

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GEOVANA GOMES MACHADO
MARCEL SHUNJI AOKI
RAFAEL NOGARA

**REDES DE SENSORES SEM FIO PARA CONTROLE DE
IRRIGAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

GEOVANA GOMES MACHADO
MARCEL SHUNJI AOKI
RAFAEL NOGARA

**REDES DE SENSORES SEM FIO PARA CONTROLE DE
IRRIGAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Ohara Kerusauskas
Rayel

CURITIBA
2019

Geovana Gomes Machado
Marcel Shunji Aoki
Rafael Nogara

Redes de Sensores sem Fio para Controle de Irrigação

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 28 de fevereiro de 2019.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Ohara Keraususkas Rayel, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Ohara Keraususkas Rayel, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme Luiz Moritz, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme de Santi Perón, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

A Equipe agradece a universidade, professores, colegas de graduação e todos os envolvidos que beneficiaram essa trajetória. Aos professores em especial, por todos os ensinamentos transmitidos sem os quais este trabalho não seria possível. Aos colegas, agradecemos pelo companheirismo por todos esses anos, amizades que serão levadas para toda vida.

Ao professor Dr. Ohara Kerusauskas Rayel pela oportunidade e apoio durante todo o processo de construção deste trabalho.

RESUMO

GOMES MACHADO, Geovana; NOGARA, Rafael; SHUNJI AOKI, Marcel. REDES DE SENSORES SEM FIO PARA CONTROLE DE IRRIGAÇÃO. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso – curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O crescimento da população mundial gera a necessidade de expansão da produção agrícola, isso causa um aumento no consumo e no desperdício de água no setor, devido a execução ineficiente da irrigação. Em grande parte das áreas rurais o agricultor não possui qualquer informação acerca da condição do solo em toda a sua extensão, prejudicando a tomada de decisão no momento da irrigação. Uma rede de sensores sem fio para monitoramento do solo torna-se um recurso importante para a agricultura de precisão, as informações coletadas reduzem o desperdício de água e aumentam a eficiência da produção. Este trabalho teve por objetivo desenvolver um protótipo de baixo custo de um sistema de sensoriamento remoto conectado a uma estação terrestre por meio de comunicação sem fio para controle de irrigação. Ele prevê a implementação de uma rede IPv6 de baixo consumo de energia operando na frequência de 915 MHz, com base no sistema operacional Contiki, proporcionando a visualização desses dados por meio de uma interface *web*, mediante o sistema *Node-RED*. Realizou-se testes relevantes com o sistema de modo a verificar o desempenho da comunicação.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Rede de Sensores sem Fio. IPv6. 915 MHz. Contiki.

ABSTRACT

GOMES MACHADO, Geovana; NOGARA, Rafael; SHUNJI AOKI, Marcel. WIRELESS SENSOR NETWORK FOR IRRIGATION CONTROL. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso – curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

The world population growth creates the necessity to expand the agricultural production. This causes an increase in water consumption and wastage in the farming sector, due to inefficient execution of the irrigation. In great part of the rural areas the agriculturist do not have any information about the ground condition of his crops, undermining the decision making during irrigation. A Wireless sensor network for ground humidity monitoring turns out to be an important resource to the precision agriculture. The information gathered helps reducing the water wastage, increasing the production efficiency. This final paper has the objective of developing a low cost remote sensing system prototype, connected to a base station wirelessly for the irrigation control. It foresees the implementation of an low energy consumption IPv6 network operating at 915 MHz frequency, based on the Contiki operating system, providing the visualization of this data via a web interface, using Node-RED system. Relevant tests were performed on the system to check the communication reliance and autonomy.

Keywords: Precision Agriculture. Wireless Sensor Network. IPv6. 915 MHz. Contiki.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Dados da Agência Nacional de Águas (ANA) em relatório de 2012	13
Figura 2	–	Conectividade entre o usuário e os dispositivos IoT	14
Figura 3	–	Modelo OSI, exemplo de pilha Wi-Fi e de pilha 6LoWPAN	21
Figura 4	–	Representação da utilização da pilha no modelo OSI a ser utilizado no projeto	22
Figura 5	–	CC1350 LaunchPad da Texas Instruments e sensores a serem acoplados para formar o nó	29
Figura 6	–	Diagrama funcional do CC1350	31
Figura 7	–	YL-69 e MCU YL-39 para umidade do solo	32
Figura 8	–	Placa lógica YL-39 do sensor de umidade do solo	32
Figura 9	–	RaspBerry Pi 3	33
Figura 10	–	Solução inteligente Advantech baseado em IoT para agricultura	35
Figura 11	–	Wiseconn - DropControl	36
Figura 12	–	Sistema geral de uma RSSF	36
Figura 13	–	Dados gerais monitorados pelo <i>Node-RED</i>	38
Figura 14	–	Dados do nó monitorados pelo <i>Node-RED</i>	39
Figura 15	–	Mini bomba submersa 5 V	40
Figura 16	–	Módulo relé 5 V um canal	40
Figura 17	–	Caixa de passagem externa 170x145x90 mm Steck	41
Figura 18	–	Esquemático em blocos do nó sensor	41
Figura 19	–	Esquemático em blocos do sistema de irrigação	42
Figura 20	–	Protótipo do sistema de irrigação	45
Figura 21	–	Protótipo de sensoriamento	45
Figura 22	–	Protótipo da rede de sensores sem fio composta por 4 nós e um roteador de borda + Slip Radio	46
Figura 23	–	Nós conectados ao Roteador de borda	46
Figura 24	–	Fluxo montado no <i>Node-RED</i>	48
Figura 25	–	Banco de Dados SQL	49
Figura 26	–	Tabela criada no banco de dados	49
Figura 27	–	Teste de alcance máximo 1 (140 m)	51
Figura 28	–	Teste de alcance máximo com linha de visada (270 m)	52
Figura 29	–	Medição nó 2	53
Figura 30	–	Medição nó 3	54
Figura 31	–	Medição nó 4	54
Figura 32	–	Medição nó 1	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Comparação entre Zigbee, LoRa e 802.15.4g	23
Tabela 2	–	Tabela do consumo diário do LaunchPad	30
Tabela 3	–	Comparação consumo RaspBerry Pi e um notebook convencional	33
Tabela 4	–	Tabela de custos do projeto	47
Tabela 5	–	Tabela de desvio padrão e coeficiente de variação	55

LISTA DE SIGLAS

AP	Agricultura de Precisão
IPv6	Protocolo de Internet Versão 6, do inglês, <i>Internet Protocol Version 6</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês, <i>Internet of Things</i>
RSSFs	Redes de Sensores sem Fio
OSI	Sistema de Interconexão Aberta, do inglês, <i>Open System Interconnect</i>
6LoWPAN	IPv6 em Redes de Área Pessoal sem fio de Baixa Potência, do inglês, <i>IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks</i>
MAC	Controle de Acesso ao Meio, do inglês, <i>Media Access Control</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, do inglês, <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
WPANs	Redes de Área Pessoal, do inglês, <i>Wireless Personal Area Networks</i>
SMUN	Redes de Utilitários de Medição Inteligente, do inglês, <i>Smart Metering Utility Networks</i>
IETF	Força Tarefa da Engenharia da Internet, do inglês, <i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	Endereço de Protocolo da Internet, do inglês, <i>Internet Protocol Address</i>
SLAAC	Endereço de Autoconfiguração sem Estado, do inglês, <i>Stateless Address Autoconfiguration</i>
LAN	Rede da Área Local, do inglês, <i>Local Area Network</i>
LLNs	Redes com Baixo Consumo de Energia, do inglês, <i>Low Power Lossy Networks</i>
RAM	Memória de Acesso Aleatório, do inglês, <i>Random Access Memory</i>
MQTT	Transporte por Telemetria do Serviço de Enfileiramento de Mensagens, do inglês, <i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
TCP/IP	Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet, do inglês, <i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
QoS	Qualidade do Serviço, do inglês, <i>Quality of Service</i>
CoAP	Protocolo de Aplicação Restrita, do inglês, <i>Constrained Application Protocol</i>
REST	Transferência de Estado Representacional, do inglês, <i>Representational State Transfer</i>
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto, do inglês, <i>Hypertext Transfer Protocol</i>
UDP	Protocolo de Datagrama do Usuário, do inglês, <i>User Datagram Protocol</i>
TCP	Protocolo de Controle de Transmissão, do inglês, <i>Transmission Control Protocol</i>
MQTT-SN	Transporte por Telemetria do Serviço de Enfileiramento de Mensagens para Rede de Sensores, do inglês, <i>Message Queuing Telemetry Transport for Sensor Networks</i>
OS	Sistema Operacional, do inglês, <i>Operating System</i>
BLE	Bluetooth de Baixa Energia, do inglês, <i>Bluetooth Low Energy</i>

SBC	Computador de Placa Única, do inglês, <i>Single Board Computer</i>
LBT	Ouçã Antes de Comunicar, do inglês, <i>Listen Before Talk</i>
CCA	Assistente para Limpeza de Canal, do inglês, <i>Clear Channel Assist</i>
RSMB	Pequeno Servidor para Mensagens, do inglês, <i>Really Small Message Broker</i>
SQL	Linguagem de Consulta Estruturada, do inglês, <i>Structured Query Language</i>
6LBR	Roteador de Borda 6LoWPAN, do inglês, <i>6LowPAN Border Router</i>
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês, <i>Integrated Development Environment</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global, do inglês, <i>Global Positioning System</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	12
1.1.1 Delimitação do Tema	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4 JUSTIFICATIVA	16
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.5.1 Métodos de Obtenção de Informações	16
1.5.2 Descrição Detalhada das Atividades a Serem Executadas	17
1.5.3 Método de Análise das Informações	17
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO	18
2.2 AGRICULTURA DE PRECISÃO	19
2.3 FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA	20
2.3.1 Modelo OSI Simplificado	20
2.3.2 IEEE 802.15.4g	21
2.3.3 IPv6	23
2.3.4 6LoWPAN	25
2.3.5 Camada de Aplicação: MQTT e CoAP	26
2.3.6 Contiki	29
2.3.7 CC1350 LaunchPad	29
2.3.8 Sensores e Placas Lógicas	30
2.3.9 Raspberry Pi	32
3 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO	34
3.1 ESTUDO DE MERCADO	34
3.1.1 Solução Advantech	34
3.1.2 DropControl WiseConn	35
3.2 REQUISITOS DO PROJETO	35
3.2.1 Nós Sensores	36
3.2.2 Rede de Comunicação	37
3.2.3 Interface Gráfica com o Usuário	38
3.2.4 Protótipo	38
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	43
4.1 A SEQUÊNCIA DE MONTAGEM	43
4.1.1 Instalação e Configuração do Roteador e Nós	43
4.2 MONTAGEM DO PROTÓTIPO	44
4.3 CUSTOS	47
4.4 INTERFACE DO USUÁRIO	48

4.4.1 Banco de Dados	48
4.5 RESULTADOS	49
4.5.1 Testes de Consumo	49
4.5.2 Testes de Alcance	50
4.5.3 Testes de Desempenho do Sistema	52
5 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

