentar o número de saltos, é necessário incluir mais sensores. Neste caso, a solução seria incluir um quarto (nó 4), estando este ao alcance do nó 3, porém fora de alcance aos demais nós (nó 0, nó 1 e nó 2).

Então, para viabilizar os testes envolvendo comunicação com um maior número de saltos possíveis tendo o limite de dispositivos, a alternativa é procurar alinhar os dispositivos conforme mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Distribuição dos nós para permitir verificar saltos



Fonte: Elaborado pelo autor

O importante nos testes iniciais é realizar testes em configurações simples e após testes que tenham sucesso, ir aumentando a complexidade da rede.

#### 4.7 Definir Critérios para Teste de Confiabilidade da Rede Mesh

É necessário a definição dos critérios para análise da Rede, de modo que os parâmetros escolhidos para a Rede com a tecnologia LoRa (SF, BW, Potência da Antena) e o testes de transmissão e medição de perdas de pacotes, também possam ser confrontados com outros modelos de Rede Mesh LoRa ou Rede LoRaWAN<sup>®</sup> abordados em literatura.

Também será necessário verificar, se será possível no escopo deste trabalho, avaliar segurança da rede construída e qual o procedimento a ser adotado para esta tarefa, assim como otimização energética.

#### 4.8 Instalar a Rede Mesh e Definir a Malha de Cobertura

Esta etapa é a de instalação da Rede Mesh LoRa, com seu conjunto de sensores em campo, definindo uma malha de cobertura que seja efetiva na coleta de informações, tenha a dinâmica de formação automática da rede e atenda seus objetivos.

Também tenha um espaçamento adequado para a construção da malha, pois um espaçamento correto impacta no número de sensores e otimização de custos.

Ao mesmo tempo é importante testar a rede em diferentes cenários (dentro de prédios, em campo aberto (como em uma lavoura em um sítio), ao longo de uma estrada, em uma área industrial, como no campus universitários, em situações de variações de tipos de obstáculos.

#### 4.9 Verificação dos Resultados

Por fim, com a Rede Mesh em operação após um determinado tempo, é necessário analisar a importância dos dados coletados para o monitoramento do processo Cavitoma, analisar se houve momentos de precipitação ou aumento de risco de incêndio.

No aspecto da Rede Mesh, analisar os dados obtidos quanto a confiabilidade da rede (verificar perda de pacotes), formação de rotas, a durabilidade das baterias

que alimentam os nós, buscando corrigir os problemas que possam surgir e com a defesa do trabalho de conclusão de curso, estabelecer uma linha de estudos futuros.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentado e discutido os resultados obtidos na realização deste trabalho.

### 5.1 Hardware Desenvolvido

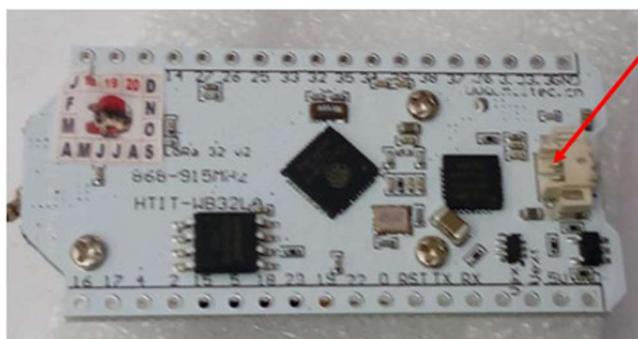
Como discutido na etapa de metodologia, o propósito do trabalho é a construção de uma Rede Mesh de sensores com baixo custo.

Foi utilizado a placa de microcontroladores ESP32 com comunicação LoRa no em já existia dois módulos à disposição para testes iniciais no laboratório de Engenharia Elétrica da Unisinos, que é a placa modelo Heltec Wifi LoRa 32 915 Mhz V2, mostrada na Figura 28. Ao longo do trabalho, foi adquirido mais 3 módulos.

A placa do microcontrolador foi fixada em uma matriz de protoboard de 400 pontos. Para os testes iniciais utilizamos os sensores de temperatura e umidade DHT22, e o circuito alimentado por uma bateria de 3.7 V – 1000 mAh Li-Po (Lithium – Polímero). Esta bateria foi escolhida pois a placa da Heltec prevê conexão e circuito de recarga para com as características de tensão de 3,7 V e fornecimento de corrente de até 1000 mAh.

Para conectar a bateria à entrada de alimentação de 3,7 V, é necessário um conector fêmea do tipo JST-SH 1.25-2, e este tipo de conector dificilmente é encontrado para venda no Brasil. A solução é a soldagem de um fio fino direto ao terminal positivo do conector macho JST-SH 1.25-2. O fio soldado vai para um terminal de uma chave liga-desliga, que faz o chaveamento da alimentação ao circuito. O conector JST-SH 1.25-2 fica no lado de baixo da placa Heltec, mostrada na Figura 39.

Figura 39 – Terminal para conexão da bateria de 3,7V - 1000 mAh na placa Heltec V2.



Conector JST-SH 1.25 -2, no lado de baixo da placa ESP32 LoRa Heltec. O conector fêmea não foi encontrado para venda no mercado brasileiro. A solução é soldar um fio fino direto no terminal positivo para possibilitar a conexão e conectar a bateria de 3,7V – 1000mAh. Esta soldagem é um processo delicado e pode danificar a placa!

Fonte: Elaborada pelo autor

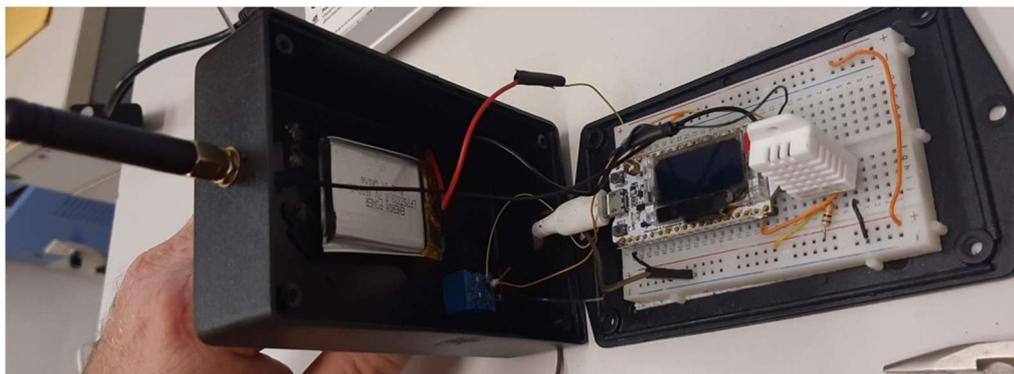
Este fato não é um detalhe insignificante, pois a placa prevê circuito de controle de carregamento e descarregamento de uma bateria Li-Po de 3,7 V até 1000mAh, e gera-se uma dificuldade de uso pela dificuldade de obtenção do conector.

Outro fato observado é que ao ligar a placa à um terminal USB ou à um carregador de celular, a bateria é recarregada e existe o circuito de controle deste carregamento.

Todo o conjunto ficaria dentro de uma caixa plástica PB107 (Patola). Na fase de teste inicial, fez-se a conexão do sensor DHT22 direto ao protoboard. Normalmente ele teria que ficar no ambiente externo da caixa. Para deixar o sensor fora da caixa, é necessário desenvolver um invólucro de proteção de tela e abrigado contra chuva ou contato direto de água. Então, nesta fase de testes optou-se por deixar o sensor dentro da caixa.

Em um extremo da caixa tem a fixação mecânica da antena do módulo LoRa, e no outro extremo uma abertura para inserir o cabo de conexão USB. Na parte superior, fixamos com fita dupla face a bateria de 3,7 V – 1000 mAh. Na parte inferior (tampa da caixa), foi fixado com fita dupla face o circuito montado na matriz de contato. Também na parte superior foi adicionado uma chave liga-desliga. Isto é mostrado na Figura 40:

Figura 40 – Montagem do protótipo em caixa plástica.

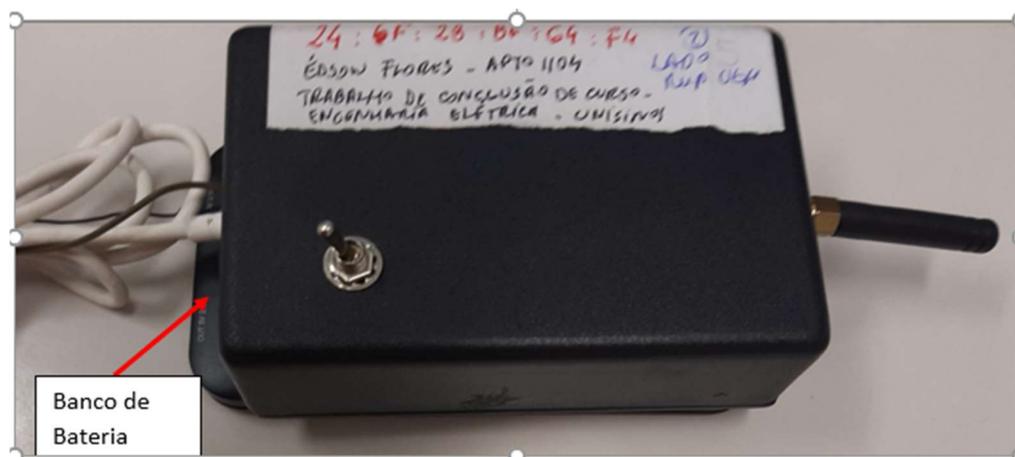


Fonte: Elaborado pelo autor

O maior período de consumo do dispositivo é na comunicação LoRa durante o processo de roteamento da rede. Nos testes, frequentemente o dispositivo está na fase de roteamento e nesta etapa tem-se um consumo rápido da bateria (1h aproximadamente). Os testes de rede envolvem deslocamentos relativamente grandes (1,5 km) para posicionar os dispositivos, e no segundo ou terceiro teste perde-se a comunicação pois a bateria ficou descarregada, o que ocasiona perda significativa de tempo.

A solução mais prática para esta fase inicial, pois na maioria das vezes os dispositivos estão longe de pontos de energia elétrica, foi utilizar um banco de baterias usados para recargas de celular que fornece 5 V – 10.000 mAh (“*Power Bank*”), acoplado por fita adesiva dupla face junto à tampa da caixa plástica, e o circuito é alimentado via cabo de conexão USB. Isto possibilitou maior autonomia dos dispositivos, facilitando os testes e com boa relação custo-benefício. A foto do dispositivo com o banco de baterias de 5 V é mostrado na Figura 41.

Figura 41 – Dispositivo para Teste de Campo



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 4 apresenta a relação de custos para 5 dispositivos (5 nós de rede). Para construir 5 dispositivos gasta-se cerca de R\$ 1701,65.