1.1.1 Delimitação do Tema

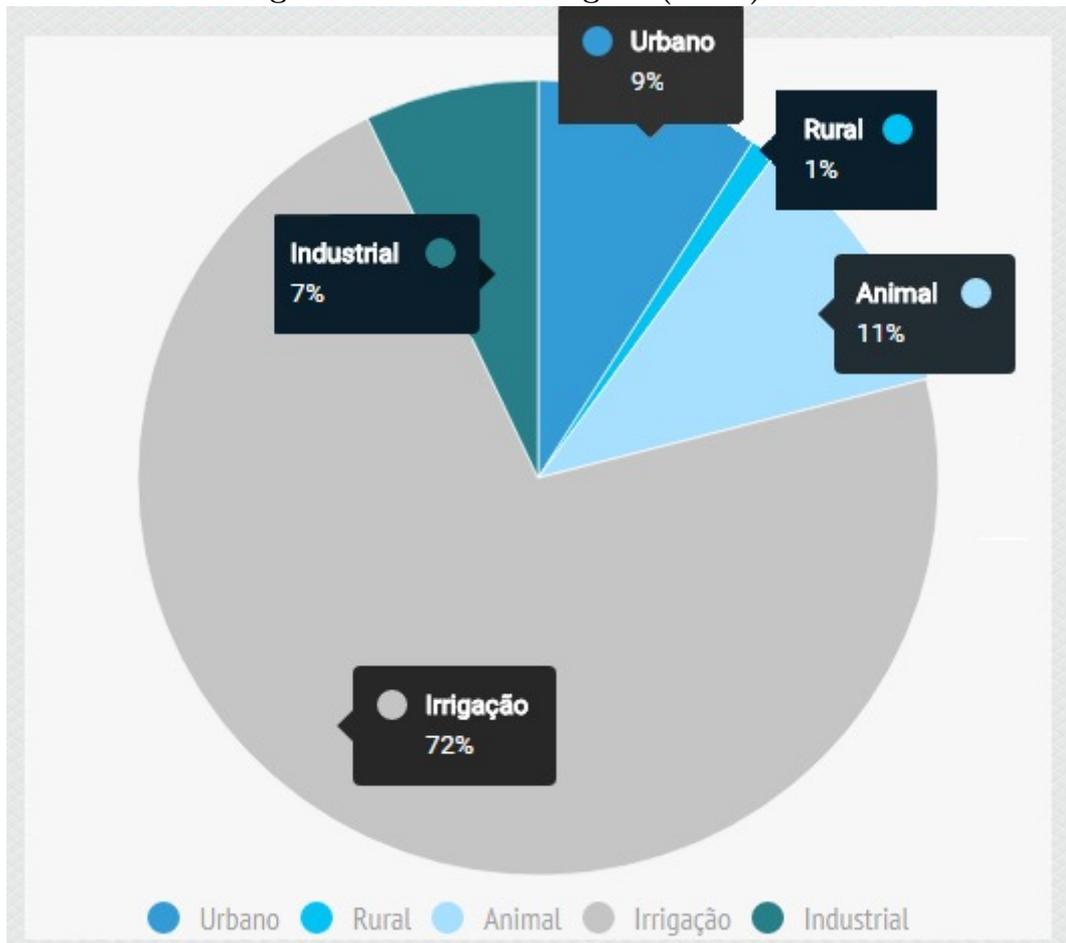
A água possui grande importância no desenvolvimento de diferentes atividades econômicas, sendo o setor agrícola um dos maiores consumidores deste recurso. A nível mundial, a agricultura é responsável por consumir aproximadamente 70% da água extraída de aquíferos, lagos e córregos (FAO, 2011). Proporcionalmente ao elevado consumo de água na agricultura ocorre também o desperdício, de modo que irrigações mal-executadas e falta de controle do agricultor na quantidade de água utilizada para este fim estão entre as principais causas de desperdício (BATISTA, 2012).

Antigamente a água era vista como um recurso inesgotável, não havendo a devida preocupação dos países com o uso consciente deste insumo. Nos dias atuais, a escassez de água é uma realidade no mundo, dezenas de países já enfrentam esse problema. A falta de água ocorre pelo fato das reservas serem finitas e estarem diminuindo, na contramão da demanda, que tem aumentado principalmente devido ao crescimento populacional, que acarreta em maior necessidade por alimentos (FAO, 2011).

O desperdício de água no Brasil é elevado, sendo a escassez de água mais grave na região Nordeste, que é altamente dependente do desenvolvimento agrícola (PAZ et al., 2000). Na Figura 1 é apresentado um gráfico no qual é possível observar o consumo de água no Brasil, conforme dados da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo a maior parte da água disponível utilizada para a irrigação.

Desta forma, torna-se evidente a necessidade de soluções para reduzir o desperdício, aumentar a eficiência na utilização de recursos hídricos, e auxiliar a tomada de decisão do agricultor na atividade de irrigação. Com o grande desenvolvimento tecnológico na área de comunicações, a agricultura de precisão (AP) vem ganhando grande destaque, a qual utiliza-se de tecnologias desenvolvidas para IoT (Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things*), para coleta de informações consideravelmente precisas do sistema de produção agrícola em tempo real, com maior eficiência energética em relação às tecnologias de comunicação sem fio tradicionais. A Figura 2 exemplifica três situações de modelos de conectividade, demonstrando como o uso de IoT facilita o acesso às informações por parte dos seus usuários. Na primeira situação pode-se verificar uma rede autônoma na

Figura 1 – Dados da Agência Nacional de Águas (ANA) em relatório de 2012



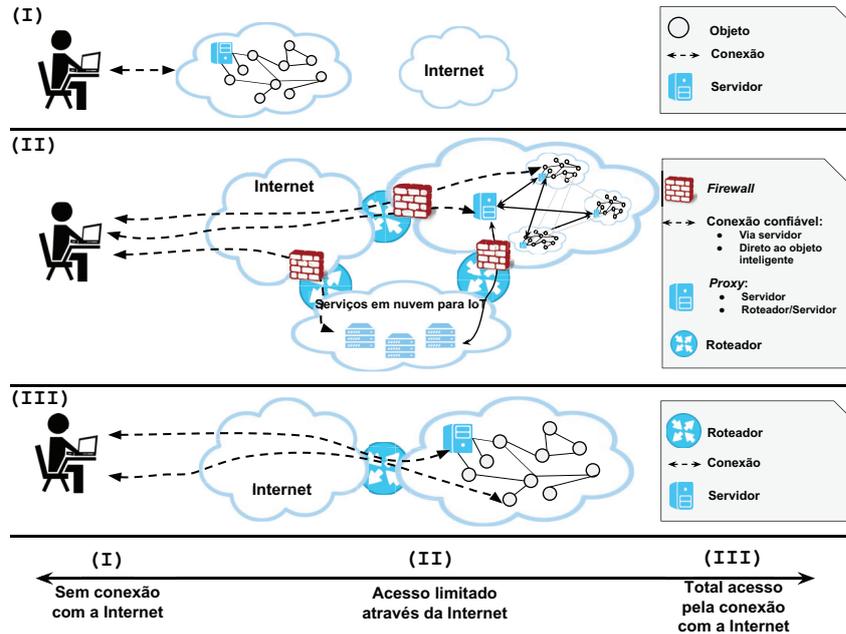
Fonte: (EBC, 2013)

qual os objetos não possuem conexão com a internet, a segunda apresenta uma rede de objetos limitada, pois o acesso aos dispositivos é restrito, e na última situação uma IoT autêntica na qual os objetos estão conectados à internet.

Com a IoT, o campo consegue gerenciar a si mesmo. Muitos avanços podem ser vistos como colheitadeiras inteligentes que se ajustam para o melhor trajeto, estações de irrigação que interagem com sensores meteorológicos, e sensores que medem características do solo a fim de verificar a qualidade do mesmo, oferecendo informação ao agricultor quando há falta de um nutriente específico (SENAR, 2016).

As pesquisas na área de irrigação buscam o desenvolvimento de sistemas automatizados para um melhor manejo dos recursos hídricos (PAZ et al., 2000). Assim, este projeto busca verificar conectividade de redes IPv6 (Protocolo de Internet Versão 6, do inglês, *Internet Protocol Version 6*) sem fio em longas distâncias em frequência 915 MHz voltado para o uso em agricultura de precisão. Dados de interesse, como por exemplo

Figura 2 – Conectividade entre o usuário e os dispositivos IoT



Fonte: (BRUNO et al., 2016)

a umidade do solo, serão angariados por sensores em campo.

Além disto, a implementação de redes IPv6 de baixo consumo na frequência de 915 MHz ainda é pouco explorada, o que motiva avaliação de parâmetros reais de desempenho em um cenário rural, visando validar fatores como, tempo de vida de um nó sensor, alcance da comunicação, robustez da rede e taxa de comunicação.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O crescimento da população mundial gera necessidade de expansão da produção agrícola causando o aumento do consumo de água neste setor e, conseqüentemente, aumento do desperdício deste recurso, o que está intrinsecamente ligado às irrigações mal-executadas e não eficientes (BATISTA, 2012). Em grande parte das áreas rurais o agricultor não possui informações em tempo real da condição do solo em toda sua extensão, prejudicando assim a tomada de decisão acerca da irrigação, fazendo com que recursos hídricos sejam utilizados sem a real necessidade. Portanto, a irrigação deve ser realizada adequadamente, utilizando-se parâmetros que possam auxiliar a decisão para determinar o momento e o local de irrigar (CALBO; SILVA, 2005).

Assim, torna-se interessante utilizar tecnologias para angariação de informações

atualizadas do solo para auxiliar o manejo da água na irrigação por parte dos agricultores. Essas informações precisam ter considerável precisão e devem ser coletadas periodicamente, portanto, para a implantação de sensores no solo conectados em redes sem fio, surge a necessidade do estudo da viabilidade de utilização destes recursos tecnológicos, resolução de problemas oriundos do desempenho de comunicações a longas distâncias e também verificação da confiabilidade das informações coletadas.

Com o desenvolvimento de uma rede de sensores para monitoramento do solo de áreas extensas a partir de uma eficiente comunicação sem fio com baixo consumo de energia, conquista-se um importante recurso para a agricultura de precisão, pois as informações coletadas podem ser realimentadas para o sistema de irrigação, o que poderá reduzir consideravelmente o desperdício de água, aumentando a eficiência dessa atividade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver o protótipo de um sistema de sensoriamento remoto conectado a uma estação terrestre por meio de comunicação sem fio para controle de irrigação.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir os componentes que serão utilizados para montagem do protótipo;
- Desenvolver o sistema de medição e monitoramento composto por sensores, microcontroladores e estação terrestre;
- Realizar testes para verificar o funcionamento de interação entre nós (sensor acoplado ao microcontrolador) e a unidade central de comunicação. Analisar o acesso e controle das informações via internet;
- Verificar o desempenho de um protocolo de comunicação que empregue conectividade IPv6 sobre a frequência de 915 MHz visando atingir longas distâncias na comunicação;
- Avaliar o funcionamento do protótipo em campo, confiabilidade de informações e também desempenho da rede de sensores e comunicação sem fio em áreas extensas;
- Verificar a viabilidade de sistemas IoT em ambientes agrícolas.

1.4 JUSTIFICATIVA

Más práticas na agricultura como excesso de fertilização que levam à degradação do solo são um grande problema na agricultura convencional, além das condições climáticas que também podem levar a uma menor eficiência na produção.

O aumento da demanda por produção de alimentos resulta em um incremento na pressão econômica em investidores que utilizam técnicas agressivas de agricultura, que acabam por causar danos ao solo, ou desperdício de recursos naturais (KRISTOFFER et al., 2016).

Um processo necessário na agricultura é a irrigação. Na irrigação tradicional a água é fornecida periodicamente ao solo. Fazendeiros irrigam o solo por senso comum, sem cálculos precisos, levando ao desperdício de água e irrigação não igualitária do terreno cultivado (YOUSEF; BASEL, 2017).

Redes de sensores sem fio fornecem monitoramento, aquisição e armazenamento de vários parâmetros medidos. O dado armazenado pode ser aplicado na formulação de estratégias de controle e otimização da produção agrícola (KRISTOFFER et al., 2016).

Testes mostram que em comparação com irrigação periódica, a irrigação automática, que utiliza redes de sensores de fio, tem uma economia considerável, dependendo da cultura (IBRAHIM et al., 2015).

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O projeto foi composto de três etapas: planejamento, execução e análise de resultados.

1.5.1 Métodos de Obtenção de Informações

Para o desenvolvimento do trabalho foram coletadas informações técnicas de possíveis componentes à serem utilizados no protótipo e selecionados os pertinentes ao projeto, levando em conta os requisitos necessários para atender e suportar os testes a serem realizados, bem como o preço e disponibilidade de aquisição. Nesta etapa a equipe se familiarizou com a plataforma de desenvolvimento escolhida, com o microcontrolador, os sensores, o protocolo de comunicação e um eventual sistema operacional embarcado selecionado.

1.5.2 Descrição Detalhada das Atividades a Serem Executadas

Em posse dos componentes necessários para a montagem do protótipo, bem como o conhecimento sobre o funcionamento do sistema a ser montado, foi realizada a configuração inicial do microcontrolador, dos sensores e da estação terrestre. Após ajustes nas configurações dos equipamentos, testes em ambientes controlados foram realizados, com intuito de verificar o funcionamento e a interface entre os nós e a estação comunicadora terrestre, bem como seu acesso e controle via *web*.

1.5.3 Método de Análise das Informações

Com o sistema funcionando foram feitos os testes de parâmetros importantes para comprovar a sua eficiência, como alcance de comunicação e testes de acionamento controlados, com a devida análise de resultados de acordo com os dados medidos pelos sensores.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 - Introdução com apresentação e delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos principais, justificativa e metodologia.

Capítulo 2 - Fundamentação teórica, com ampla revisão bibliográfica a respeito de agricultura de precisão, IPv6 sobre 915 MHz, sensores e um eventual sistema operacional embarcado.

Capítulo 3 - Especificações do projeto e requisitos necessários para cumprir as especificações.

Capítulo 4 - Desenvolvimento do projeto, com detalhes sobre o *hardware*, *firmware* e *software* utilizados, além da apresentação dos testes realizados e dos resultados obtidos.

Capítulo 5 - Considerações finais, além de discussão dos resultados obtidos pelo projeto e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO

O avanço da tecnologia nas áreas de circuitos integrados, comunicação sem fio e sensoriamento, proporcionou o desenvolvimento e aprimoramento de redes de sensores sem fio (RSSFs). Um tipo de tecnologia que tem sua aplicação destinada para vários fundamentos, tais como monitoramento, rastreamento, coordenação e processamento em diferentes situações (LOUREIRO et al., 2003, p.179). As RSSFs podem ser compreendidas em três grupos, o primeiro seriam os nós sensores como um sistema individual, o segundo os protocolos de comunicação e por fim as tecnologias aplicadas para aperfeiçoar a eficiência da rede (YICK et al., 2008, p.2293).

As RSSFs são redes compostas por diferentes nós sensores, os quais são pequenos, com recursos limitados de processamento e computação. Esses nós sensores podem detectar, medir e coletar informações do ambiente e assim transmitir os dados detectados ao usuário. Os nós sensores podem ser equipados com um ou mais sensores, um processador, memória, uma fonte de alimentação e um transmissor de dados. Como os nós sensores têm memória limitada e são normalmente implantados em locais de difícil acesso, é implementado um meio de comunicação sem fio para transferir os dados para uma estação base (YICK et al., 2008, p.2292).

Além disso, há obstáculos para a substituição ou mesmo recarga das baterias empregadas como fonte principal de energia dos sensores instalados comumente em regiões distantes (SHELKE et al., 2013, p.668). Sendo assim, devido a esta restrição de consumo de energia, é importante que técnicas em conjunto sejam utilizadas para aumentar a vida útil do sistema, como protocolos de eficiência energética, uma vez que componentes do nó mesmo ociosos consomem energia (ANASTASI et al., 2008, p.538).

Em uma RSSFs o responsável por fazer a interface entre a rede de sensores e o dispositivo que será utilizado pelo usuário é o *gateway*. Este tem a função de armazenar os dados coletados pelos nós sensores em bancos de dados para que os mesmos possam posteriormente ser visualizados na estação base. No geral, os dados trafegam por diversos nós sensores da rede antes de serem enviados ao *gateway*, isso acaba deixando-os susceptíveis a falhas de comunicações, como por exemplo perdas e duplicidade de dados, devido à sobreposição de áreas de monitoramento (COSTA, 2011, p.22).

O componente final é a estação base, ou simplesmente o usuário. Esse é essencial por ser o dispositivo que receberá as informações fornecidas pelo *gateway* e que serão processados futuramente. A estação base pode ser representada por um computador de mesa, um computador portátil ou simplesmente algum outro dispositivo que possa apresentar os resultados ao usuário (UTZIG, 2007, p.50).

O desempenho de uma rede de sensores sem fio precisa ser avaliado a partir de certos requisitos, uma rede ideal deve possuir uma baixa latência, uma otimização para baixo consumo de energia, possibilidade de implementação de redes com elevado número de dispositivos e uma menor complexidade dos nós da rede. Assim, os desafios para estabelecer uma rede de sensores sem fio adequada devem levar em conta uma certa tolerância a falhas, que é a capacidade da rede se manter em funcionamento mesmo em casos de uma falha em algum sensor; escalabilidade, fator que mostra a capacidade da rede em se adaptar a inclusão de novos sensores; custo benefício, impacto da inserção desses sensores no ambiente; meio de transmissão de dados eficaz e consumo de energia eficiente (QUEIROZ, 2016, p.8).

2.2 AGRICULTURA DE PRECISÃO

Nas últimas décadas, avanços no âmbito da produtividade agrícola foram alcançados por meio do desenvolvimento tecnológico, agronômico e da biotecnologia. Neste contexto, a utilização da eletrônica, especificamente, tem contribuído para a expansão da produtividade nas lavouras, tendo como base a agricultura de precisão (SILVA, 2009, p.12). A agricultura de precisão consiste em aplicar princípios e tecnologias espaciais e temporais com a produção agrícola, de forma que a produtividade das culturas e a qualidade ambiental aumentem (RESENDE et al., 2010 apud NOVAK; PIERCE, 1999).

A tecnologia IoT pode ser compreendida como uma rede de dispositivos instrumentados com eletrônica embarcada, sensores, *softwares* e conectividade de rede que permitem que esses aparelhos colem e troquem dados entre si (OJHA et al., 2015, p.81). Muitos pesquisadores e desenvolvedores trabalham prevendo vários tipos de cenários possíveis para Internet das Coisas, criando testes e protótipos de novas funções analíticas, de modelagem e preditivas. Dentre estes cenários, a agricultura de precisão é uma das áreas que mais atraem pesquisas em Internet das Coisas (POPOVIC et al., 2017, p.256).

Com a necessidade cada vez maior de obtenção de informação da produção

agrícola de forma contínua, torna-se atrativa a aplicação de redes de sensores sem fio para monitoração constante de variáveis físicas de uma forma autônoma, possibilitando a coleta e processamento de informações sem interferência no ambiente monitorado, a fim de acompanhar mudanças climáticas, científicas e ecológicas (PANTAZIS et al., 2013).

Segundo Paz et al. (2000, p.466), as melhores práticas de irrigação são as que buscam o uso eficiente da água, evitando a salinização e a erosão dos solos, com programação da irrigação com base no uso consuntivo das culturas. Portanto, o manejo correto dos recursos hídricos na atividade de irrigação possibilita o desenvolvimento adequado das plantas, evitando a lixiviação de nutrientes, causado pelo uso demasiado de água (CALBO; SILVA, 2005, p.5). Nesse contexto, compreende-se a importância da agricultura de precisão, sendo as redes de sensores sem fio aliadas para aumentar a eficiência, produtividade e rentabilidade das lavouras.

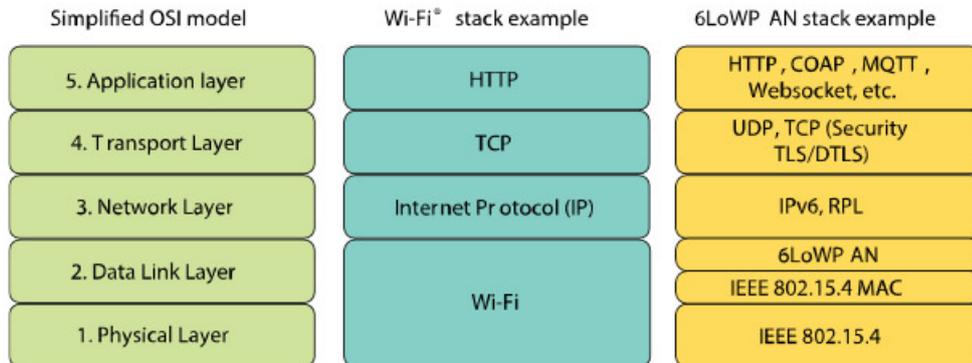
Sendo assim, parâmetros ambientais como a umidade do solo devem ser monitorados e controlados continuamente a fim de fornecer as melhores condições de colheita. As RSSFs permitem aos usuários receber dados relacionados ao crescimento da planta e tomar medidas de gestão apropriadas, como controle remoto da irrigação, por exemplo. Portanto, os agricultores são capazes de melhorar o ambiente do seu produto e como resultado, aumentar a produção e a qualidade das culturas (SRBINOVSKA et al., 2014, p.306).

2.3 FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA

2.3.1 Modelo OSI Simplificado

O modelo mais comum de sistemas de comunicação de dados é o OSI (Sistema de Interconexão Aberta, do inglês, *Open System Interconnect*), que, em seu modelo simples, divide a comunicação em cinco camadas fundamentais. A Figura 3 lista estas camadas juntamente a dois exemplos típicos de pilhas utilizadas em dispositivos IoT. Um deles sendo a pilha do *Wi-Fi*, e a outra um dispositivo baseado no 6LoWPAN (IPv6 em Redes de Área Pessoal sem fio de Baixa Potência, do inglês, *IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks*) (AHMED et al., 2017).

Figura 3 – Modelo OSI, exemplo de pilha Wi-Fi e de pilha 6LoWPAN



Fonte: (AHMED et al., 2017)

A camada física é responsável pela especificação elétrica e física da conexão de dados, o tipo da conexão física, da temporização, da frequência selecionada, entre outros. Ela define a topologia da rede e, também, o modo de transmissão (*simplex*, *half-duplex* ou *full-duplex*) (MORITZ; RAYEL, 2018a).

A camada de rede é responsável pelo roteamento e endereçamento dos nós da rede, escolhendo o melhor caminho para um pacote de dados chegar ao destino, encaminhando os dados recebidos para a camada de transporte, a qual controla e organiza os pacotes recebidos ajudando a manter o fluxo de dados. A camada de enlace define o protocolo de comunicações entre os sistemas diretamente conectados, faz o controle de fluxo e delimita os quadros transmitidos e recebidos. Essa camada detecta e, quando possível, corrige erros cometidos na camada física e nela reside o endereço MAC (Controle de Acesso ao Meio, do inglês, *Media Access Control*), endereço físico do nó (RAYEL; MORITZ, 2018) (REIS, 2015).

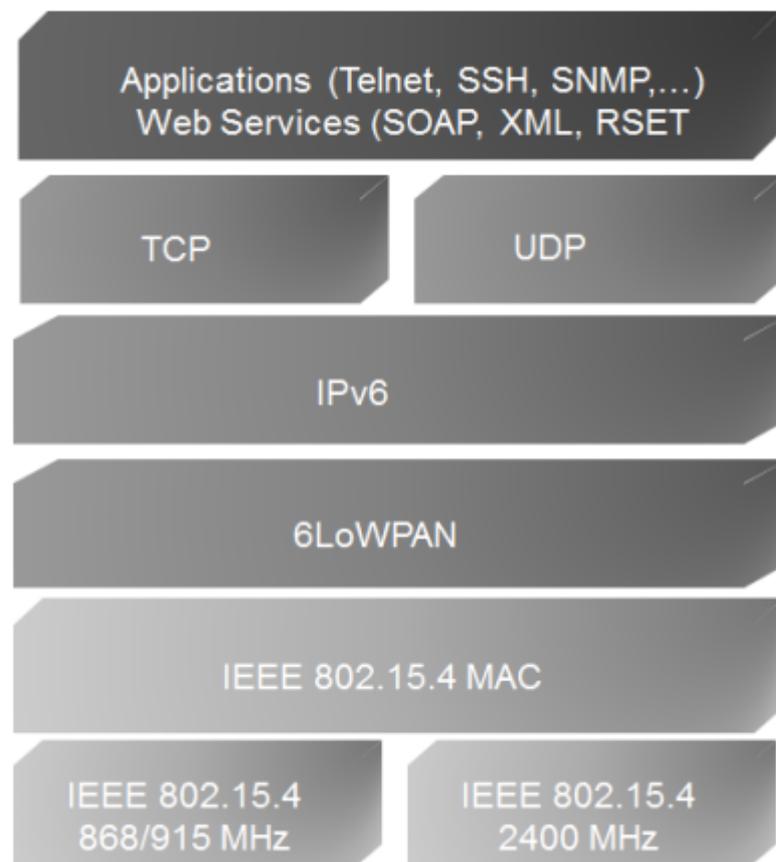
2.3.2 IEEE 802.15.4g

Segundo Frenzel (2013), o IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, do inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) suporta vários grupos que desenvolvem e mantêm padrões de comunicação, por exemplo o 802.11 que padroniza as *wireless* LANs, que engloba o conhecido *Wi-Fi*. O grupo de padrões 802.15 especifica uma variedade de WPANs (Redes de Área Pessoal, do inglês, *Wireless Personal Area Networks*) para diferentes aplicações, por exemplo, o 802.15.1 determina as características do *Bluetooth* (MELO, 2017).