Tabela 4 – Relação de custos para 5 dispositivos

Quantidade	Descrição	Custo unitário (R\$)	Total (R\$)
5	Placa ESP32 LoRa Heltec V2 - 915Mhz	160,00	800,00
5	Matriz de Contatos (Protoboard) - 400 pontos	18,49	92,45
5	Sensor de Temperatura DHT22	25,00	125,00
5	Sensor de Temperatura DHT11	17,00	85,00
5	Bateria Li-Po 3,7V -1000mAh	39,90	199,50
5	Banco de Bateria ("Power Bank")	54,75	273,75
5	Caixa Plástica Patola (PB-107)	11,40	57,00
5	Chave liga-desliga	3,79	18,95
1	Fita dupla face	50,00	50,00
	<b>Total</b>	<b>380,33</b>	<b>1701,65</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.2 Protocolos e Rotinas de Implementação

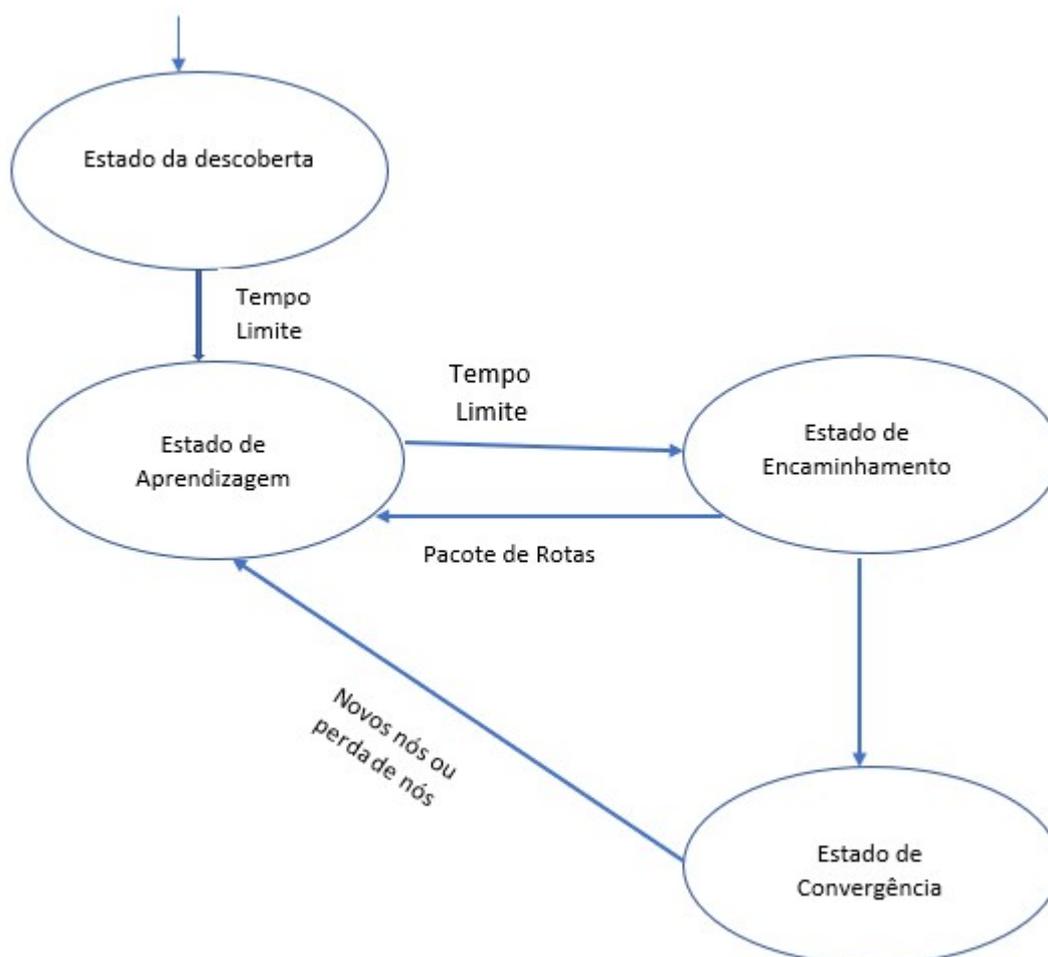
O objetivo desta etapa é mostrar os Estados de Formação da Rede Mesh, a descrição funcional dos protocolos utilizados, como também descrever as rotinas de algoritmos implementadas.

### 5.2.1 Estados do Nó da Rede Mesh implementada

- **Estado de Descoberta:** Durante esta fase, cada nó transmite pacotes *“hello”*, com endereço Broadcast (0xFFFFFFFF), se apresentando ao seu vizinho para que este possa adicioná-lo a rede e a tabela de roteamento. Após um tempo limite, o nó entra da fase de aprendizado de rotas.
- **Estado de Aprendizado:** O nó compartilha sua tabela de roteamento com seus vizinhos, analisa o pacote de roteamento recebido e atualiza sua tabela de roteamento, aprendendo quem são seus vizinhos e os saltos necessários para a comunicação com os nós que não são seus vizinhos. Após um tempo limite, o nó entra na fase de encaminhamento. Porém deve-se ter em mente que o Estado de Aprendizado sempre pode ser reiniciado com a inserção de novos nós na rede ou com a falha de comunicação de um nó, fazendo de forma automática o traçado de novas rotas para permitir a comunicação.
- **Estado de Encaminhamento:** Nesta etapa, um nó descobriu vizinhos e aprendeu rotas de forma suficiente, conhece as melhores rotas para comunicação, estando pronto para receber e transmitir pacotes de mensagens.
- **Estado de Convergência:** Todos os nós da rede conhecem a rota para todos os outros nós da rede e o número de saltos para trocar informação com este nó. Nesta etapa, o Master irá solicitar a informação aos outros nós da rede não por endereçamento *Broadcast*, mas sim por endereçamento específico, acordando somente os nós necessários para estabelecer a comunicação. Isto tem um conceito importante: Poderíamos ficar em *“loop”* infinito no Estado de Aprendizado e já obtendo os dados de sensores que desejamos, porém isto implica em desperdício de energia e possibilidade de colisão de dados na rede Mesh. A ideia é que após o Estado de Convergência, os nós entram em estado de baixo consumo de energia (*sleep*) e só desperte quando necessário (ou em requisição de informação do Master, ou em necessidade de um novo vizinho surgir, ou quando um novo roteamento é necessário).

A Figura 42 mostra um diagrama que representa os nós das redes.

Figura 42 – Estados da rede Mesh



Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.2.2 Cálculo da Métrica de Comunicação entre os Nós

Para a seleção de uma rota de transmissão, um nó da rede deve levar em conta dois parâmetros:

- O número de saltos: Um nó deve preferir o menor número de saltos, a não ser que a taxa de perdas de pacote aumente (perda de êxito na comunicação).

- E a Métrica, que é um parâmetro que expressa a dificuldade de comunicação com o nó vizinho, uma medida de sucesso de entrega do pacote, representado por um valor de 0 a 255. Se um nó perde um pacote vizinho, o valor do sucesso é diminuído em 16. Se perder 16 pacotes, o valor da Métrica cai a zero.

Pode-se entender a métrica como o “clássico problema do caixeiro viajante”, que tem que descobrir qual rota com menor distância, ou menor consumo de energia.

Os Parâmetros de comunicação do rádio LoRa adotados não sofreram variações nesta fase de estudo são os seguintes:

- Frequência da portadora: 915 MHz;
- Potência de transmissão: 14 dB
- Bandwidth: 250 kHz;
- Fator de Espalhamento Espectral: SF = 7.

### 5.2.3 Protocolo de Roteamento Desenvolvido

A seguir, são apresentadas as principais características do protocolo de roteamento utilizado neste trabalho.

É necessária a utilização de um algoritmo de roteamento. Neste trabalho foi utilizado como referência o Protocolo Babel, adaptado a proposta deste trabalho.

O Protocolo Babel é um protocolo robusto e eficiente baseado no parâmetro vetor – distância descrito pela RFC 6126 e RFC 6127. (Dinamize)

RFC (*Request for Comments*) são documentos usados pela comunidade online para definir padrões da WEB e compartilhar informações técnicas e atualmente são gerenciados pela IEFT (*Internet Engineering Task Force*).

#### 5.2.3.1 Endereços MAC (Camada de Acesso ao Meio)

O dispositivo ESP32 já possui associado a ele um endereço MAC de 4 bytes, que é um identificador único atribuído a uma interface de rede. No início do código, na própria rotina inicial do algoritmo desenvolvido, é obtido o valor de Endereço MAC do dispositivo e é através dele que se realiza o processo de endereçamento.

O endereçamento Broadcast implica enviar a transmissão para todos os nós vizinhos, através do endereço 0xFFFFFFFF.

### 5.2.3.2 Formato do Pacote

O formato de pacote de dados tem por base o Protocolo Babel com o acréscimo do campo Salto, buscando-se ao máximo a limitação de tamanho as limitações de transmissão LoRa (devemos sempre procurar transmitir o menor pacote de dados possível).

- **TTL:** é o número de saltos permitidos, ou “tempo de vida” permitidos. Podemos limitar o número de saltos permitidos para aceitar um pacote, com tamanho de um Byte.
- **Tamanho:** é todo o comprimento do pacote a ser enviado em 1 Byte (cabeçalho + dados);
- **Origem:** é o endereço de 4 bytes do nó que originou a mensagem;
- **Destino:** é o endereço de 4 bytes do nó de destino de final da rota;
- **Salto:** é o endereço de 4 bytes do próximo nó para onde o pacote deve ser transmitido.
- **Sequência** é o número de sequência da última mensagem recebida desse endereço (contador global) para calcular perda de pacotes nesta etapa de transmissão;
- **Tipo:** é um caractere ASCII, que descreve a finalidade da carga útil (exemplo: tipo ‘r’ é um pacote de roteamento, ‘h’ é um pacote *hello*, tipo ‘b’ solicita informações de um nó específico, ‘l’ é o pacote que envia a leitura de dos sensores ao master;
- **Métrica:** é a representação de 0 – 255 da qualidade da comunicação com o endereço vizinho;
- **Dado:** é o conteúdo da mensagem a ser implementada pela camada de aplicação.

Quadro 7 – Especificação do Formato Pacote

Byte 0	Byte 1	Byte 2-5	Byte 6-9	Byte 10-13	Byte 14	Byte 15	Byte 16-256
TTL	Tamanho	Origem	Destino	Salto	Sequência	Tipo	Dado

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.2.3.3 Formato do Pacote *Hello*

Na etapa de descoberta, cada nó envia e recebe pacotes do tipo *hello*, se apresentando para os seus nós vizinhos, com o objetivo de formar sua tabela de vizinhos e sua tabela de roteamento.

No projeto da rede Mesh, quando uma mensagem regular não é enviada para um nó por um período especificado, um pacote do tipo *hello* deve ser enviado para o nó não ser descartado. Isto deve ser desenvolvido na Etapa de Encaminhamento e de Convergência

O pacote do tipo *hello* possui os seguintes campos:

- **Endereço:** é o endereço de 4 bytes do nó vizinho;
- **Sequência** é o número de sequência da última mensagem recebida desse endereço, para calcular perda de pacotes nesta etapa de transmissão;
- **Sucesso:** é a taxa instantânea de sucesso de pacotes neste endereço
- **Métrica:** é a representação de 0 – 255 da qualidade da comunicação com o endereço vizinho;
- **Protocolo:** neste trabalho está definido com a informação AA. Este campo de dado servirá para implementação de comunicação futura com diferentes máquinas, como o protocolo de comunicação DNP (*Distributed Network Protocol*) ou o NBR14522 (protocolo de intercâmbio de informações para sistemas de medição de energia);
- **Slave Address:** neste trabalho está definido com a informação AA. Este campo de dado servirá para implementação de comunicação futura, associando o dispositivo escravo ao nó (referente ao protocolo que o cliente possa estar configurando).

Para evitar inundar a rede, o Pacote do tipo *hello* é limitado à apenas 1 salto (campo TTL = 1 na tabela de roteamento).

### 5.2.3.4 Tabela de Roteamento de um Nó

A tabela de roteamento é formada com os seguintes campos:

- **Endereço:** é o endereço de 4 bytes do ponto final da rota;

- **NextHop:** é o endereço de 4 bytes do vizinho através do qual o ponto final pode ser alcançado
- **Distância:** é o número de saltos até o ponto final;
- **Sequência** é o número de sequência da última mensagem recebida desse endereço, para recalculando perda de pacotes nesta etapa de transmissão;
- **Métrica:** é a representação de 0 – 255 da qualidade da comunicação com o endereço vizinho;
- **Protocolo:** neste trabalho está definido com a informação AA. Este campo de dado servirá para implementação de comunicação futura com diferentes máquinas, como o protocolo de comunicação DNP (*Distributed Network Protocol*) ou o NBR14522 (protocolo de intercâmbio de informações para sistemas de medição de energia);
- **Slave Address:** neste trabalho está definido com a informação AA. Este campo de dado servirá para implementação de comunicação futura, associando o dispositivo escravo ao nó (referente ao protocolo que o cliente possa estar configurando).

Assim como nos pacotes do tipo *hello*, podem ser previstos pacotes de roteamento com endereço Broadcast (0xFFFFFFFF) e limite de salto em 1 (TTL = 1 na tabela de roteamento). Quando um nó vizinho recebe este pacote, os dados são analisados e as rotas contidas nesta nova informação são comparadas com rota já existente, verificando a métrica, podendo escolher uma nova rota ou descartar a informação pois uma rota melhor já existe.