Frenzel (2013) diz que a norma 802.15.4 é a categoria majoritariamente

padronizada para baixa taxa de dados WPANs, desenvolvida para monitoramento e controle de aplicações remotas de baixo consumo. O mesmo autor expõe que a categoria 802.15.4 possui várias subcategorias, como o 802.15.4c para China e 802.15.4g para *Smart Metering Utility Networks*, Redes de Utilitários de Medição Inteligente (SMUN). Todas essas versões utilizam a mesma base de tecnologia de rádio e protocolo, definidos no IEEE 802.15.4a/b. Este padrão configura a camada física e camada MAC do modelo OSI, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Representação da utilização da pilha no modelo OSI a ser utilizado no projeto



Fonte: (TABISH et al., 2013)

A função do 802.15.4g é de criar uma emenda ao padrão PHY e MAC do IEEE 802.15.4, disponibilizando um processo de controle de aplicações em larga escala, dando suporte à redes geograficamente diversas com infraestrutura mínima e milhares de pontos fixos conectados (IEEE 802 LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE, 2011). Uma vantagem do protocolo de comunicação 802.15.4g é poder aliá-lo às frequências chamadas Sub-GHz, por exemplo a frequência de 915 MHz, uma frequência de comunicação livre e com tecnologia consolidada devido a sua grande utilização em sistemas supervisórios.

Algumas tecnologias proprietárias utilizam essas camadas descritas pelo IEEE 802.15.4 como base, como o ZigBee, *Wireless* HART e MiWi. Cada uma estende o desenvolvimento das camadas superiores, adicionando definições para camadas de aplicação, transporte e/ou rede. (MELO, 2017).

A Tabela 1 mostra as principais diferenças entre três protocolos utilizados em IoT com dados da RF Wireless World (2012) e iMinds – Ghent University (2016). A tabela também dispõe características importantes, como a taxa de transmissão, frequência trabalhada entre outros que auxiliaram na decisão do tipo de protocolo de comunicação utilizado no protótipo.

Segundo Wi-Sun (2017) o 802.15.4g tem algumas vantagens sobre os protocolos *ZigBee* e *LoRa* que justificaram a escolha do protocolo sobre os demais. A possibilidade de formação de redes *mesh* aliado ao longo alcance proporcionado tornam este uma ótima solução para grandes redes de sensores sem fio. O IEEE 802.15.4g elimina alguns dos pontos negativos dos protocolos citados e traz um benefício importante para tornar o produto final flexível e de baixo custo: É de código aberto, não sendo de natureza proprietária como o *ZigBee*, com padrões definidos pela *ZigBee Alliance* e o *LoRa*, patentado e produzido pela *Semtech*. Dessa forma não é necessária a utilização de *hardware* ou *software* específico, que pode trazer custos adicionais e até tornar algumas aplicações difíceis de serem executadas.

Tabela 1 – Comparação entre Zigbee, LoRa e 802.15.4g

Especificações	ZigBee	LoRa	802.15.4g
Bandas de Frequência	868 MHz; 915 MHz; 2450 MHz	863 a 870 MHz; 902 a 928 MHz; 779 a 787 MHz	868 MHz; 915 MHz; 2450 MHz
Distância de Cobertura	10 a 100 m	2 - 5 km (Área Urbana); 15 km (Área Rural)	10 km
Consumo de Energia	Baixo	Menor do que ZigBee	Maior do que LoRa
Taxa de Transmissão	20 kbps; 40 kbps; 250 kbps	0,3 a 22 kbps e 100 kbps (usando GFSK)	50 a 400 kbps
Aplicações	LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Network)	WPAN	WPAN e SMUN
Protocolo	RF, PHY e MAC e camadas de aplicação e de segurança e rede	RF, PHY e MAC e camadas de aplicação	PHY, MAC
Arquitetura de Rede	Coordenadores; Roteadores e Dispositivos	LoRa Gateway; Servidor e Dispositivos	Roteador e Dispositivos

Fonte: (ATEAM, 2015)

2.3.3 IPv6

IPv6 é o protocolo de rede padrão que dita como se comunicar digitalmente com os elementos que estão interconectados pela internet. Esse protocolo é regulado pela IETF

(Força Tarefa da Engenharia da Internet, do inglês, *Internet Engineering Task Force*), organização que mantém todos os padrões da internet e garante a interoperabilidade de *softwares* e *hardwares* de diferentes fornecedores, possibilitando a comunicação entre *hosts* (COLINA et al., 2016).

Ainda de acordo com Colina et al. (2016), um *host* pode ser um computador, sensor, atuador ou qualquer dispositivo que receba e/ou envie pacotes de dados por uma rede, sendo ele a fonte ou o destino desses pacotes. Já os roteadores são os responsáveis pelo caminho que esses pacotes irão tomar, recebendo o pacote de um *host* ou de outro roteador e encaminhando-o para o próximo roteador até que chegue ao destino final. A internet é composta de vários roteadores interconectados, possibilitando a conexão entre dois *hosts* conectados na internet em locais distintos.

O IPv6 torna possível a conversação entre *hosts* e roteadores que seguem este mesmo padrão, habilitando que um pacote de dados seja corretamente interpretado e enviado para o seu destino final. Ele facilita a integração de dispositivos globalmente, utilizando um endereço único para qualquer item conectado à internet. Esta é uma grande vantagem comparada ao antigo protocolo, IPv4, que não possuía endereços únicos suficientes para englobar a quantidade imensa de novos aparelhos na rede global (COLINA et al., 2016).

No contexto das RSSFs, ser designado um endereço de IP (Endereço de Protocolo da Internet, do inglês, *Internet Protocol Address*) único global facilita a comunicação bidirecional entre *hosts*. Dessa forma, qualquer dispositivo IP, como sensores e atuadores (itens essenciais para o desenvolvimento do IoT), poderá ser acessado remotamente. Isso significa que será viável ter informações de sensores em qualquer lugar do mundo e atuar sobre o ambiente monitorado, utilizando sistemas de automação locais (COLINA et al., 2016).

Outra vantagem desta interação do protocolo que regula a internet, exposto por Colina et al. (2016), é a SLAAC (Endereço de Autoconfiguração sem Estado, do inglês, *Stateless Address Autoconfiguration*) que é um novo mecanismo introduzido que traz o potencial de configuração automática de todos os parâmetros de rede em um aparelho IP usando-se do roteador que dá conectividade à internet ou à rede local. Isso simplifica a configuração de dispositivos de menor capacidade de poder de processamento, como sensores e câmeras. Não é necessário a configuração através de uma interface, apenas ligar e conectar o aparato à LAN (Rede da Área Local, do inglês, *Local Area Network*) e o roteador utilizando-se do SLAAC cuidará da integração à internet e designação do

endereço global único que será utilizado para interagir com esse equipamento.

Dessa forma, a SLAAC pode reduzir a complexidade da infraestrutura necessária para construir uma rede básica, já que o mesmo roteador utilizado para enviar pacotes para fora da LAN também é utilizado para configurar os nós, dispensando o uso de um servidor ou mecanismo a parte para tal finalidade.

Além dessas vantagens, o IPv6 proporciona, por ser um padrão aberto que está altamente difundido, uma implementação fácil e barata, com grande interoperabilidade. A infraestrutura existente pode ser aproveitada, assim como várias ferramentas já desenvolvidas para a tecnologia IPv4.

2.3.4 6LoWPAN

A grande adoção das tecnologias sem fio deu suporte ao aumento do número de dispositivos conectados. Entretanto, o uso dessas tecnologias acarreta em limitações em termos de autonomia da bateria, consumo de energia, alcance de comunicação e aumento no custo. Com a necessidade da diminuição do consumo desses componentes para aplicação em uma rede de sensores sem fio, novas tecnologias e protocolos tiveram de ser desenvolvidos ou adaptados para o novo ambiente comumente chamado de *Low Power Lossy Networks*, LLNs, em português Redes com Baixo Consumo de Energia. É característico desse novo ambiente possuir mais aparelhos conectados à rede que as LANs comuns, possuírem poder de processamento, autonomia de bateria, espaço para código e memória RAM (Memória de Acesso Aleatório, do inglês, *Random Access Memory*) limitados (SHELBY; BORMANN, 2009).

Como visto, há várias vantagens de se integrar o IPv6 em IoT em geral, sendo o 6LoWPAN uma camada de adaptação entre este protocolo e uma LLN, como por exemplo uma rede baseada no padrão IEE 802.15.4 (COLITTI et al., 2011). Segundo Colina et al. (2016), de forma simples o 6LoWPAN tem como função diminuir a complexidade do Protocolo de Internet, removendo funções dispensáveis para dispositivos IoT de modo a dar suporte aos nós remotos com recursos limitados, que são o foco das RSSFs. Redes massivas de dispositivos conectados requerem baixo custo e alta autonomia e também trazem vários limites técnicos:

- Pacotes de pequeno tamanho;
- Baixa taxa de transmissão de dados;

- O local de cada dispositivo pode não ser pré-definido e, às vezes, até de difícil acesso;
- Tendem a não ser confiáveis por vários motivos: conexão via rádio incerto, bateria esgotada, problemas com o aparelho e seu *software*, condições físicas e do ambiente;
- *Sleep-mode*: para conservar energia o nó pode dormir, sendo impossível a comunicação durante esses períodos.

Colina et al. (2016, p.29) diz que alguns dos principais objetivos do 6LoWPAN que visam superar esses desafios são:

- Fragmentação e reconstrução de pacotes: devido a disparidade do tamanho dos pacotes transmitidos via IEEE 802.15.4 (podem ser de até 81 *bytes*) e os trabalhados na camada IPv6 (1280 *bytes*) deve existir uma camada para tratar esses pacotes e montá-los para que sejam compatíveis para ambos;
- Compressão do cabeçalho (*header*): o cabeçalho padrão do IPv6 é de 40 *bytes*. Outras seções de cada pacote são destinadas à algumas camadas superiores, como o UDP (8 *bytes*) e informações necessárias para a fragmentação e reconstrução do pacote. Isso deixa apenas alguns *bytes* para dados propriamente ditos. Logo, é necessário tornar os cabeçalhos mais curtos, evitando assim a fragmentação excessiva de pacotes;
- Autoconfiguração de endereços: especificar métodos para que o SLAAC designe um endereço único para o dispositivo IEEE 802.15.4 de forma automática;
- Protocolo de roteamento *Mesh*: suporte à redes *multi-hop*, que torna cada nó pertencente à rede um potencial roteador, habilitando-o a encaminhar pacotes de outros nós até o destino final. Isso aumenta a flexibilidade, confiabilidade e alcance dos *hosts* pertencentes à rede local.

2.3.5 Camada de Aplicação: MQTT e CoAP

O MQTT (Transporte por Telemetria do Serviço de Enfileiramento de Mensagens, do inglês, *Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de mensagens baseado em inscrição-publicação sobre o protocolo TCP/IP (Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet, do inglês, *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). Foi desenvolvido com conexões a locais remotos, com limitações no tamanho do

código ou na taxa de transmissão. Esse padrão de inscrição-publicação requer um corretor de mensagens, chamado *broker*. Este corretor é responsável por distribuir as mensagens aos clientes interessados/inscritos, baseados nos tópicos da mensagem (COLINA et al., 2016).

De acordo com o livro citado no parágrafo anterior, podem ser definidas opções de QoS (Qualidade de Serviço, do inglês, *Quality of Service*) para a entrega de mensagens.

- QoS 0 – O cliente/*broker* irá enviar a mensagem uma única vez, sem confirmação de recebimento.
- QoS 1 – O cliente/*broker* irá enviar a mensagem pelo menos uma vez, com confirmação de recebimento necessária.
- QoS 2 – O cliente/*broker* irá enviar a mensagem exatamente uma vez, não mais nem menos, utilizando vários *handshakes* (confirmações) para garantir esta QoS.

Algumas das funções do MQTT são:

- Mensagem de se manter ativo, comando para prevenir que o nó se mantenha operante.
- Um *broker* pode detectar a queda de conexão de um *host*, mesmo sem este enviar a mensagem de desconectar e então notificar os outros clientes inscritos nos tópicos ativos do *host* desconectado.
- Manter última mensagem publicada em um tópico para que novos inscritos recebam-na logo que conectam.
- Manter inscrições, de forma que um cliente que se desconectar terá todas as suas inscrições armazenadas no *broker* e recuperadas na reconexão dele.

O CoAP (Protocolo de Aplicação Restrita, do inglês, *Constrained Application Protocol*) é um protocolo de transferência especializado para nós restritos e redes restritas, sendo a implementação oficial de um mecanismo REST (Transferência de Estado Representacional, do inglês, *Representational State Transfer*) para o Contiki. Ele foi projetado para interagir facilmente com HTTP (Protocolo de Transferência de Hipertexto, do inglês, *Hypertext Transfer Protocol*) e atender a requisitos especializados, como suporte a *multicast* (transmissão múltipla), comunicação interativa de pequenos dispositivos e

baixa sobrecarga e complexidade em ambiente restrito. Ele fornece um modelo de pedido e resposta entre os *endpoints* e oferece suporte a descoberta integrada de serviços e recursos (HERRERO, 2018) (SHELBY et al., 2014).

O diferencial do CoAP é o tipo de protocolo de transporte utilizado, no caso o UDP (Protocolo de Datagrama do Usuário, do inglês, *User Datagram Protocol*). As mensagens são transferidas de maneira assíncrona, ou seja, os dados da mensagem são enviados e recebidos por qualquer ordem, uma vez que o número de sequência de cada dado identifica a posição de cada um na mensagem. Isso fornece uma flexibilidade importante, fazendo com que os pacotes CoAP sejam muito menores que os fluxos TCP (Protocolo de Controle de Transmissão, do inglês, *Transmission Control Protocol*) (EGGLY et al., 2018).

Apesar do CoAP ser um protocolo feito especificamente para IoT, o MQTT foi considerado uma solução para a camada de aplicação mais simples de ser implementado e mais flexível. Para fazer a adição de mais nós no sistema seria um processo mais trabalhoso via CoAP que utilizando o MQTT, onde cada um dos nós posta os valores lidos em seu respectivo tópico, e o monitoramento desses valores é feito se inscrevendo em todos os tópicos de medição de valores de sensoriamento terrestre, utilizando as *wildcards*.

O protocolo que será utilizado no projeto é o MQTT-SN (Transporte por Telemetria do Serviço de Enfileiramento de Mensagens para Rede de Sensores, do inglês, *Message Queuing Telemetry Transport for Sensor Networks*), uma forma simples e eficaz para solucionar a camada de aplicação no quesito de recebimento dos pacotes e tornar estas mensagens entendíveis ao usuário. Esse é uma versão do MQTT adaptada às singularidades de um ambiente de comunicação sem fio, também é otimizado para implementação em dispositivos de baixo custo e operados por bateria, com recursos limitados de processamento e armazenamento. A transmissão por rádio sem fio possui, em geral, taxas de falhas mais altas do que as com fio, devido em parte às perturbações por interferência. Esse protocolo tem uma taxa de transmissão menor e, para ser mais resistente a erros de transmissão, seus pacotes têm um comprimento muito curto. O MQTT-SN utiliza também uma conexão UDP para transmitir mensagens mais rápidas e leves do que o TCP. Também possui configurações para manter a última mensagem recebida de qualidade de serviço das mensagens, para aumentar a confiabilidade da entrega, caso o processo requeira. (ROY et al., 2018).

2.3.6 Contiki

Contiki é um sistema operacional que foi desenvolvido para operar em sistemas com baixo consumo de energia e por ser um OS (Sistema Operacional, do inglês, *Operating System*) de código aberto pode ser livremente utilizado em sistemas comerciais ou não comerciais, sendo amplamente utilizado em IoT.

O sistema possui suporte para os protocolos IPv6 e IPv4 e para as adaptações *wireless* 6LoWPAN e MQTT-SN visando conectar *hardwares* de baixa potência, de forma a transmitir mensagens mais leves rapidamente, com um baixo custo e pequeno consumo de energia. Com o sistema operacional é possível construir sistemas *wireless* complexos, onde o desenvolvimento é rápido devido ao fato das aplicações serem escritas na linguagem C padrão (CONTIKIOS.ORG, 2002) (STANFORD-CLARK; TRUONG, 2013).

Foi escolhido o uso do sistema operacional Contiki tendo em vista o suporte aos protocolos de comunicação que serão utilizados e sua compatibilidade com o *hardware* do projeto.

2.3.7 CC1350 LaunchPad

Figura 5 – CC1350 LaunchPad da Texas Instruments e sensores a serem acoplados para formar o nó



Fonte: Autoria própria

A placa de desenvolvimento escolhida, que forma o núcleo de cada nó pertencente à rede de sensores sem fio, é o CC1350 *LaunchPad* da Texas Instruments. A Figura 5

mostra a placa juntamente com o sensor a ser utilizado nos testes.

Um dos principais motivos da escolha foi a informação sobre a capacidade de alcançar longas distâncias (mais de 20 Km, segundo especificações do *datasheet* da Texas Instruments (2016)) por meio da frequência do rádio de 915 MHz, além da sua segunda banda de 2,4 GHz para BLE (Bluetooth de Baixa Energia, do inglês, *Bluetooth Low Energy*), para potencial acesso direto com o *smartphone*. Outra característica primordial conforme o *datasheet* é o baixo consumo provido pelo processador Cortex M0, com uma corrente de *sleep-mode* de 700 nA, proporcionando uma autonomia de vários meses dependendo da bateria escolhida. (TEXAS INSTRUMENTS, 2016, p.15).

De acordo com os dados do *datasheet*, tem-se uma certa estimativa do consumo diário do *LaunchPad* (Tabela 2), mostrando que a placa de desenvolvimento pode ter uma boa autonomia.

Tabela 2 – Tabela do consumo diário do LaunchPad

	Tensão	Corrente	Potência	Tempo/dia	Consumo/dia
Stand-By	1,8 - 3,8 V	0,7 μ A	2,66 μ W	24 h	63,8 μ Wh
Medindo	1,8 - 3,8 V	2,5 mA	9,5 mW	0,6 s	1,52 μ Wh
Transmitindo	1,8 - 3,8 V	13,4 mA	50,92 mW	0,6 s	8,48 μ Wh

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 6 mostra o diagrama de blocos do CC1350 com algumas informações funcionais sobre seus principais componentes.

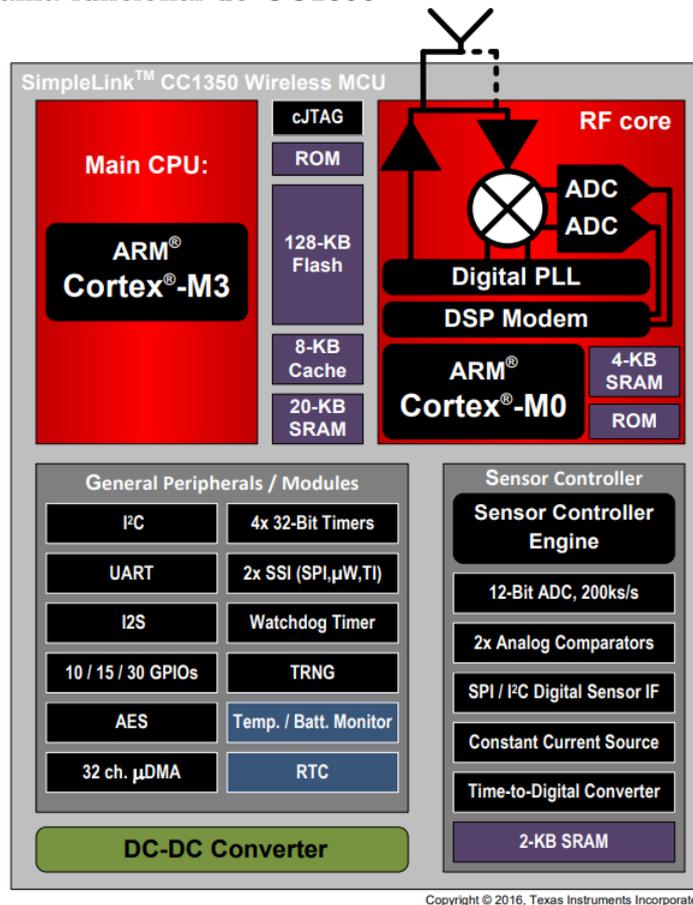
O suporte nativo da placa ao 6LoWPAN, Contiki e, conseqüentemente, ao protocolo MQTT, que facilitaram o desenvolvimento do projeto, o preço e a disponibilidade no site da *Texas Instruments*, foram consideradas características essenciais para a escolha do componente.

Além disso, a utilização de padrões bem estabelecidos pela comunidade, extenso suporte e documentação completa, tornam a tarefa de implementação para o objetivo do trabalho menos complexa, não sendo necessário uma execução de etapas a partir do zero.

2.3.8 Sensores e Placas Lógicas

Foram realizadas pesquisas de sensores que atendessem aos critérios de medição requeridos para o controle de irrigação no contexto de agricultura de precisão, e que dispusessem de valores de saída compatíveis com o CC1350 LaunchPad, bem como a

Figura 6 – Diagrama funcional do CC1350

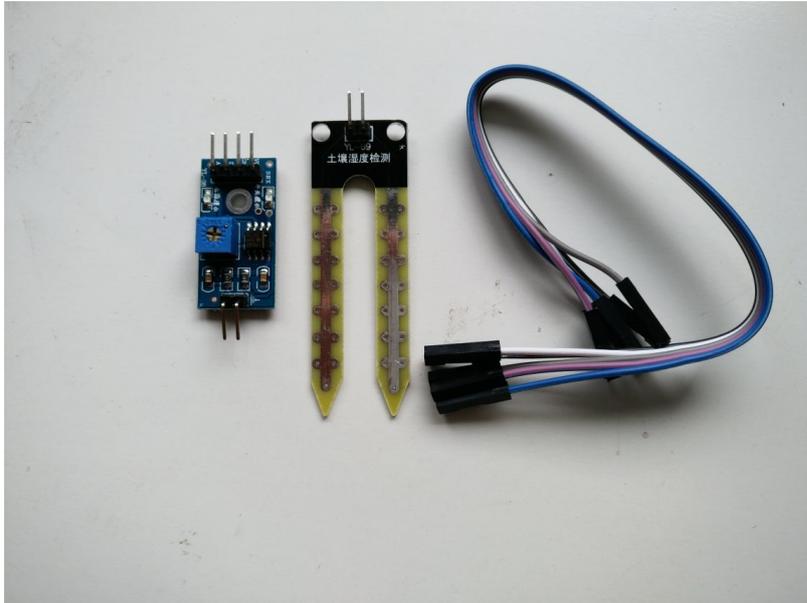


Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2016)

disponibilidade e preço atrativo. O sensor escolhido foi o YL-69 + YL-39 (Figura 7) para medição de umidade do solo.

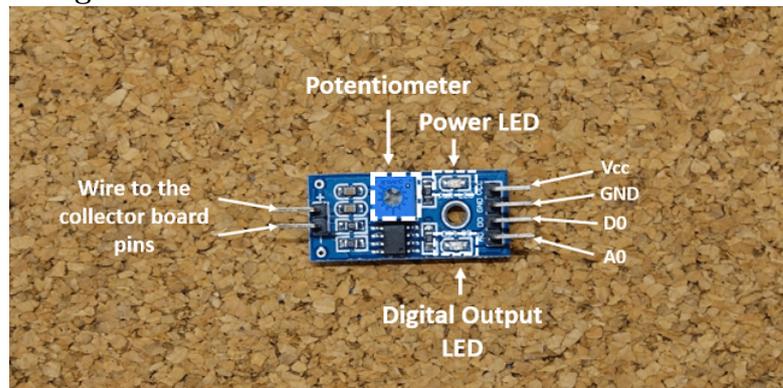
O YL-69 é o componente sensor que, ao aplicar uma tensão entre suas sondas, mede a corrente transmitida pelo solo, sendo possível determinar a resistência. Juntamente com o YL-39, que é a placa lógica do conjunto, possibilita determinar a umidade relativa do solo. Como se pode ver na Figura 8, a placa lógica possui um potenciômetro para ajustar o *threshold* no modo de saída digital (apenas valor um ou zero, dependendo se mais ou menos úmido que o limite estipulado pelo potenciômetro). Segundo o *datasheet* (Research Design Lab (2014, p.2)) o conjunto sensor de umidade trabalha a 3,3 V ou 5 V e 35 mA durante a medição. No modo de medição digital o sinal de saída varia de 0 a 4,2 V, que será convertido a um sinal digital, variando de 0 a 1023 para leitura do sinal e análise do solo. O modo analógico, utiliza um pino de leitura analógica do *LaunchPad*, de modo que a tensão oscila até 3,3 V, sendo esta a tensão de referência.