Como o tamanho do pacote de dados é limitado em 240 bytes, um pacote de tabela de roteamento é limitado a 30 rotas (8 bytes por rota). Se um nó descobrir mais de 30 rotas, é necessário enviar vários pacotes para compartilhar a sua tabela de roteamento

#### 5.2.3.5 Fluxograma do Software Embarcado

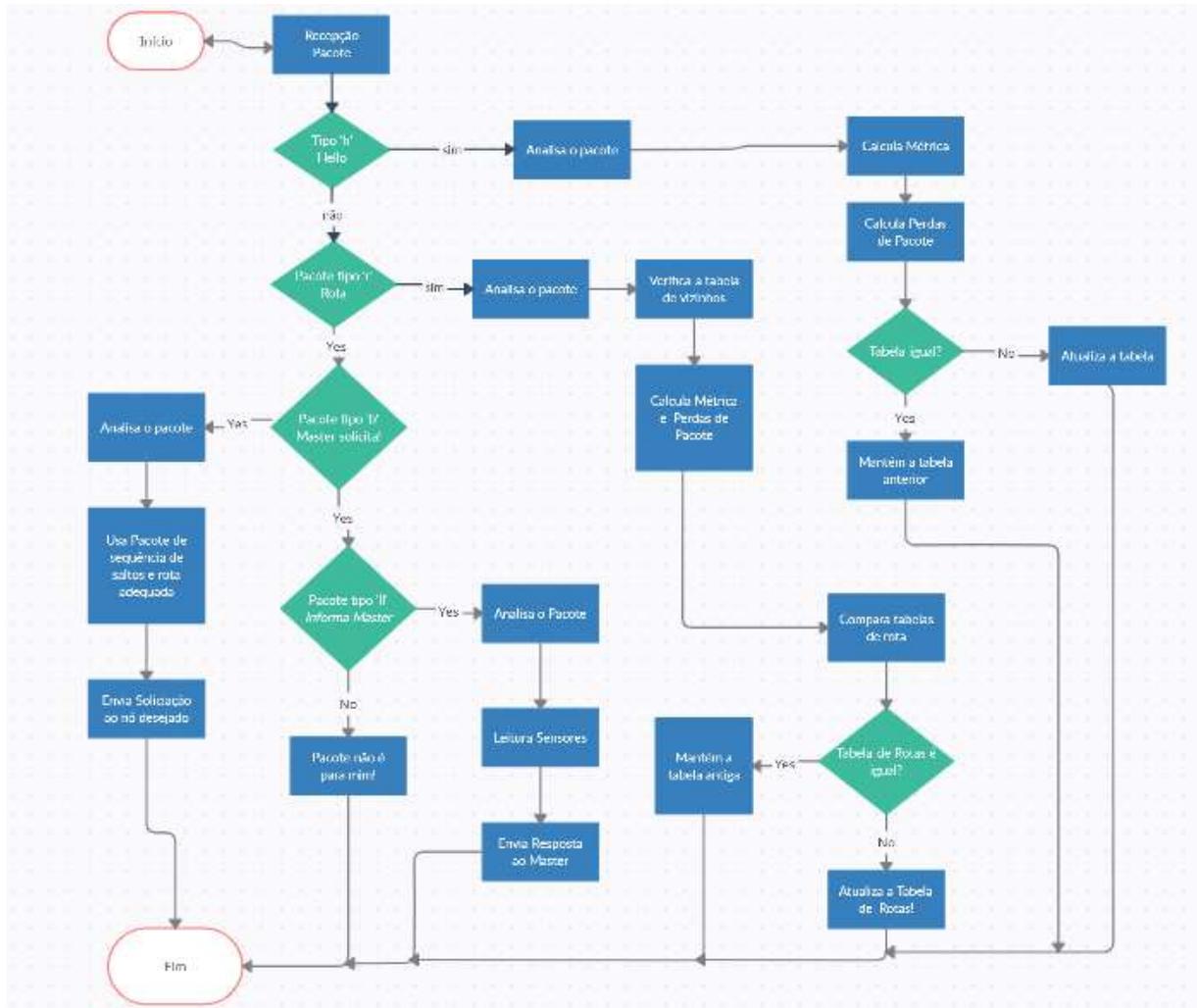
Nos itens anteriores, foi descrito os tipos de pacotes que podem ser transmitidos pelo nó LoRa conforme o tipo de informação.

O fluxograma mostrado na Figura 43 descreve de forma simplificada o fluxo de processos de informação de um nó. O fluxograma expressa as ações tomadas através de processo switch-case conforme o tipo de pacote recebido:

- Tipo 'h': pacote tipo *hello*, tem o objetivo de construir a tabela de vizinhos, faz com que o nó se apresente aos seus vizinhos de rede;
- Tipo 'r': pacote tipo rota, tem o objetivo transmitir aos vizinhos a tabela de rota
- Tipo 'b': pacote que se destina para um endereço específico, com o Master solicitando informações de um determinado nó da Rede Mesh. No display do módulo específico irá surgir a informação: o Master quer informação;
- Tipo 'l': pacote em que informa a leitura das variáveis temperatura e umidade ao Master.

Se o tipo de pacote não atender o protocolo acima, a informação é descartada e é impresso na tela no display do módulo LoRa que a informação não é para este endereço.

Figura 43 – Fluxograma do Processo de Recepção de um Pacote



Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.3 Cenários de Testes e Resultados

Para realizar os testes de funcionamento da Rede Mesh inicia-se com cenários bem simples, dispondo os sensores relativamente próximos, no mesmo ambiente (exemplo: sensores no mesmo ambiente de uma casa de 70 m<sup>2</sup> ou sensores com distâncias de aproximadamente 10 0m do nó Master).

Após obter os primeiros resultados, incrementa-se as distâncias e a complexidade da rede.

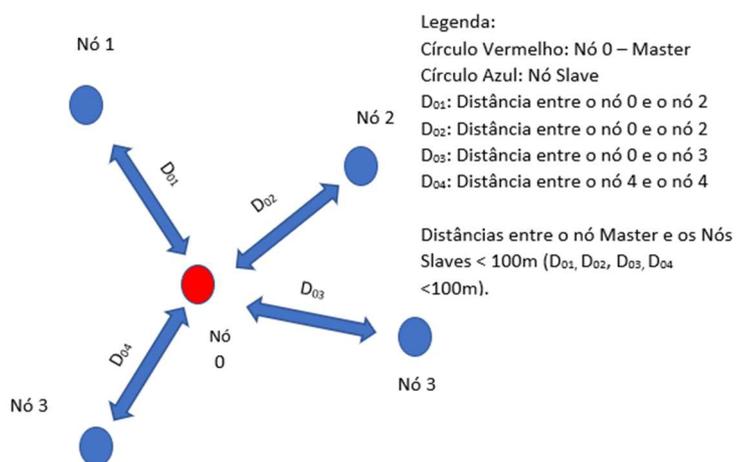
Em cada cenário de teste, foram avaliados os seguintes fatores:

- Formação dos nós vizinhos (pacote “Hello”) é coerente?
- Formação das rotas (pacote “Rota”) é coerente?
- Master obtém de fato a informação de temperatura e umidade dos respectivos nós?
- Cálculo de perdas de pacote.

### 5.3.1 Cenário 0

Neste cenário, é o primeiro teste básico, com os sensores no mesmo ambiente (exemplo: cômodos de uma casa de 70 m<sup>2</sup>), ou então sensores distantes do nó Master em distâncias inferiores a 100 m. A ideia básica é apresentada na Figura 44.

Figura 44 – Distribuição da rede Mesh no Cenário 0



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 5.3.1.1 Descobrimdo os Vizinhos

Neste cenário, o nó Master encontrou todos os vizinhos conforme mostrado na Figura 44:

Figura 45 – Nó Master identificou os 4 vizinhos

Neighbor Table:						
246f28bf64a8	last rec.	4	metric 218	proto. AA	proto addr AA	
246f28bf64f4	last rec.	4	metric 210	proto. AA	proto addr AA	
F008d1dc9064	last rec.	4	metric 229	proto. AA	proto addr AA	
a4cf12051f64	last rec.	3	metric 224	proto. AA	proto addr AA	

Endereço MAC dos vizinhos do nó 0 (Master)

Cálculo da métrica de comunicação entre os nós vizinhos e o nó 0 (Master)

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que os valores calculados de métrica, que expressam a qualidade de comunicação, são acima de 200, representando que os dispositivos estão com boa qualidade de comunicação.

### 5.3.1.2 Aprendendo as Rotas

A Figura 46 mostra a formação de rotas.

Figura 46 – Formação de Tabela de Rotas no Cenário 0

Routing Table: total routes 4							
1 hops	from 246f28bf64a8	via 246f28bf64a8	last rec.	56	metric 218	protocol AA	prot. address AA
1 hops	from 246f28bf64f4	via 246f28bf64f4	last rec.	56	metric 210	protocol AA	prot. address AA
1 hops	from f008d1dc9064	via f008d1dc9064	last rec.	56	metric 229	protocol AA	prot. address AA
1 hops	from a4cf12051f64	via a4cf12051f64	last rec.	56	metric 204	protocol AA	prot. address AA

ESTE DISPOSITIVO É MASTER  
learning... 101

Número de saltos ("hops")

1 salto do nó vizinho (endereço MAC), via o próprio nó vizinho (repete-se o endereço MAC)

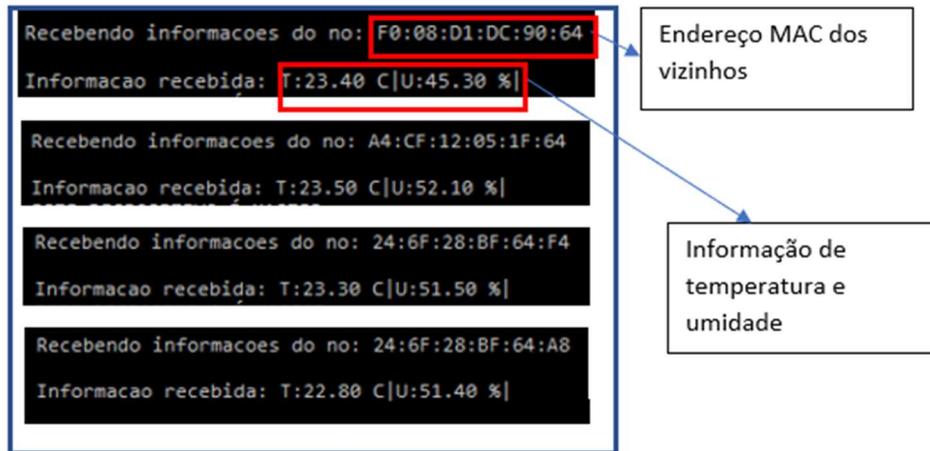
Fonte: Elaborado pelo Autor

Podemos observar na Figura 46, que todos os dispositivos se comunicaram com o Nó Master e as 4 rotas formadas são de apenas 1 salto.

### 5.3.1.3 Master Solicitando Dados

Foi possível coletar os dados de temperatura e umidade de cada nó vizinho. Isto é mostrado na Figura 47.

Figura 47 – Master coletando informações dos vizinhos no Cenário 0



Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.3.1.4 Cálculo de Perdas de Pacote

A Figura 48 mostra o cálculo de perda de pacotes.