Figura 7 – YL-69 e MCU YL-39 para umidade do solo



Fonte: Autoria Própria

Figura 8 – Placa lógica YL-39 do sensor de umidade do solo

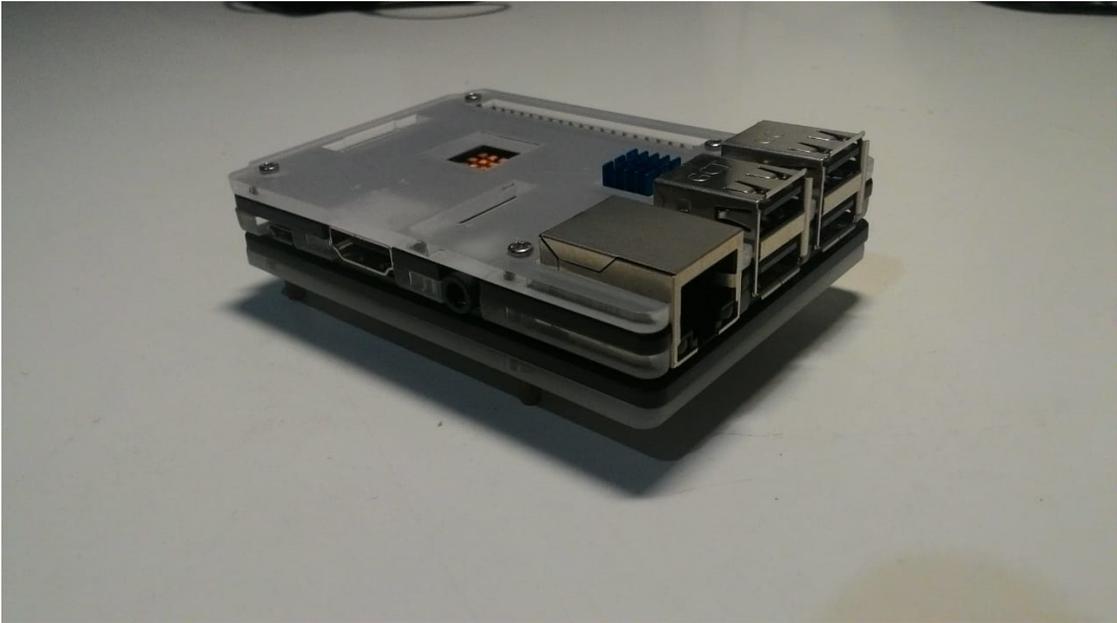


Fonte: (SANTOS, 2013)

2.3.9 Raspberry Pi

O RaspBerry Pi 3B+ (Figura 9) trata-se de um computador compacto a um preço acessível e dispõe de um processador Quad Core 1,4 GHz Broadcom BCM2837B, Cortex-A53 (ARMv8), 1 GB de memória RAM, quatro portas USB, entrada HDMI, entrada para cartão SD para armazenamento de dados, conectividade *wireless* 2,4 GHz e 5 GHz e BLE. A ampla utilização do SBC (Computador de Placa Única, do inglês, *Single Board Computer*) em IoT se deve majoritariamente ao fato de disponibilizar um servidor Linux completo em uma plataforma pequena (RASPBerryPI.ORG, 2017).

A escolha do RaspBerry Pi 3B+ como unidade de comunicação no projeto se deve

Figura 9 – RaspBerry Pi 3

Fonte: Autoria Própria

ao fato de possuir uma grande capacidade de processamento, baixo consumo de energia e fácil manuseio do SBC.

Tabela 3 – Comparação consumo RaspBerry Pi e um notebook convencional

	Tensão	Corrente	Consumo/hora	Consumo/mês
RaspBerry Pi B+	127 V	0,2 A	0,00254 kWh	1,83 kWh
Notebook Convencional	127 V	1,7 A	0,216 kWh	155,5 kWh

Fonte: Autoria Própria

Comparando os dados da Tabela 3 conclui-se que o RaspBerry Pi 3 tem um consumo 84 vezes menor quando comparado a um notebook convencional, tornando-o muito mais atraente para uma RSSF com baixo consumo de energia, como desejado no projeto.

O RaspBerry Pi atuará como um roteador de borda do 6LoWPAN, assim ao receber os dados da estação de processamento (CC1350), ele poderá disponibilizar os dados coletados ao usuário por meio de algum dispositivo que esteja conectado na mesma rede que o SBC.

3 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO

3.1 ESTUDO DE MERCADO

Um estudo da empresa de pesquisa de mercado dedicada à IoT, Berg Insight, mostra que o mercado global de soluções para Agricultura de Precisão deverá alcançar até 2021, 4,2 bilhões de Euros, com um crescimento anual em torno de 13,6%. De acordo com os estudos, 69% dos produtores buscam aumentar a produtividade e 43% têm a expectativa de redução do custo da produção com a aplicação de técnicas e tecnologias de AP. Para esses mesmo produtores foi questionado se pretendem continuar investindo em novas tecnologias e 58% deles responderam que sim. Esses dados mostram a importância na continuação do desenvolvimento da Agricultura de Precisão visto que o mercado para essas soluções possui uma demanda muito alta. Novas e simples tecnologias, podem ser o primeiro passo para qualquer produtor que necessita um aumento de produção com investimento reduzido.(MUNDO GEO, 2018)

A partir de uma pesquisa de mercado da solução proposta neste projeto, é possível encontrar alguns produtos com funcionalidades similares, justificando assim a viabilidade de estudos neste ramo, e a necessidade de criar modelos mais simplificados e eficientes, com baixo custo de desenvolvimento e baixo consumo de energia, para cooperar com sistemas de irrigação. Tendo isso em vista, o estudo de mercado foi feito entre as diversas soluções que implementam as tecnologias utilizadas no projeto, visando um sistema destinado ao controle de irrigação.

3.1.1 Solução Advantech

A Advantech introduziu uma série de soluções inteligentes destinadas para a agricultura de precisão. O seu sistema inclui um computador embarcado com a função de *gateway* (WISE-3310), com nós sensores sem fio (WISE-1020) e um *software* (WISE Cloud) para gerenciar os dados de temperatura e umidade, com controle remoto de irrigação automática (Figura 10). Além disso, também propicia o controle de pragas e otimização do consumo de energia. O sistema é baseado no padrão IEEE 802.15.4.e, compatível com o protocolo 6LoWPAN e que pode conectar-se com até 200 nós sensores (ADVANTECH, 2015).

Figura 10 – Solução inteligente Advantech baseado em IoT para agricultura



Fonte: (ADVANTECH, 2015)

3.1.2 DropControl WiseConn

A WiseConn projetou o DropControl, um sistema de *hardware/software* em rede para gerenciamento de irrigação (Figura 11). Consiste em uma rede sem fio para monitoramento e controle, os nós da rede são conectados a sensores e atuadores para monitorar condições climáticas, umidade do solo e dados históricos de irrigação, além de ativar, desativar e calibrar bombas, válvulas e outros componentes do sistema de irrigação. Os nós se comunicam entre si para enviar as informações para o DropControl Gateway. A solução utiliza protocolo de rede DigiMesh com operação de rede densa, suporte para roteadores em espera e suporta comunicação de até 45 Km com taxa de dados de até 200 Kbps (WISECONN, 2019) (DIGI INTERNATIONAL, INC., 2019).

3.2 REQUISITOS DO PROJETO

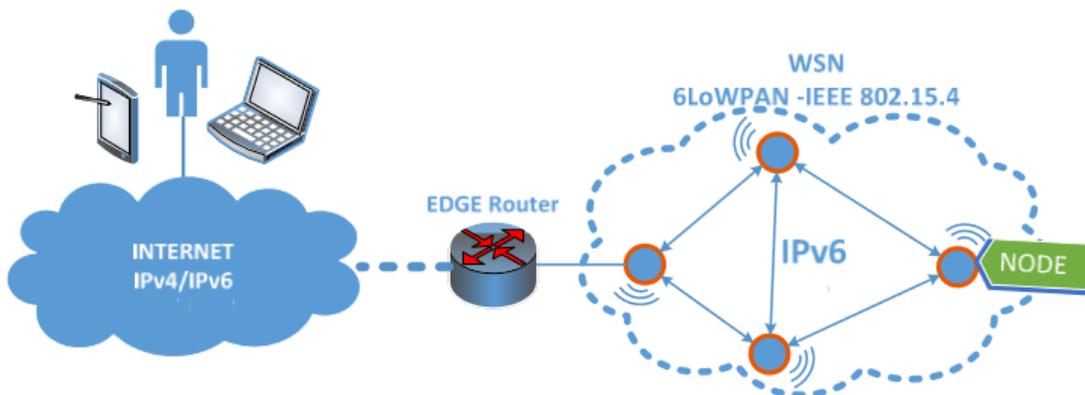
O grande objetivo do projeto é verificar o funcionamento de uma rede de sensores sem fio (Figura 12) utilizando uma frequência de 915 MHz para a comunicação dos sensores, com intuito de controlar a irrigação de forma autônoma. Os dados coletados em campo serão enviados para uma estação de comunicação que irá disponibilizar os valores lidos via MQTT. Estes valores lidos serão exibidos ao usuário por meio de uma interface gráfica e armazenados em um banco de dados local. Com esses dados, o sistema irá acionar a bomba de água quando necessário. Para validar o funcionamento, um protótipo em escala reduzida foi montado.

Figura 11 – Wiseconn - DropControl



Fonte: (WISECONN, 2019)

Figura 12 – Sistema geral de uma RSSF



Fonte: (CARLOS; C., 2017)

3.2.1 Nós Sensores

Neste trabalho utilizou-se protocolos padrão convencionados para IoT como o 6LoWPAN, que é a transmissão IEE 802.15.4 (versão g) com capacidades de formar uma topologia *mesh* e comunicações *end-to-end* IPv6 aos nós sensores. Esses nós podem ser compostos por inúmeros sensores e uma unidade de processamento. Para o projeto foi estipulado que cada nó deverá conter um sensor YL-69 e um microcontrolador CC1350 para medir e transmitir dados referentes a umidade do solo onde serão instalados. Os sensores de umidade serão lidos pelo seu pino analógico, que tem uma precisão de 1 mV (um alcance teórico de 0 até 3300 mV em incrementos de 1 mV, sendo 3,3 V o valor mais seco e 0 V o valor mais úmido).

Esses valores serão lidos e transmitidos para o roteador de borda em intervalos de 10 segundos. Esse intervalo de medição e envio foi escolhido para facilitar os testes e por ser um protótipo em escala. Uma estratégia a ser adotada em próximos estágios do produto seria coletar medições a cada 10 minutos e, caso o valor não mude significativamente, mantém-se o último valor transmitido para diminuir a quantidade de tempo em transmissão do nó. No caso de nenhum valor ter sido transmitidos nos últimos 60 minutos, o valor lido será transmitido. Essas estimativas foram baseados após estudar o balanço entre precisão das medições para atuação e consumo de energia, segundo estudos presentes no artigo de Navarro et al. (2014).

Os valores recebidos no roteador serão registrados no MQTT *broker* (RSMB) em seu respectivo tópico: `sensorX/solo`, sendo `sensorX` o nó que está publicando e `solo` o tipo do sensor que está sendo publicado os valores medidos.

3.2.2 Rede de Comunicação

A transmissão e recepção de dados entre os componentes do sistema será realizada utilizando o protocolo MQTT na camada de aplicação, que foi possível a partir do sistema operacional Contiki instalado em cada nó e programado para enviar publicações regulares do valor de seu sensor para o *broker* presente no Raspberry Pi.

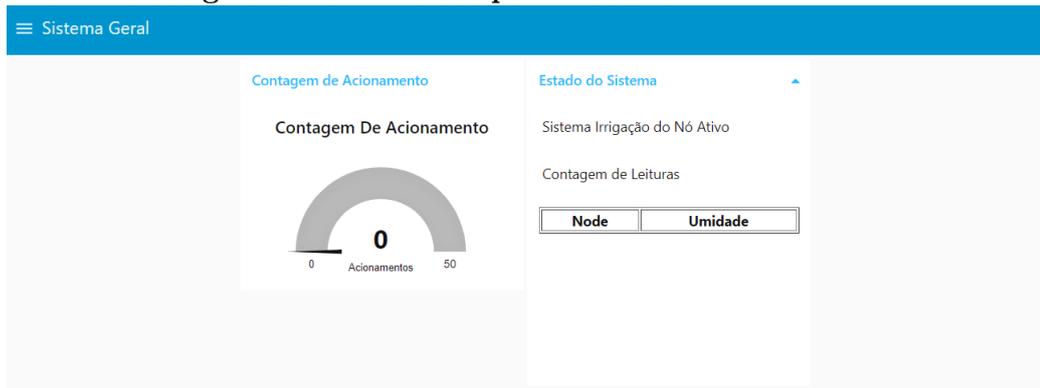
Os valores dos sensores serão lidos e processados pelo Contiki para serem enviados como uma mensagem MQTT para o *broker*. Para esse dado ser transmitido, é convertido em pacotes UDP, que são transmitidos pela antena dedicada a RF Sub-1 GHz, a qual fará o acesso ao meio via MAC implementado na pilha do padrão IEEE 802.15.4g. Os recursos já embutidos no *LaunchPad*, LBT (Ouça Antes de Comunicar, do inglês, *Listen Before Talk*) e CCA (Assistente para Limpeza de Canal, do inglês, *Clear Channel Assist*), são úteis para evitar a colisão dos pacotes que são repassados de nó para nó. No caso do projeto deste trabalho, a camada de aplicação fornecida pelo MQTT dará suporte para implementação do programa em *Node-RED*, que fará a interface gráfica das leituras para o usuário.

A estação de comunicação (Raspberry Pi 3), atua como roteador de borda da rede 6LoWPAN. Os dados são exibidos ao usuário com a ferramenta *Node-RED*, apresentando últimos valores medidos de cada sensor e o gráfico da umidade do solo pelo tempo.

3.2.3 Interface Gráfica com o Usuário

A interface gráfica que deve ser implementada precisa ser simples para que o usuário consiga acessar todos os dados coletados, para isso foi utilizado o *Node-RED*. Com ele é possível se conectar ao RSMB (Pequeno Servidor para Mensagens, do inglês, *Really Small Message Broker*) utilizando o endereço do mesmo. Ao se conectar com o *broker*, o *Node-RED* será responsável por extrair os dados enviados pelos sensores em tempo real, processando as mensagens publicadas em cada tópico distinguindo cada sensor com o respectivo valor a ser demonstrado na interface do usuário, utilizando blocos de programação que exibem os dados em forma de gráficos ou tabelas como mostram as Figuras 13 e 14. A ferramenta também irá utilizar outros blocos pré-programados, permitindo se conectar a um servidor MQTT e armazenar dados em um servidor SQL (Linguagem de Consulta Estruturada, do inglês, *Structured Query Language*) local.

Figura 13 – Dados gerais monitorados pelo *Node-RED*



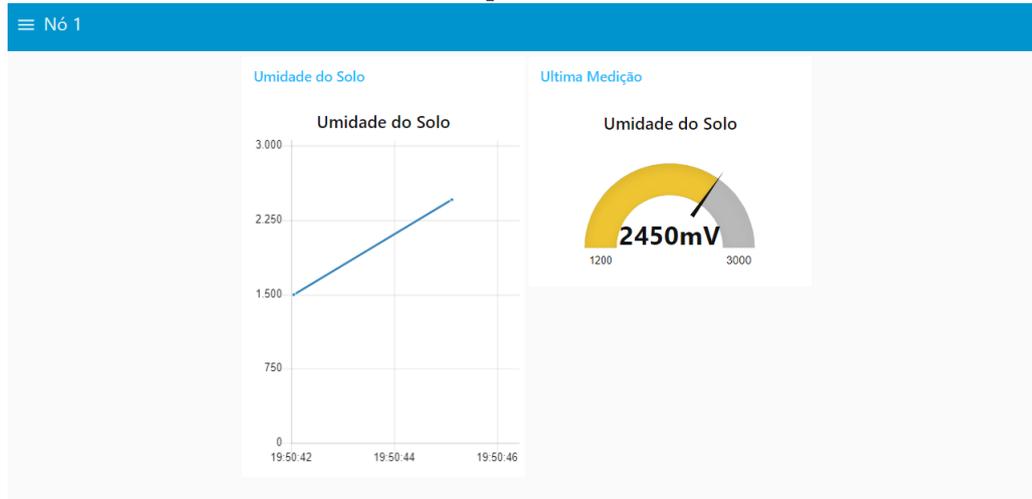
Fonte: Autoria Própria

3.2.4 Protótipo

Para demonstração do funcionamento do projeto, torna-se essencial a montagem de um protótipo do sistema de irrigação e sensoriamento, sendo assim, foi escolhido um modelo simples de irrigação e realizado um protótipo do nó sensor, com o objetivo de simular em escala reduzida o desempenho do sistema.

O protótipo do sistema de irrigação montado é composto por uma mini bomba submersa (Figura 15), a qual trabalha com tensão na faixa de 2,5 a 6 V com um alcance máximo vertical de 40 a 110 cm e potência de 0,4 a 1,5 W. O módulo relé com opto acoplador de um canal (Figura 16) com tensão de operação de 5 V, conectado ao GPIO, tem a função de ativar ou desativar a bomba utilizando uma fonte de 5 V externa,

Figura 14 – Dados do nó monitorados pelo *Node-RED*



Fonte: Autoria Própria

chaveando-a a partir do sinal enviado pelo programa escrito em linguagem C. Desta forma, será possível enviar um sinal à bomba de forma automática quando for necessário utilizar o sistema de maneira remota. A bomba fica submersa em um reservatório com água e os cabos de alimentação são isolados de forma a impedir um curto-circuito.

O programa em C que roda no Raspberry Pi se inscreve nos tópicos de cada um dos nós e sensores acoplados à eles e monitora os valores que são publicados, podendo então atuar de modo preciso nos locais necessários. O sistema teria capacidade para controlar cada um dos atuadores de maneira individual, irrigando apenas as áreas monitoradas necessárias. No protótipo foi utilizado apenas uma bomba com um controle em escala, feito pelo nó 1 para irrigar o local de sua medição.

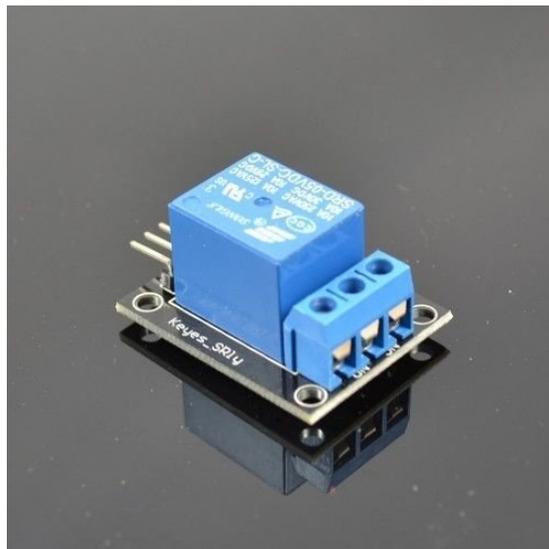
O modelo do nó sensor utilizado como protótipo é composto pelo microcontrolador (*LaunchPad CC1350*), conjunto de pilhas AA para alimentação do mesmo e um sensor de umidade (YL-69 + YL-39). Para realização das medições, o nó sensor ficará exposto em ambiente externo, localizado próximo às plantações, portanto, para proteção dos elementos eletrônicos, optou-se por utilizar uma caixa de passagem comercial opaca com grau de proteção IP 55 (Figura 15), de modo a proteger contra poeira, jatos d'água e exposição solar. A estrutura possui dimensões adequadas para acomodar os itens do nó sensor (170 x 145 x 90 mm), sendo seu custo-benefício viável para o propósito de um protótipo com baixo custos (STECK, 2019). A caixa necessita ser adaptada, a fim de permitir a saída dos cabos do sensor de umidade inserido na terra; essa adaptação deve ser simples de modo que o interior da caixa não fique desprotegido.

Figura 15 – Mini bomba submersa 5 V



Fonte: (VIDA DE SILICIO, 2019)

Figura 16 – Módulo relé 5 V um canal



Fonte: (ARDUINOLANDIA, 2019)

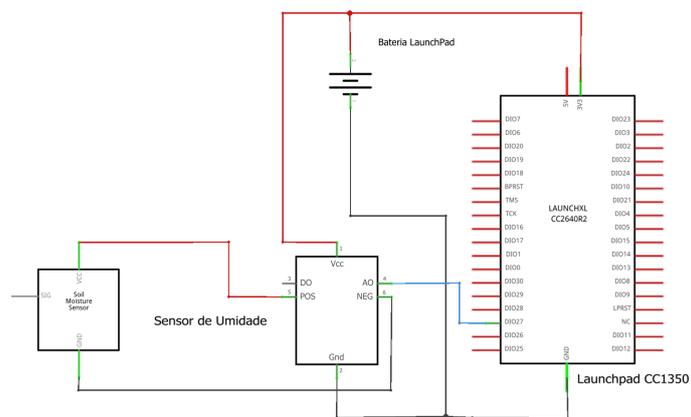
A partir do programa Fritzing foram montados os esquemáticos em bloco e em 2D do sistema, sendo possível verificar e entender as conexões necessárias (Figura 18) e (Figura 19).

Figura 17 – Caixa de passagem externa 170x145x90 mm Steck



Fonte: (LEROY MERLIN, 2019)

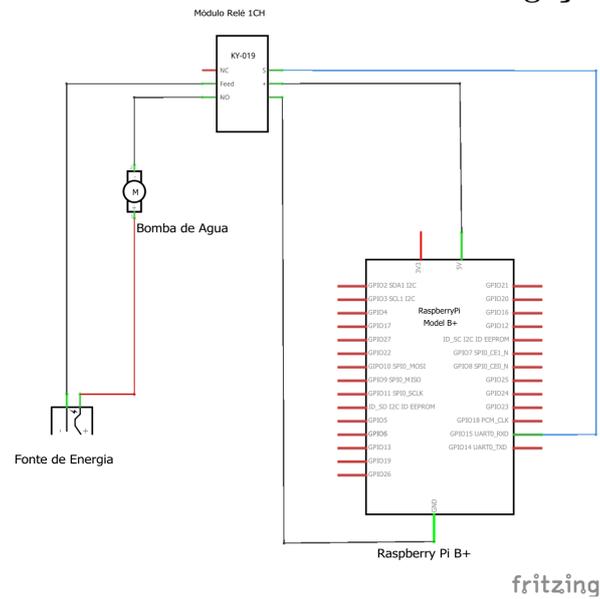
Figura 18 – Esquemático em blocos do nó sensor



fritzing

Fonte: Autoria Própria

Figura 19 – Esquemático em blocos do sistema de irrigação



Fonte: Autoria Própria

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Após várias pesquisas e ao participar das aulas presenciais de redes de sensores sem fio (Laboratório e Teórico) lecionadas na UTFPR, foi possível adquirir um conhecimento mais abrangente sobre os princípios da agricultura de precisão e compreender melhor o protocolo IPv6 e sua adaptação 6LoWPAN, bem como a camada de aplicação selecionada, o MQTT, em que foi utilizada uma versão adaptada, na forma RSMB / MQTT-SN para se adequar às limitações que o ambiente IoT impõe. Também foi possível escolher o hardware para melhor atender os requisitos do projeto, sendo eles o sensor YL-69, os LaunchPads CC1350 e RaspBerry Pi 3.

4.1 A SEQUÊNCIA DE MONTAGEM

4.1.1 Instalação e Configuração do Roteador e Nós

Após a configuração do sistema operacional Raspbian no Raspberry Pi, por meio de um cartão micro SD pré-gravado, conectou-se o cabo *ethernet* no aparelho e foram realizadas as atualizações e a instalação de dependências para o projeto.

Após as configurações iniciais concluídas, realizou-se a instalação do 6LBR (Roteador de Borda 6LoWPAN, do inglês, *6LowPAN Border Router*), que atuará como roteador de borda para a rede de sensores sem fio projetada. O próximo passo foi a instalação do RSMB no Raspberry Pi, configurado para receber mensagens pelas portas 1883 e 1884. Ao rodar o *broker*, para complementá-lo se executa o programa em C que se inscreve aos tópicos que cada nó irá publicar, respectivamente, e monitora os valores que são postados. Este programa irá atuar nos pinos GPIO do Raspberry Pi de acordo com os valores transmitidos pelos nós, ativando a bomba de irrigação. A instalação e configuração foi baseada na aula Moritz e Rayel (2018b), ministrada em 2018 na UTFPR.