Figura 48 – Cálculo de Perda de pacotes no Cenário 0

```

Send buffer is empty
### ----- PERDA DE PACOTES -----
MAC: F0:08:D1:DC:90:64 -> Enviados: 18 / Recebidos: 19 / Perda: 0.00 %
MAC: A4:CF:12:05:1F:64 -> Enviados: 19 / Recebidos: 18 / Perda: 5.26 %
MAC: 24:6F:28:BF:64:F4 -> Enviados: 18 / Recebidos: 18 / Perda: 0.00 %
MAC: 24:6F:28:BF:64:A8 -> Enviados: 18 / Recebidos: 18 / Perda: 0.00 %
### -----
  
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Praticamente 0 % de perdas de pacote. Somente o nó com endereço MAC `A4: CF:12:05:90:64` perdeu 1 pacote (perdas 5,26 %).

Continuando esta requisição de dados do nó Master, o cálculo mostra que o endereço MAC acima apresenta 0% de perda e quem perde o pacote é outro nó.

Possivelmente esta perda só ocorreu pois o Master enviou um pacote e não houve tempo de receber a informação pois a rotina de cálculo de perda de pacotes foi chamada. Então, considera-se neste caso que não houve perdas de pacote e o problema é na rotina de implementação de cálculo.

### 5.3.1.5 Problemas de Instabilidade da Rede Mesh

Conforme o relato acima, a próxima etapa seria aumentar a complexidade da rede e realizar novos testes. Porém ao buscar repetir o processo, foi observado constantemente uma instabilidade da rede durante a etapa de aprendizado das rotas.

Este problema teve duas consequências:

- Identificação de endereços MAC falsos, que não fazem parte da rede.
- Alteração da informação de saltos na rede.

Porém, não ocorria modificação da informação da tabela de vizinhos.

Exemplificando o problema:

Até a etapa 167 no processo de aprendizagem de rota, o funcionamento mantém-se correto, isto é mostrado na Figura 49.

Figura 49 – Aprendizagem correta de rotas até a etapa 167

```

learning... 165
Neighbor Table:
a4cf12051f64 last rec. 1 metric 217 proto. AA proto addr AA
f008d1dc9064 last rec. 1 metric 225 proto. AA proto addr AA
246f28bf64a8 last rec. 1 metric 228 proto. AA proto addr AA
246f28bf64f4 last rec. 0 metric 211 proto. AA proto addr AA

Routing Table: total routes 4
1 hops from a4cf12051f64 via a4cf12051f64 last rec. 6 metric 217 protocol AA prot. address AA
1 hops from f008d1dc9064 via f008d1dc9064 last rec. 6 metric 225 protocol AA prot. address AA
1 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64a8 last rec. 6 metric 228 protocol AA prot. address AA
1 hops from 246f28bf64f4 via 246f28bf64f4 last rec. 6 metric 211 protocol AA prot. address AA

Number of routes before transmit: 4
Sending route data: a4 cf 12 05 1f 64 01 09 aa aa f0 08 d1 dc 90 64 01 e1 aa aa 24 6f 28 bf 64 a8 01 e4 aa aa 24 6f 28 bf 64 f4 01 d3 aa aa
Sending:
Sending routes: 0138f008d1dc752cfffffffff0e72a4cf12051f6401d9aaaf008d1dc906401e1aaaa246f28bf64a801e4aaaa246f28bf64f401d3aaaa
ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 166
Neighbor Table:
a4cf12051f64 last rec. 1 metric 217 proto. AA proto addr AA
f008d1dc9064 last rec. 1 metric 225 proto. AA proto addr AA
246f28bf64a8 last rec. 1 metric 228 proto. AA proto addr AA
246f28bf64f4 last rec. 0 metric 211 proto. AA proto addr AA

Routing Table: total routes 4
1 hops from a4cf12051f64 via a4cf12051f64 last rec. 6 metric 217 protocol AA prot. address AA
1 hops from f008d1dc9064 via f008d1dc9064 last rec. 6 metric 225 protocol AA prot. address AA
1 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64a8 last rec. 6 metric 228 protocol AA prot. address AA
1 hops from 246f28bf64f4 via 246f28bf64f4 last rec. 6 metric 211 protocol AA prot. address AA

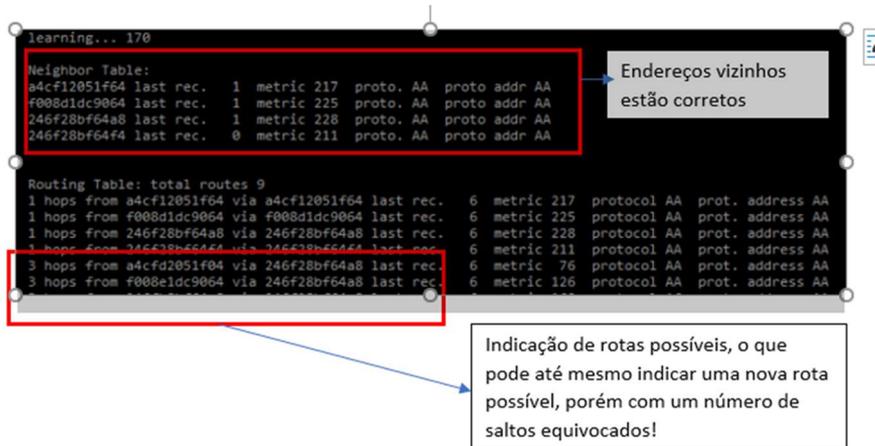
ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 167

```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Após a etapa 170, observa-se novas indicações de rotas possíveis, mais conforme o Cenário 0, o número de saltos está incoerente. Isto é demonstrado na Figura 50.

Figura 50 – Inconsistência no Número de Saltos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Outro tipo de problema, durante a sequência de aprendizagem, além de saltos inconsistentes, ocorreu a inclusão indevida de uma série de endereços MAC que não fazem parte da rede. Isto é mostrado na Figura 51 e Figura 52 respectivamente.

Figura 51 – Inconsistência nos Saltos e Endereços Não Existentes na Rede



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 52 – Erro de Roteamento e Saltos

```

40 hops from a0c716051f64 via a4c12051f64 last rec. 0 metric 3 protocol BF prot. address 5f
39 hops from f939c8a23b4c via a4c12051f64 last rec. 0 metric 8 protocol E7 prot. address 8f
56 hops from f10a4a9a900 via a4c12051f64 last rec. 0 metric 9 protocol A0 prot. address 00
7 hops from f808d1dc9064 via 246f28b6444 last rec. 0 metric 0 protocol AA prot. address 9a
7 hops from f808d1dc9064 via 246f28b6444 last rec. 0 metric 0 protocol AA prot. address 9a
82 hops from f300609d2264 via a4c12051f64 last rec. 0 metric 9 protocol A0 prot. address A2
11 hops from a0c716051f64 via a4c12051f64 last rec. 0 metric 18 protocol A7 prot. address 3a
106 hops from f050609d2264 via 246f28b6444 last rec. 0 metric 0 protocol A0 prot. address 9a
1 hops from 246f28b6444 via a4c12051f64 last rec. 0 metric 55 protocol AA prot. address 9a
56 hops from a0c716051f64 via a4c12051f64 last rec. 0 metric 66 protocol A4 prot. address 3a
39 hops from f939c8a23b4c via a4c12051f64 last rec. 0 metric 69 protocol E7 prot. address 8f
199 hops from f050609d2264 via a4c12051f64 last rec. 0 metric 69 protocol A0 prot. address 9a
1 hops from 246f28b6444 via 246f28b6444 last rec. 0 metric 0 protocol AA prot. address 9a
131 hops from a0a716051f64 via 246f28b6444 last rec. 0 metric 0 protocol A5 prot. address 7a
39 hops from a0c716051f64 via 246f28b6444 last rec. 0 metric 0 protocol A4 prot. address 3a
8 hops from f808d1dc9064 via 246f28b6444 last rec. 0 metric 0 protocol AA prot. address 9a
number of routes before transmit: 23

```

Erro na tabela de roteamento: endereços MAC que não existem e erros nos saltos

Fonte: Elaborado pelo Autor

Este problema foi um grande obstáculo, pois sua existência impedia a continuidade do desenvolvimento do trabalho, pois na etapa em que o Master solicita informações a cada nó, a base de endereçamento é através do processamento da tabela de roteamento.

O programa desenvolvido utiliza muito o recurso de alocação dinâmica de memória. Uma provável causa deste tipo de problema é algum processo de estouro de memória e para sua identificação seria necessária uma ferramenta de debug adequada, expondo o código e o mapeamento de memória.

A solução provisória foi cadastrar os endereços MAC de todos os endereços MAC dos dispositivos envolvidos na rede. Caso surgisse algum endereço falso, ele é descartado.

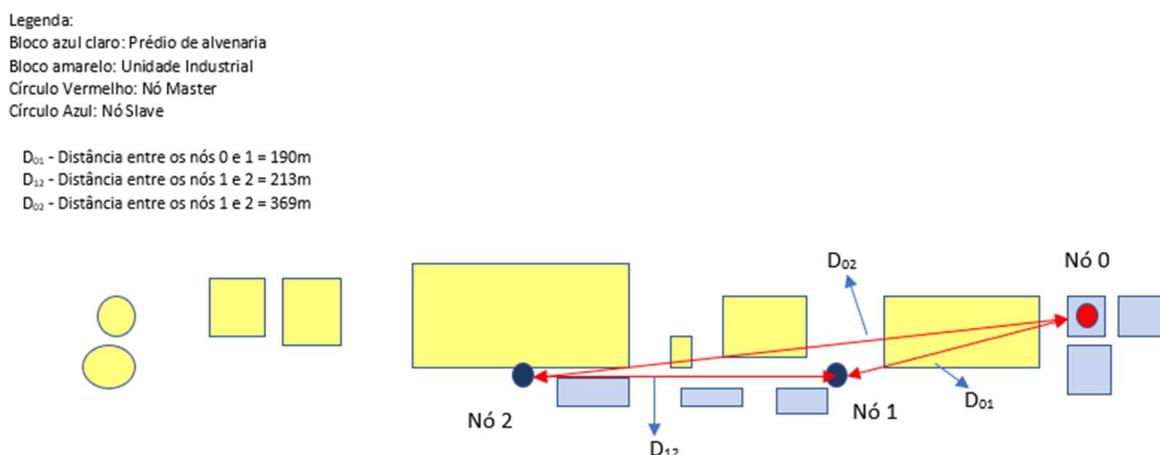
Isto possibilitou avançar nos testes da rede Mesh e uma estabilidade para permitir testes com cenários mais complexos. Porém é uma solução provisória pois não faz sentido existir a necessidade de atualizar o código em todos os dispositivos ao incluir um novo dispositivo.

### 5.3.2 Cenário 1

Neste cenário, utiliza-se como área uma região de indústria Petroquímica, em que o Master fica em uma sala com os demais nós da rede distribuídos em campo aberto. Optou-se pela utilização deste cenário (cenário 1 ao 5) por facilidades logísticas, como a existência de ruas de acesso e possibilidade de uso de um carro e um auxiliar para levar os sensores até os locais de interesse e a possibilidade de uso de rádio comunicadores.

A distribuição de sensores é mostrada na Figura 53.

Figura 53 – Cenário 1, Distribuição dos Sensores



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os blocos em amarelo representam plantas industriais e os blocos em azul são construções de alvenaria. A distância do Nó 0 (Master) ao nó 1 é de 190 m e a distância entre o nó Master e o nó 2 é de 369 m.

O objetivo deste teste é colocar o nó 2 fora de alcance do nó 1. As medidas de distâncias foram obtidas por linhas retas medidas no software Google Earth.

### 5.3.2.1 Descobrimo os Vizinhos no Cenário 1

Nesta etapa identificamos corretamente 1 vizinho do nó Master, o que é o esperado e isto é mostrado na Figura 54.

Figura 54 – Descobrimo o Vizinho no Cenário 1

```

-----state 0 -----learning-----
.....entro na função transmitHello,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 61

Neighbor Table:
f008d1dc9064 last rec.  0 metric 214  proto. AA  proto addr AA

Routing Table: total routes 1
1 hops from f008d1dc9064 via f008d1dc9064 last rec.  56 metric 214  protocol AA  prot. address AA

-----state 0 -----learning-----

```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Este é o resultado esperado, pois o nó 2 foi posicionado fora de alcance do nó Master.

### 5.3.2.2 Aprendendo as Rotas no Cenário 1

Inicialmente, ocorreu a aprendizagem de rota conforme o previsto. Isto é mostrado na Figura 55.

Observa-se que a informação de roteamento está correta, assim como o fato de o nó Master apresentar só um vizinho. Isto significa que o nó 2 está fora de alcance do nó Master até a etapa 139 no processo de aprendizagem.

A informação de cálculo de métrica dá-se entre o nó 1 e o nó 2, e o valor calculado é 148.

Porém, na etapa 168 de aprendizagem de rota ocorreu um fato relevante. O nó 2 passou a ser vizinho do nó Master, o dispositivo Master acusa uma atualização de vizinho e de rota. Isto é expresso no valor do salto na tabela de roteamento, que muda do valor 2 para o valor 1, indicando que o nó 2 passa a ser vizinho do nó Master. Este fato é explicado na Figura 56. Observa-se também na Figura 56 a mudança no valor calculado de Métrica, baixando seu valor para 22. Este fato é coerente, pois o nó 2 está mais distante do master do que o nó 1. Isto é mais um indicativo de que o nó 2 passou a ser vizinho do nó Master.

Embora houve uma indicação de atualização da tabela de vizinhos, não ocorreu a atualização na impressão da nova tabela de vizinhos.

Figura 55 – Aprendendo as Rotas no Cenário 1

ESTE DISPOSITIVO É MASTER  
learning... 139

Neighbor Table:  
246f28bf64a8 last rec. 4 metric 222 proto. AA proto addr AA

Etapa 139  
Somente um vizinho!

---

Routing Table: total routes 2  
1 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 222 protocol AA prot. address AA  
2 hops from 246f28bf64f4 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 148 protocol AA prot. address AA

ESTE DISPOSITIVO É MASTER  
learning... 140

Neighbor Table:  
246f28bf64a8 last rec. 4 metric 222 proto. AA proto

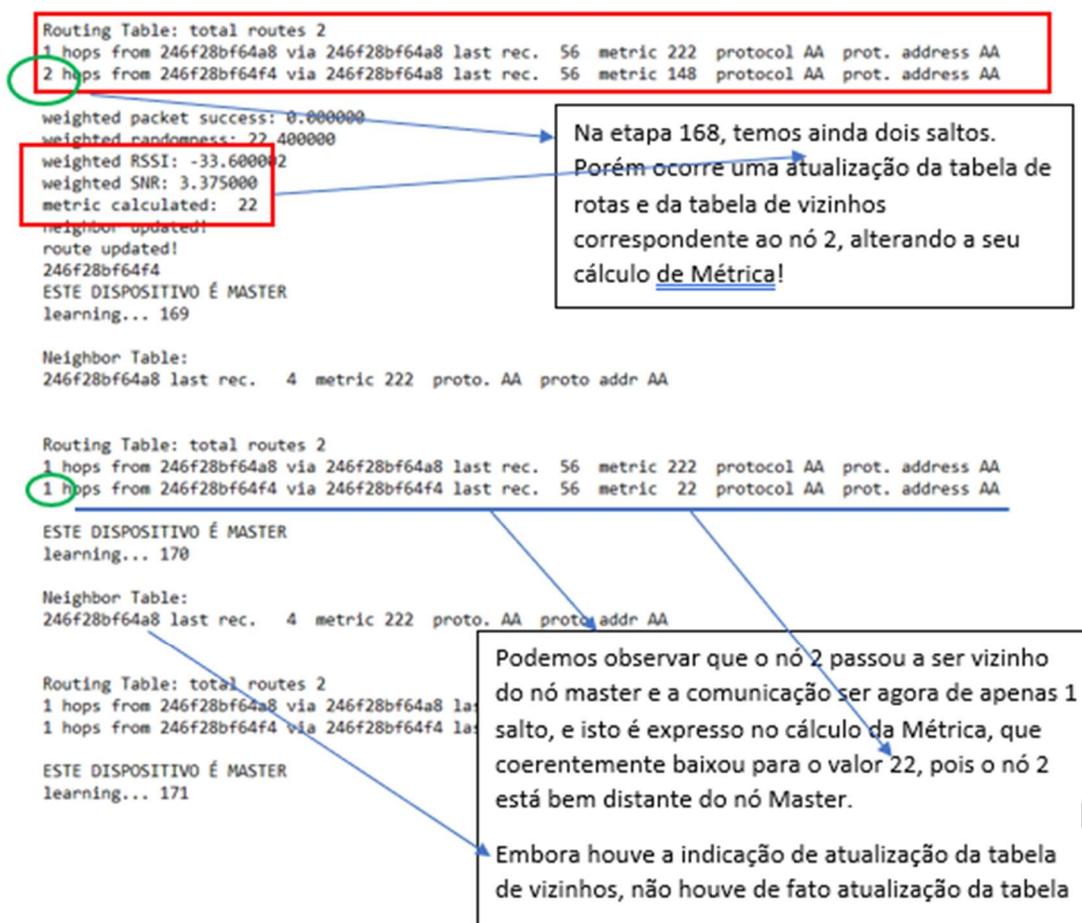
Routing Table: total routes 2  
1 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64a8 last rec. 56  
2 hops from 246f28bf64f4 via 246f28bf64a8 last rec. 56

Informação de rota com 2 saltos correta! A informação é do nó com endereço MAC 246F28BF64F4 e chega ao nó Master via nó de endereço MAC 246F28BF64A8.

A informação de métrica 148 é a informação da métrica obtida entre o nó 1 e o nó 2!

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 56 – Alteração da tabela de roteamento devido a métrica



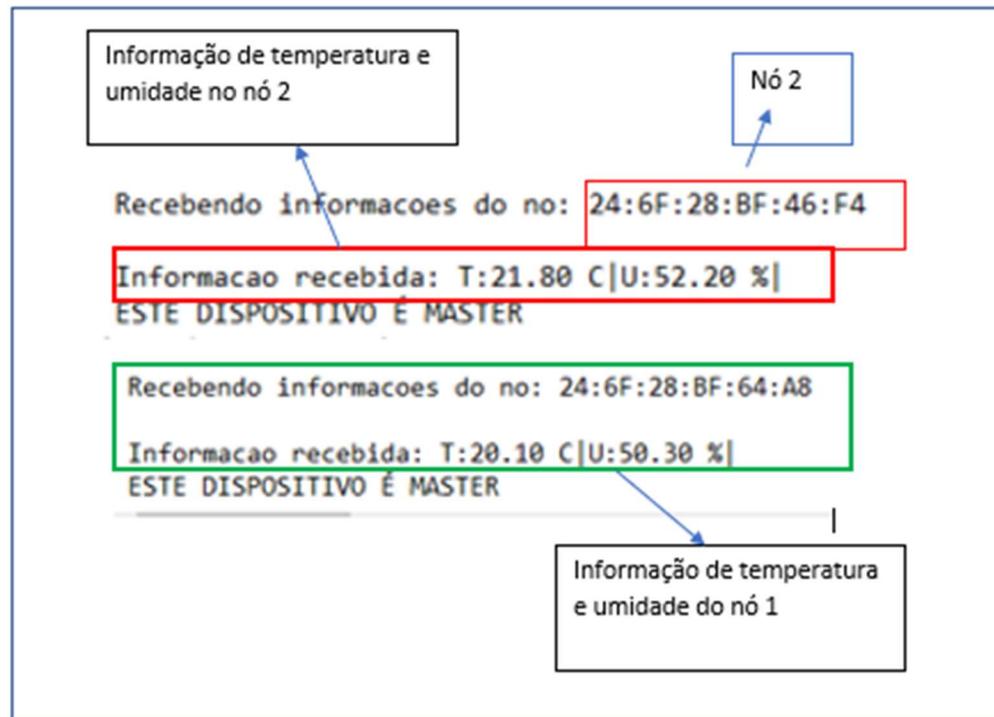
Fonte: Elaborado pelo Autor

Provavelmente este fato ocorreu pois o nó 2 ficou na região limite de alcance do nó Master.

### 5.3.2.3 Master Solicitando Dados no Cenário 1

O nó Master conseguiu ler a informação dos nós 1 e 2 em algum momento. Isto é mostrado na Figura 57.

Figura 57 – Master Solicitando Dados no Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 5.3.2.4 Cálculo de Perdas de Pacote no Cenário 1

O nó 2 ficou na região limite entre ser ou não vizinho do nó Master, conforme observado anteriormente. Com isso, o percentual de perdas no nó 2 foi de 72,22 %. Em relação ao nó 1, não houve perdas de pacote. Isto é apresentado na Figura 58.

Figura 58 – Perda de Pacotes no Cenário 2

```
MAC: 24:6F:28:BF:64:F4 -> Enviados: 18 / Recebidos: 5 / Perda: 72.22 %
MAC: 24:6F:28:BF:64:A8 -> Enviados: 18 / Recebidos: 18 / Perda: 0.00 %
### -----
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

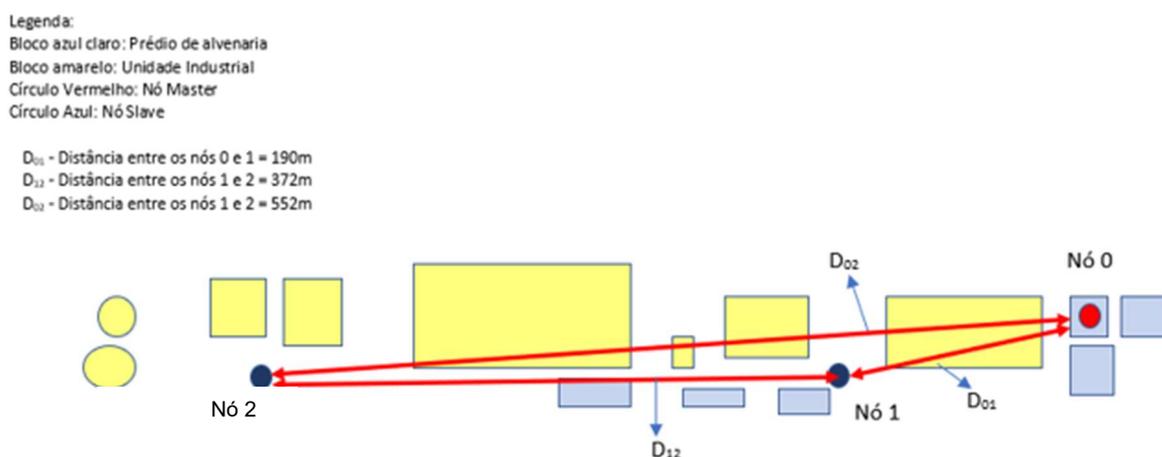
### 5.3.3 Cenário 2

Este cenário é similar ao cenário 1, porém o nó 2 é colocado em uma distância maior em relação ao nó 0 (Master) e o nó 1. Este cenário é mostrado na Figura 59.

Com isso, a distância  $D_{12}$ , que é a distância entre os nós 1 e 2 passa a ser de 372 m. A distância  $D_{02}$ , que é a distância entre o nó 0 (Master) e o nó 2 passa a ser de 552 m.

A ideia neste cenário é garantir que o nó 2 fique fora do alcance direto no nó Master.

Figura 59 – Cenário 2



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 5.3.3.1 Descobrimo os Vizinhos no Cenário 2

Novamente, o Master identificou corretamente seu único vizinho, isto é mostrado na Figura 60.

Figura 60 – Descobrimo os Vizinhos no Cenário 2

```

-----state 0 -----learning-----
.....entro na função transmitHello,.....
ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 53

Neighbor Table:
246f28bf64f4 last rec. 4 metric 172 proto. AA proto addr AA

```

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.3.3.2 Aprendendo as Rotas no Cenário 2

Nesta nova condição, com o nó 2 posicionado mais distante ao nó Master e ao nó 1, houve corretamente a identificação de 2 rotas, sendo a comunicação entre o Master e o nó 2 dá-se com 2 saltos. Este cenário manteve-se constante até o fim do período de aprendizagem. Isto é mostrado na Figura 60.

Figura 61 – Aprendendo as Rotas no Cenário 2

```

Routing Table: total routes 2
1 hops from 246f28bf64f4 via 246f28bf64f4 last rec. 56 metric 172 protocol AA prot. address AA
2 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64f4 last rec. 56 metric 123 protocol AA prot. address AA

-----state 0 -----learning-----
.....entro na função transmitHello,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 55

Neighbor Table:
246f28bf64f4 last rec. 4 metric 172 proto. AA proto addr AA

Routing Table: total routes 2
1 hops from 246f28bf64f4 via 246f28bf64f4 last rec. 56 metric 172 protocol AA prot. address AA
2 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64f4 last rec. 56 metric 123 protocol AA prot. address AA

```

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.3.3.3 Master Solicitando Dados no Cenário 2

Neste cenário, o Master comunicou-se com os dois nós e recebeu os dados de temperatura e umidade de cada nó conforme mostrado na Figura 62.

Figura 62 – Master Solicitando Dados Cenário 2

```

Recebendo informacoes do no: 24:6F:28:BF:64:F4
Informacao recebida: T:25.00 C|U:49.10 %
ESTE DISPOSITIVO É MASTER
Aprendeu as rotas!
busca informacoes dos nós## Solicitando informacoes ao no:
Sending:
checksendBuffer
! (277880) uart_events: [DATA EVT]: PKT buffer vazio
Send buffer is empty

Recebendo informacoes do no: 24:6F:28:BF:64:A8
Informacao recebida: T:20.60 C|U:51.20 %
ESTE DISPOSITIVO É MASTER
Aprendeu as rotas!

```

Master solicitou e recebeu informações de temperatura e umidade do nó 1

Master solicitou e recebeu informações do nó 2, que está fora do seu alcance de comunicação LoRa direto, comunicando-se com 2 saltos!

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.3.3.4 Cálculo de Perda de Pacotes no Cenário 2

Nesta nova configuração, com o nó 2 comunicando-se com o Master em dois saltos, a perda de pacote na comunicação do Master com os nós 1 e 2 foi de zero, ou seja, sem perdas. Isto é mostrado na Figura 63.

Figura 63 – Perda de Pacotes no Cenário 2

```
MAC: 24:6F:28:BF:64:F4 -> Enviados: 18 / Recebidos: 18 / Perda: 0.00 %
MAC: 24:6F:28:BF:64:A8 -> Enviados: 18 / Recebidos: 18 / Perda: 0.00 %
### -----
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os próximos cenários tratam da inclusão de mais um nó vizinho ao nó Master.

### 5.3.4 Cenário 3

Neste cenário, é incluso um novo nó intermediário, ao alcance no nó Master (1 salto). O proposto aqui é observar a resposta quanto a formação de rotas. Isto é mostrado na Figura 64.

Figura 64 – Cenário 3

Legenda:

Bloco azul claro: Prédio de alvenaria

Bloco amarelo: Unidade Industrial

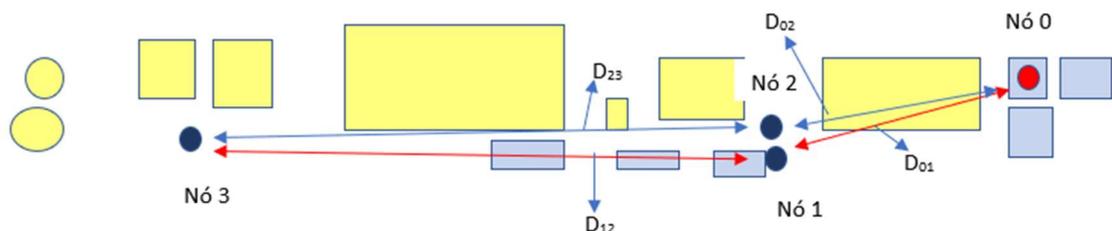
Círculo Vermelho: Nó Master

Círculo Azul: Nó Slave

$D_{01}$  - Distância entre os nós 0 e 1 = 190m     $D_{02}$  - Distância entre os nós 0 e 1 = 188m

$D_{12}$  - Distância entre os nós 1 e 2 = 372m     $D_{23}$  - Distância entre os nós 0 e 1 = 362m

$D_{02}$  - Distância entre os nós 1 e 2 = 552m     $D_{12}$  - Distância entre os nós 0 e 1 = 10m



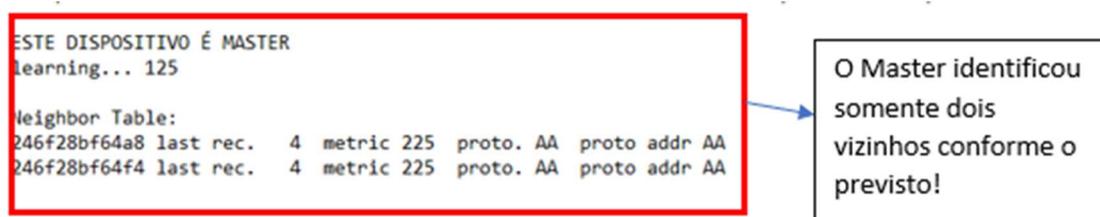
Fonte: Elaborado pelo Autor

Neste contexto, a distância entre os nós 1 e 2 ( $D_{12}$ ) é de apenas 10 m. A ideia aqui foi aumentar esta distância em outros ensaios.

#### 5.3.4.1 Descobrendo os Vizinhos no Cenário 3

Neste cenário, o Master identificou os dois vizinhos (nó 1 e 2) conforme o previsto. O nó 3 ficou fora do alcance direto do nó Master.

Figura 65 – Descobrendo os Vizinhos no Cenário 3



Fonte: Elaborado pelo Autor

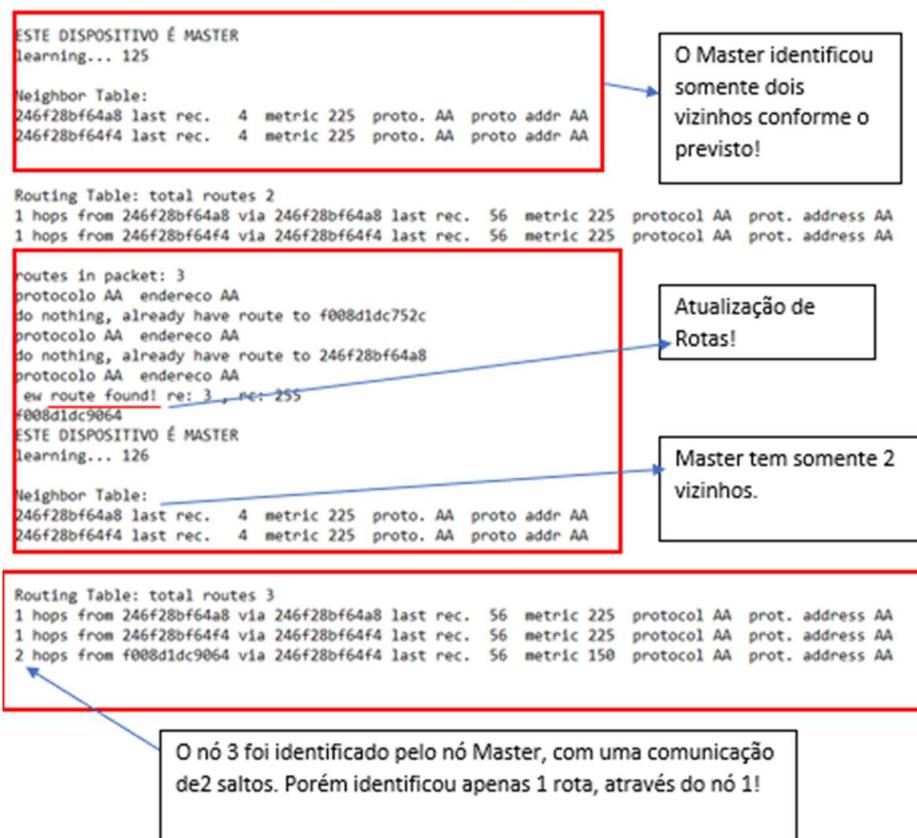
#### 5.3.4.2 Aprendendo as Rotas no Cenário 3

A informação de rota neste cenário chegou corretamente ao nó Master. A comunicação com o nó 3 dá-se através de dois saltos. Porém, só apresentou uma rota, via o nó 2. Aqui poderíamos ter duas rotas na comunicação entre o nó 3 e o nó Master. Uma rota com 2 saltos através do nó 1 e uma nova rota de dois saltos através do nó 2. Estes resultados são apresentados na Figura 66.

Este é um cenário em que é necessário um número bem maior de testes, analisando o cálculo das Métricas de comunicação ao varia a distância entre os nós 1 e 2 ( $D_{12}$ ) e como irá alterar a geração das rotas.

Outro aspecto para ser analisado futuramente, é se a rede Mesh iria se corrigir adequadamente em caso de um cenário como este e identificar apenas uma rota entre o nó 3 e o nó Master.

Figura 66 – Aprendendo as Rotas no Cenário 3



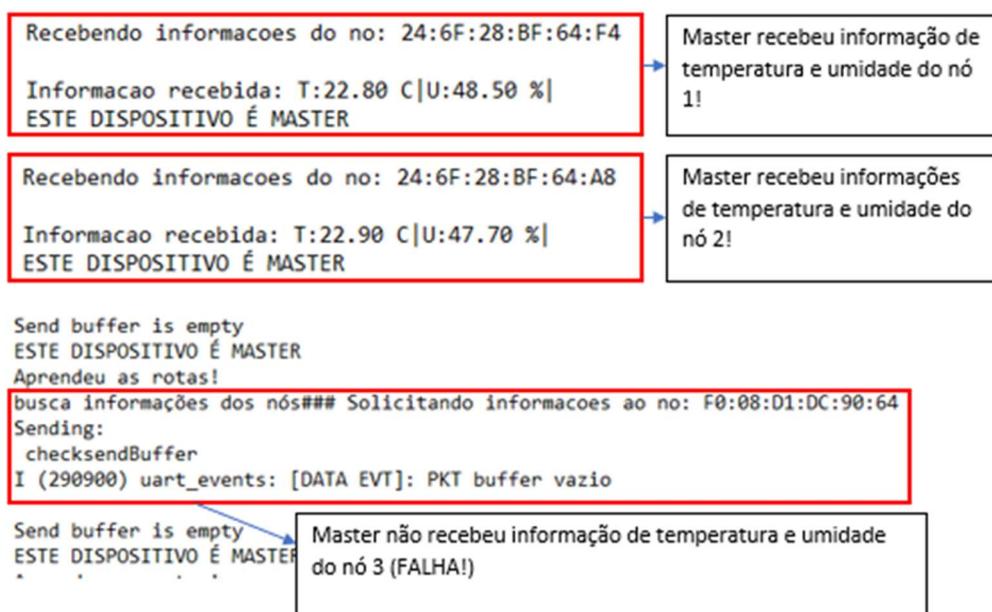
Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 5.3.4.3 Master solicitando Dados no Cenário 3

Neste cenário, o master não obteve a informação do nó fora do seu alcance. Então existiu uma falha no algoritmo de programação e é necessário buscar a identificação desta falha. Obteve normalmente as informações de temperatura e umidade dos nós vizinhos.

Os valores obtidos são mostrados na Figura 67.

Figura 67 – Master Solicitando Dados no Cenário 3

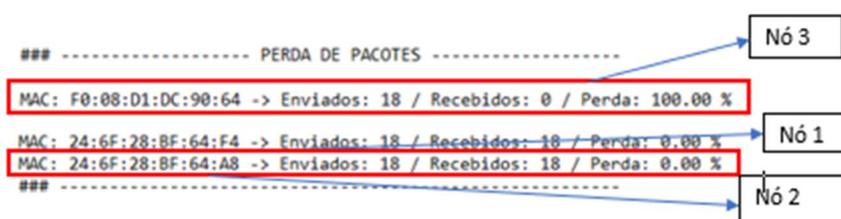


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 5.3.4.4 Perda de Pacotes no Cenário 3

A Figura 68 mostra a perda de pacotes no nó mais distante do Master (nó 3). Com os nós vizinhos, a perda de pacote é zero.

Figura 68 – Perda de Pacotes no Cenário 3

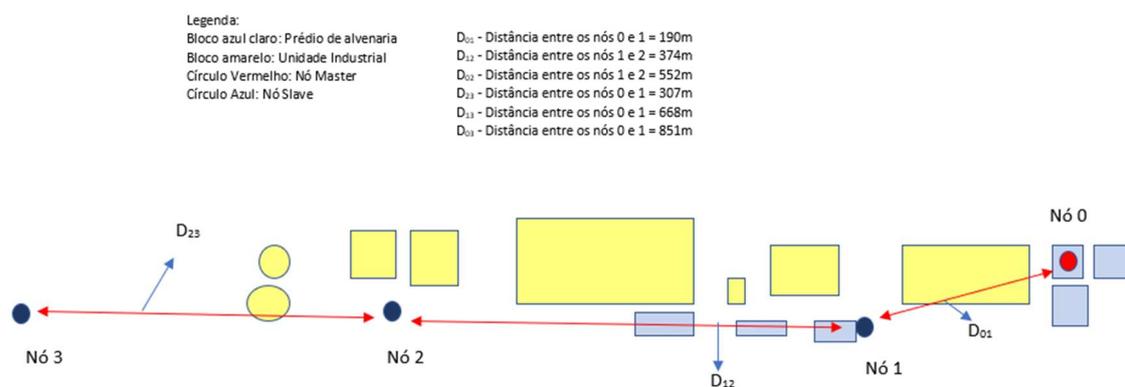


Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.3.5 Cenário 4

Neste cenário, incluímos um nó após o nó ainda mais distante do nó Master, porém fora de alcance direto do nó 1. O objetivo é verificar a ocorrência de comunicação com 3 saltos até o nó Master. Este cenário é mostrado na Figura 69.

Figura 69 – Cenário 4



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 5.3.5.1 Descobrimo os Vizinhos no Cenários 4

Como esperado, o nó Master identificou o vizinho, conforme mostrado na Figura 70.

Figura 70 – Descobrimo o Vizinho no Cenário 4

```

-----state 0 -----learning-----
.....entro na função transmitHello,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 7

Neighbor Table:
246f28bf64a8 last rec.  0 metric 226 proto. AA proto addr AA
  
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.3.5.2 Aprendendo as Rotas no Cenários 4

Neste cenário ocorreu uma falha grave na tabela de roteamentos. A tabela de roteamento no dispositivo Master não identificou o nó 3, e teríamos que ter uma comunicação com 2 saltos. Isto é demonstrado na Figura 71.

Figura 71 – Aprendendo as Rotas no Cenário 4

```

Routing Table: total routes 2
1 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 215 protocol AA prot. address AA
2 hops from f008d1dc9064 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 145 protocol AA prot. address AA

ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 201
Neighbor Table:
246f28bf64a8 last rec. 4 metric 215 proto. AA proto addr AA

Routing Table: total routes 2
1 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 215 protocol AA prot. address AA
2 hops from f008d1dc9064 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 145 protocol AA prot. address AA

```

Finalizando o processo de aprendizado de rota!

Roteamento identificou 2 saltos de comunicação com o Master corretamente para com o nó 2

Porém, a tabela de Roteamento transmitida para o Master não identificou o nó 3. Aqui deveríamos ter uma comunicação com 3 saltos do nó 3 com o nó Master (FALHA!)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Neste cenário, não foi possível adquirir os dados no nó 2 e 3. A aquisição dos dados com o nó vizinho ao Master (nó 1) continuou correta (0% de perdas). Isto é mostrado na Figura 72.

Figura 72 – Perda de Pacotes no Cenário 4

```

### ----- PERDA DE PACOTES -----
MAC: F0:08:D1:DC:90:64 -> Enviados: 18 / Recebidos: 0 / Perda: 100.00 %
MAC: A4:CF:12:05:1F:64 -> Enviados: 18 / Recebidos: 0 / Perda: 100.00 %
MAC: 24:6F:28:BF:64:F4 -> Enviados: 18 / Recebidos: 0 / Perda: 100.00 %
MAC: 24:6F:28:BF:64:A8 -> Enviados: 18 / Recebidos: 18 / Perda: 0.00 %
### -----

```

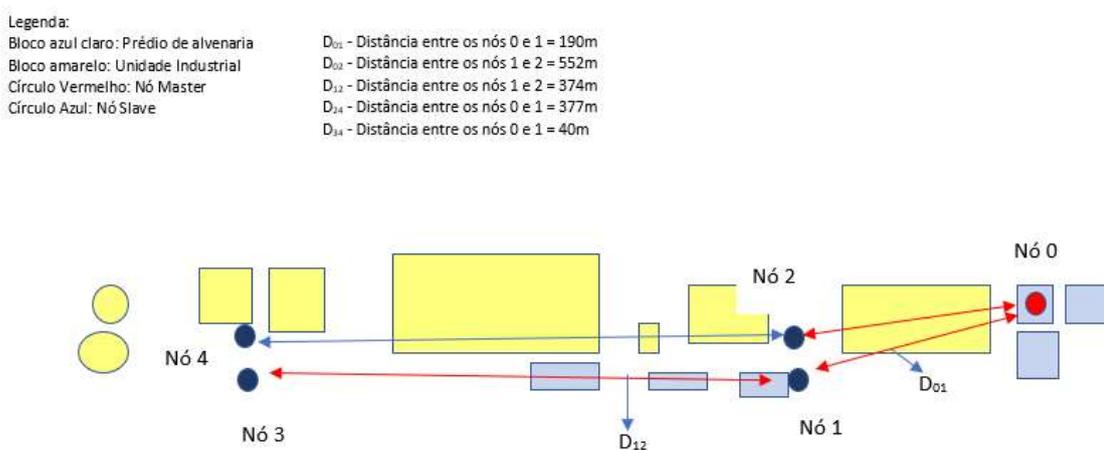
Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.3.6 Cenário 5

Este cenário é semelhante ao cenário 3, porém foi adicionado um quarto dispositivo, próximo ao nó 3. O importante neste teste é verificar se neste caso ocorre a identificação de uma 4 rota.

O cenário 5 é mostrado na Figura 73.

Figura 73 – Cenário 5



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 5.3.6.1 Descobrimo os Vizinhos no Cenários 5

Conforme o previsto, o nó Master identificou corretamente apenas 2 vizinhos, conforme mostrado na Figura 74.

Figura 74 – Master identificou 2 vizinhos

```

ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 122

Neighbor Table:
246f28bf64f4 last rec. 4 metric 17 proto. AA proto addr AA
246f28bf64a8 last rec. 4 metric 22 proto. AA proto addr AA
  
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.3.6.2 Aprendendo as Rotas no Cenários 5

A Figura 75 apresenta as rotas identificadas pelo nó Master. Foi possível identificar 4 rotas, sendo duas rotas com 2 saltos. Conforme a configuração do cenário 5, é um resultado coerente.

Figura 75 – Aprendendo as Rotas no Cenário 5

```

Routing Table: total routes 4
1 hops from 246f28bf64f4 via 246f28bf64f4 last rec. 56 metric 17 protocol AA prot. address AA
1 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 22 protocol AA prot. address AA
2 hops from f00bd1dc9064 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 48 protocol AA prot. address AA
2 hops from a4cf12051f64 via 246f28bf64f4 last rec. 56 metric 46 protocol AA prot. address AA

ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 123

Neighbor Table:
246f28bf64f4 last rec. 4 metric 17 proto. AA proto addr AA
246f28bf64a8 last rec. 4 metric 22 proto. AA proto addr AA

Routing Table: total routes 4
1 hops from 246f28bf64f4 via 246f28bf64f4 last rec. 56 metric 17 protocol AA prot. address AA
1 hops from 246f28bf64a8 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 22 protocol AA prot. address AA
2 hops from f00bd1dc9064 via 246f28bf64a8 last rec. 56 metric 48 protocol AA prot. address AA
2 hops from a4cf12051f64 via 246f28bf64f4 last rec. 56 metric 46 protocol AA prot. address AA

ESTE DISPOSITIVO É MASTER
learning... 124
  
```

Identificado 4 rotas, sendo duas rotas com dois saltos, o que está correto!

O nó 3 formou a rota de 2 saltos até o Master através do nó 1!  
O nó 4 formou a rota com dois saltos até o Master com o nó 2!  
Observar que não houve concentração das duas rotas em um único nó intermediário!

Fonte: Elaborado pelo Autor

O Master só coletou informações de temperatura e umidade dos nós 1 e 2, que são vizinhos. Em relação ao nó 4, apresentou perda de pacotes de 22%, e isto deve-se principalmente a presença de obstáculos.

Figura 76 – Perdas de Pacote no Cenário 5

```

Send buffer is empty
### ----- PERDA DE PACOTES -----
MAC: F0:08:D1:DC:90:64 -> Enviados: 19 / Recebidos: 0 / Perda: 100.00 %
MAC: A4:CF:12:05:1F:64 -> Enviados: 18 / Recebidos: 0 / Perda: 100.00 %
MAC: 24:6F:28:BF:64:F4 -> Enviados: 18 / Recebidos: 18 / Perda: 0.00 %
MAC: 24:6F:28:BF:64:AB -> Enviados: 18 / Recebidos: 14 / Perda: 22.22 %
###
  
```

Nó 4

Nó 3

Nó 1

Nó 2 apresentou perda de pacote de 22%

Fonte: Elaborado pelo Autor

## 5 CONCLUSÃO

A partir da apresentação dos resultados e discussões no capítulo 5, pode-se afirmar que os objetivos do trabalho foram parcialmente atingidos.

O problema principal foi a instabilidade da Rede Mesh na formação de sua tabela de roteamento, em que além de haver geração de saltos indevidos, surgiu o problema de identificação de nós com endereços MAC não existentes (falsos).

Estes problemas possivelmente são gerados por “estouro de memória” ou sobreposição de regiões de memória em que um espaço alocado avança sobre outro destinada a outro finalidade, durante a recepção de pacotes do tipo rota (o firmware desenvolvido utiliza muito a técnica de alocação dinâmica de memória).

A solução provisória deste problema foi cadastrar em todos os dispositivos e aplicar na etapa de comparação no pacote de uma nova rota, excluir automaticamente as informações falsas. Isto solucionou o problema para os testes iniciais e permitiu uma estabilidade para avançar nos testes iniciais, mas prejudica o fato de adicionar um dispositivo não cadastrado, tendo que todos os dispositivos terem que receber atualização de software embarcado.

Mesmo com estas limitações, foi possível construir rotas com 4 dispositivos e com o limite de dois saltos, e isto permite uma área de cobertura um raio de área em relação ao nó Master de 850 m (é possível neste estágio uma boa área de cobertura).

A requisição de dados através do Master com dois saltos foi possível com uma comunicação envolvendo somente um nó intermediário e um nó fora do alcance direto, com praticamente sem perdas de pacote. Porém ao incluir outro nó intermediário (Cenários 3 e 5), não foi possível a requisição de dados pelo Master aos nós fora de alcance. Cabe ressaltar que apesar deste fato, na etapa de roteamento foram identificados corretamente as rotas e os saltos, ou seja, a Rede Mesh se formou, porém existe erro de lógica de programação na etapa de requisição do Master (mas a rede Mesh se formou). Com comunicação do Master, praticamente não houve perdas significativas de pacote aos nós vizinhos.

Outra linha de atuação é avançar nos testes de desempenho da arquitetura, pois além da análise de perdas de pacotes, é importante obter informação sobre a

taxa de transferência ou vazão da rede (não transmitir pacotes com atrasos grandes), como também a latência dos pacotes entre os nós.

Não foi possível a formação de rota e a comunicação do Master envolvendo 3 saltos, e este problema não foi solucionado até o momento. Para buscar a solução deste problema de aumento da área de cobertura da rede com saltos superior a 2, cabe uma discussão sobre a uma revisão da metodologia que foi aplicada neste trabalho. Até o momento, a metodologia neste trabalho foi muito importante para os testes iniciais, e os resultados obtidos que permitem uma melhor compreensão da comunicação via LoRa e da funcionalidade da Rede Mesh. Ao inserir mais nós, o aspecto de distâncias envolvidas começa a inviabilizar os testes.

Na mesma linha de raciocínio, para buscar resolver o problema de instabilidade encontrado seria possível para uma rede pequena (4 sensores), forçar em cada nó uma tabela de roteamento e de vizinhos, e desta forma de simulação resolver a lógica de requisição do Master e outros testes. Agora, cada nó tem uma tabela específica, e o problema passa a ficar mais difícil ao incluir outros nós na rede Mesh para aumentar o tamanho da rede.

Então, é fundamental a criação e utilização de um software de simulação com comunicação aos nós para permitir a realização de testes e com isso melhorar o software embarcado.

Quanto ao Hardware desenvolvido, atendeu aos propósitos para esta etapa do trabalho, adequado para estes testes iniciais. Caso pretenda-se com os resultados já obtidos até o momento, avançar em uma aplicação no campo, é necessário prever o condicionamento físico dos sensores, condicionar os cabos de comunicação e avançar na gestão de energia das baterias, como também projetar uma placa de circuito impresso para substituir a matriz de contatos. Aplicar a técnica de colocar os dispositivos em baixo consumo e retirá-los deste Estado só no momento necessário, e na obtenção de dados pelo Master constar informações sobre consumo de cada módulo e tensão da bateria. Pode ser acoplado a cada nó placas fotovoltaicas para recarregar a sua bateria.

Outro aspecto, é com os resultados obtidos, em que é perfeitamente possível formar uma rede com até dois saltos, ou mesmo uma rede do tipo estrela, pode-se avançar na etapa de comunicação de internet dos dispositivos, como também fornecer os dados obtidos na etapa de leitura de sensores para a nuvem (servidor

WEB e Dashboards, informações de Real Time Clock e GPS), pois módulos ESP32 utilizados neste estudo permitem isso.

A continuidade dos estudos de construção de rede Mesh com dispositivos LoRa é importante e necessária, pois permite inúmeras aplicações em ambiente industrial, ambiente rural e em um campus Universitário, pois os dispositivos construídos são perfeitamente portáteis e a rede Mesh pode permitir o incremento da área de cobertura.

## REFERÊNCIAS

ABOUT LORA ALLIANCE® | LORA ALLIANCE®. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>. Acesso at: 24 Nov. 2020.

ABOUT LORAWAN® | LORA ALLIANCE®. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-LoRaWAN>. Acesso at: 24 Nov. 2020.

ADA, Lady. Adafruit MAX31865 RTD PT100 Amplifier. [s. l.], 2017.

ALCARAZ, Cristina; LOPEZ, Javier. A security analysis for wireless sensor mesh networks in highly critical systems. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews**, [s. l.], v. 40, n. 4, p. 419–428, 2010.

ANATEL - RESOLUÇÃO Nº 705, DE 21 DE DEZEMBRO DE 2018. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2018/1220-resolucao-705>. Acesso at: 21 Nov. 2020.

AYAZ, Muhammad *et al.* Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. **IEEE Access**, [s. l.], v. 7, p. 129551–129583, 2019.

BEATRYS RUIZ, Linnyer *et al.* **Sobre o Impacto do Gerenciamento no Desempenho das Redes de Sensores Sem Fio \***. Belo Horizonte - MG: [s. n.], 2003.

DO RIO QUE TUDO ARRASTA SE DIZ QUE É... BERTOLT BRECHT - PENSADOR. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.pensador.com/frase/NDI2MQ/>. Acesso at: 13 Dec. 2021.

DYLAN HERRADA. Adafruit\_BME680. [s. l.], 2017.

EBI, Christian *et al.* Synchronous LoRa Mesh Network to Monitor Processes in Underground Infrastructure. **IEEE Access**, [s. l.], v. 7, p. 57663–57677, 2019.

ESP-MESH - ESP32 - — ESP-IDF PROGRAMMING GUIDE LATEST DOCUMENTATION. [S. l.], Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-guides/mesh.html>. Acesso at: 11 Nov. 2020.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP-MQTT esp32 — ESP-IDF Programming Guide latest documentation**. [S. l.], 2016. Disponível em:

<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-guides/mesh.html>.

Acesso at: 9 Nov. 2020.

ESPRESSIF SYSTEMS. **Get Started - ESP32 - — ESP-IDF Programming Guide latest documentation.** [S. *l.*], [s. *d.*]. Disponível em:

<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started/index.html>.

Acesso at: 29 Nov. 2020.

FIRST LORA MESSAGE BOUNCED OFF THE MOON – DWINGELOO RADIO TELESCOPE | CAMRAS. [S. *l.*], [s. *d.*]. Disponível em:

<https://www.camras.nl/en/blog/2021/first-lora-message-bounced-off-the-moon/>.

Acesso at: 10 Dec. 2021.

HT-M00 DUAL CHANNEL LORA GATEWAY – HELTEC AUTOMATION. [S. *l.*], [s. *d.*]. Disponível em: <https://heltec.org/project/ht-m00/>. Acesso at: 30 Nov. 2020.

HT-M02 EDGE LORA GATEWAY – HELTEC AUTOMATION. [S. *l.*], [s. *d.*]. Disponível em: <https://heltec.org/project/ht-m02/>. Acesso at: 30 Nov. 2020.

INCÊNDIO CAUSA PREJUÍZO DE R\$ 20 MILHÕES À EMPRESA DE ALGODÃO | TV TAQUARI – REDE RECORD. [S. *l.*], [s. *d.*]. Disponível em: <http://tvtaquari.com.br/incendio-causa-prejuizo-de-r-20-milhoes-a-empresa-de-algodao/>. Acesso at: 29 Nov. 2020.

INCÊNDIO EM ALGODÃO É RISCO PERMANENTE EM PARTE DA CADEIA DE PRODUÇÃO. [S. *l.*], [s. *d.*]. Disponível em: <https://www.expressomt.com.br/noticia/incendio-em-algodao-e-risco-permanente-em-parte-da-cadeia-de-producao/28637>. Acesso at: 4 Nov. 2020.

INCÊNDIO EM FAZENDA DE ALGODÃO CAUSA PERDA DE R\$ 18 MILHÕES EM MT - REVISTA GLOBO RURAL | ALGODÃO. [S. *l.*], [s. *d.*]. Disponível em:

<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/Algodao/noticia/2020/08/incendio-em-fazenda-de-algodao-causa-perda-de-r-18-milhoes-em-mt.html>. Acesso at: 4 Nov. 2020.

KARL, Holger; WILLIG, Andreas. **PROTOCOLS AND ARCHITECTURES FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS.** [S. *l.*: s. *n.*], 2005. Disponível em: Acesso at: 9 Nov. 2020.

LAVRIC, Alexandru; POPA, Valentin. Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A survey. **ISSCS 2017 - International Symposium on Signals, Circuits and Systems**, [s. *l.*], 2017.

LEE, Huang Chen; KE, Kai Hsiang. Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [s. l.], v. 67, n. 9, p. 2177–2187, 2018.

LIU, Thomas. Digital Humidity and Temperature sensor. **Adfruit**, [s. l.], p. 1–5, 2016.

LORA. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/lora/>. Acesso at: 24 Nov. 2020.

LORA, Heltec. **WIFI LoRa 32 (V2) – Heltec Automation**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>. Acesso at: 28 Nov. 2020.

LORA, Heltec. **Wireless Stick Lite – Heltec Automation**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://heltec.org/project/wireless-stick-lite/>. Acesso at: 29 Nov. 2020.

LORA — LORA DOCUMENTATION. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#rssi>. Acesso at: 25 Nov. 2020.

LORA - REDES DE COMPUTADORES I. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/lora/modulacao.html>. Acesso at: 21 Nov. 2020.

MAX6675 MÓDULO DE LEITURA PARA TERMOPAR TIPO K - USINAINFO. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-temperatura/max6675-modulo-de-leitura-para-termopar-tipo-k-5315.html>. Acesso at: 30 Nov. 2020.

OMRE, Alf Helge. **2017 Internet Technologies and Applications (ITA): proceedings of the Seventh International Conference: Tuesday 12th - Friday 15th September 2017, Wrexham Glyndŵr University, Wales, UK**. [S. l.: s. n.], 2012. v. 4

ORTIZ, Frenando M. *et al.* ~ o de Desempenho de uma Rede LoRa em Caracterizac , a ~ o vs. Pr ´ Ambientes Urbanos: Simulac , a atica. [s. l.], n. January 2020, 2019.

PT100 SENSOR DE TEMPERATURA TERMOPAR TIPO SONDA COM 3 FIOS (-50°C A +350°C) - USINAINFO. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-temperatura/pt100-sensor-de-temperatura-termopar-tipo-sonda-com-3-fios-50c-a-450c-4825.html>. Acesso at: 28 Nov. 2020.

ROBSON MATEUS, Geraldo. Curso de Especialização em Redes de Telecomunicações Conceitos Básicos Transmissão e Comutação. [s. l.], Disponível em: Acesso at: 12 Dec. 2021.

SAI - SISTEMA ABRAPA DE IDENTIFICAÇÃO. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.abrapa.com.br/Paginas/rastreabilidade/sai-sistema-abrapa-de-Identificacao.aspx>. Acesso at: 30 Nov. 2020.

SEMTECH CORPORATION. SX1272/3/6/7/8 LoRa Modem Design Guide, AN1200.13. [s. l.], n. July, p. 9, 2013. Disponível em: <https://www.rs-online.com/>.

SOBRE O TEMA - PORTAL EMBRAPA. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-mecanizacao-e-agricultura-de-precisao/nota-tecnica>. Acesso at: 3 Nov. 2020.

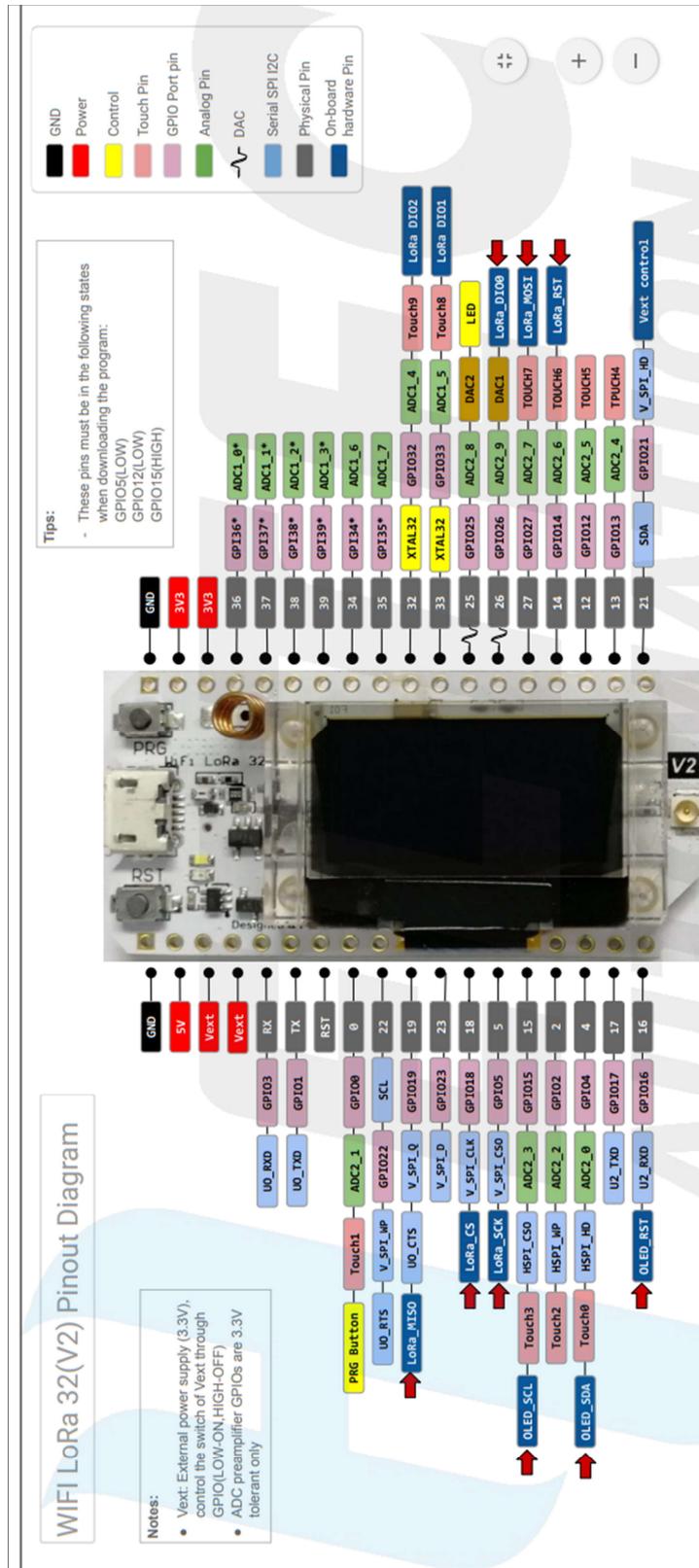
TANENBAUM, Andrew S; TRADUÇÃO, Holanda; DE SOUZA, Vandenberg D. **Redes de computadores Quarta edição**. [S. l.: s. n.], [s. d.].

TELECO.COM.BR. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: [https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialespecradio/pagina\\_2.asp](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialespecradio/pagina_2.asp). Acesso at: 21 Nov. 2020.

YARALI, Abdulrahman; AHSANT, Babak; RAHMAN, Saifur. Wireless mesh networking: A key solution for emergency & rural applications. *In*: 2009. **Proceedings - 2009 2nd International Conference on Advances in Mesh Networks, MESH 2009**. [S. l.: s. n.], 2009. p. 143–149.

## ANEXO A – PINAGEM DA PLACA ESP32 HELTEC

Figura 77 - Pinagem da Placa Heltec V2



Fonte: LoRa (2019)