Em paralelo, o desenvolvimento e adaptação do programa rodando sobre o Contiki para os requisitos do projeto foi realizado no *Code Composer Studio 7*, que é a IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês, *Integrated Development Environment*) da Texas Instruments para processadores e placas de desenvolvimento da mesma empresa. Como citado por Texas Instruments (2018) esta IDE inclui um compilador de código em C, editor de código, *debugger* entre outras ferramentas que auxiliaram na implementação do código nos *LaunchPads* que será executado no *slip-radio*

e em cada nó.

O *slip-radio* e os nós devem ser configurados para trabalharem no mesmo canal e se conectar no IP correto para serem descobertos pela rede e corretamente integrados a ela. O nó em adicional teve que ser programado para ler o valor do sensor periodicamente e transmiti-lo, caso haja uma diferença significativa do último valor transmitido ou caso o tempo limite tenha percorrido.

4.2 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

A montagem do sistema de irrigação (Figura 20) foi realizada com uma mini bomba submersa e um relé de um canal, conforme especificado no capítulo anterior. A utilização dos cabos de alimentação da bomba apresentou desafios, pois além de serem curtos precisavam ser isolados para não entrarem em contato com a água. Para isso foram utilizados dois cabos pontas de prova para multímetro de 1 kV/10 A que foram crimpados com terminais de 0,5 mm aos cabos da bomba. Para a parte elétrica utilizou-se uma isolação AWM 105 300 V e tubos termo retráteis para envolver a região dos cabos que estariam em contato com a água. Posteriormente, fez-se a vedação de toda a extensão do cabo submerso com silicone e vedação com fita de auto fusão, para garantir que não houvesse curto-circuito. Para alimentação da bomba foi utilizado um cabo USB que pode ser ligado na tomada com um conversor para 5 V, este cabo foi conectado no circuito bomba-relé com o auxílio de um conector próprio para emendas. Foi montado também um suporte de plástico para acomodar o relé, sendo que foi utilizado cola quente para isolar e proteger o mesmo.

O protótipo de sensoriamento (Figura 21) foi montado utilizando a caixa de passagem comercial mencionada no capítulo anterior. O microcontrolador e a placa lógica do sensor de umidade foram parafusados diretamente na caixa, e o suporte das baterias para alimentação do *LaunchPad* colado com fita dupla adesiva na lateral da caixa. Para saída do sensor foram encontrados desafios, pois como trata-se de um sensor de umidade do solo, o mesmo precisa ser colocado na terra, sendo que sua placa lógica precisa ficar protegida. Para que fosse possível colocar o sensor na região controlada, foi utilizado um cabo longo de fita plana cinza com conectores nas extremidades, sendo este isolado com fita isolante, de modo a não perder a flexibilidade. Um orifício na lateral da estrutura foi realizado para a saída do cabo do sensor. Este orifício foi vedado com cola quente para evitar a entrada de água e insetos. Todas as conexões elétricas no interior do gabinete foram feitas com *jumpers* fêmea-fêmea para flexibilizar a realização dos testes.

Figura 20 – Protótipo do sistema de irrigação



Fonte: Aatoria Própria

Figura 21 – Protótipo de sensoriamento



Fonte: Aatoria Própria

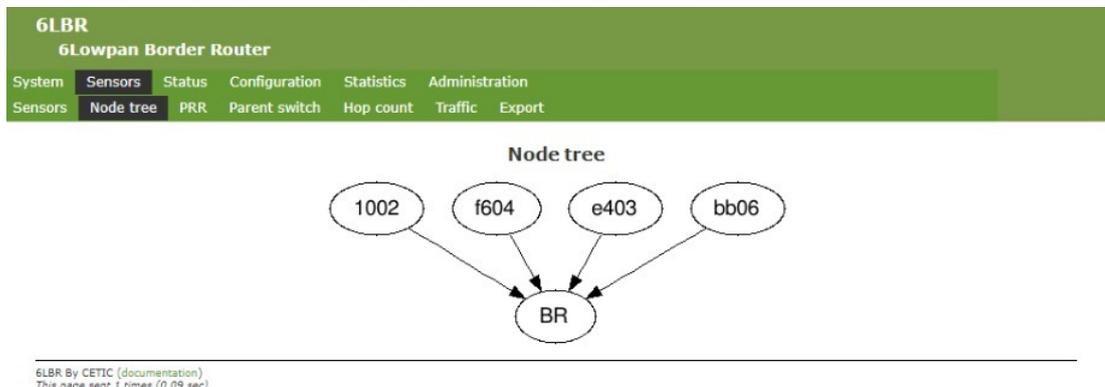
O protótipo da rede de sensores sem fio inclui quatro *LaunchPads* CC1350 com sensores de umidade do solo acoplados, um deles envolto pelo envólucro protetor, e do Raspberry Pi + CC1350 como roteador de borda. Este sistema é exibido na figura 22 e suas conexões quando ligados demonstrada na página do 6LBR, na figura 23.

Figura 22 – Protótipo da rede de sensores sem fio composta por 4 nós e um roteador de borda + Slip Radio



Fonte: Autoria Própria

Figura 23 – Nós conectados ao Roteador de borda



Fonte: Autoria Própria

Escolheu-se três baterias de Ni-MH (níquel-hidreto metálico) de 1,2 V e capacidade de 2300 mAh. Essas pilhas recarregáveis são uma ótima escolha em termos econômicos e uma ótima alternativa às pilhas alcalinas convencionais. O conjunto das pilhas fornece uma tensão de 3,6 V para o microcontrolador, valor dentro da faixa aceitável de funcionamento conforme *datasheet*. A grande vantagem do conjunto de baterias é a possibilidade de serem recarregadas até 500 vezes, baseado nas Normas IEC 61951-2, abrindo possibilidade de aprimoramento do protótipo com a utilização de um painel solar para recarregar as pilhas quando estiverem abaixo de um valor aceitável.

4.3 CUSTOS

Foram realizadas pesquisas para encontrar materiais com os menores custos para montagem do sistema, a fim de atingir o objetivo de propiciar um protótipo de baixo custo. Durante o desenvolvimento do projeto, o Raspberry utilizado como roteador de borda deixou de funcionar, sendo necessário adquirir outro. Na Tabela 4 estão relacionados os valores dos itens mais significativos para o projeto.

Tabela 4 – Tabela de custos do projeto

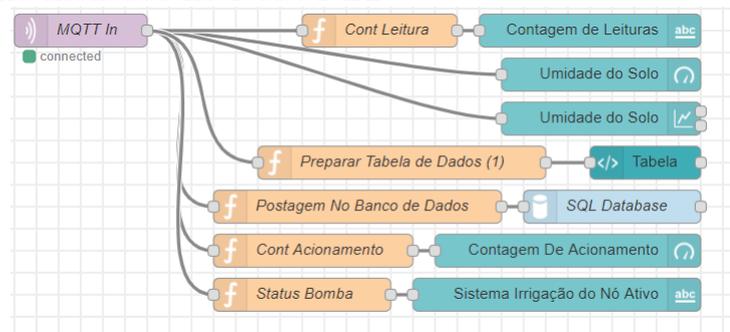
Função	Componente	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Observação
<i>Roteador de Borda/ MQTT Broker</i>	RaspBerry Pi 3B+	1	200	
Slip-radio	Lanchpad CC1350	1	100	
Nó 1	Lanchpad CC1350	1	100	
Nós 2 - 4	Lanchpad CC1350	3	0	Emprestado pelo Orientador
Sensor de Umidade do Solo	YL-69	5	15	
Adaptador para Pilha AA		1	4	
Bomba d'água		1	20	
Cano para Drenagem		1	2	
Invólucro do Nó		1	14	
Módulo Relé de um Canal		1	6	

Fonte: Autoria Própria

4.4 INTERFACE DO USUÁRIO

Para exibir a interface gráfica detalhada anteriormente foi utilizado o fluxo da Figura 24. A partir desse fluxo, foi possível se conectar ao RSMB e receber todos os dados transmitidos ao *broker* e posteriormente armazená-los em um banco de dados local. O fluxo também possui funções criadas para armazenar valores lidos em forma de tabela e também conta com funções pré-definidas para montagem de gráficos. Também foram adicionados contadores de acionamentos, contadores de leituras e texto de indicação do status do sistema de irrigação. Com essa topologia, é possível monitorar vários nós ao mesmo tempo, precisando apenas duplicar o fluxo e se inscrever no tópico do RSMB no qual o nó está postando os dados.

Figura 24 – Fluxo montado no *Node-RED*

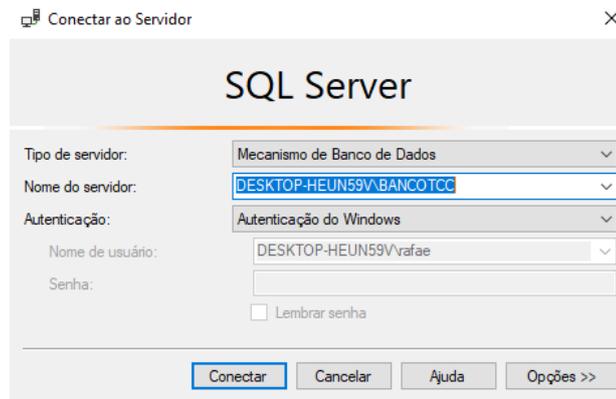


Fonte: Autoria Própria

4.4.1 Banco de Dados

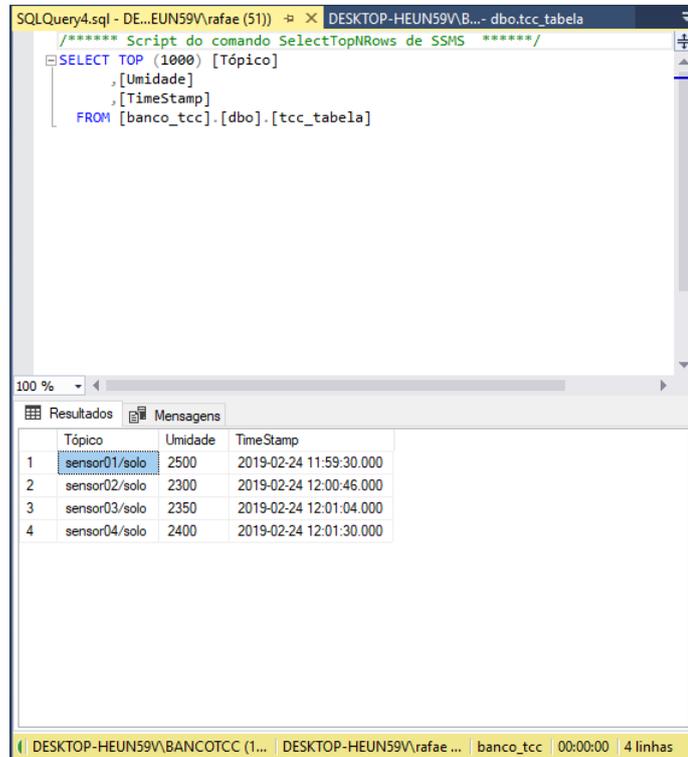
Os dados recebidos pelo *Node-RED* são encaminhados para um servidor SQL local exibido na Figura 25. A escolha pelo servidor SQL se deu pelo fato da sua versatilidade e seu desempenho independentemente dos dados estarem em seu *datacenter* ou na nuvem. Após criação do banco de dados local, simulando um servidor rodando em nuvem, foi gerado uma tabela para armazenar os valores medidos pelos nós, esta discrimina os dados pelo tópico postado, seus respectivos valores de umidade e a data do envio como mostrado na Figura 26.

Figura 25 – Banco de Dados SQL



Fonte: Autoria Própria

Figura 26 – Tabela criada no banco de dados



Fonte: Autoria Própria

4.5 RESULTADOS

4.5.1 Testes de Consumo

Levando em conta apenas as informações contidas nos *datasheets* do *LaunchPad* e do sensor de umidade, percebe-se que o consumo do sensor de 35 mA estaria muito acima do consumo de 13,4 mA do microcontrolador. Esse fator gerou a necessidade de

vários testes de consumo, a partir dos quais, a alimentação do nó sensor foi definida. Com o consumo do microcontrolador e do sensor de umidade do nó, baterias de Lítio (CR2032) deveriam ser o suficiente para dar uma autonomia de aproximadamente 5 horas para o conjunto *LaunchPad*, enquanto as baterias alcalinas convencionais durariam aproximadamente 16 horas. Contudo, após testes com o sistema, verificou-se que nenhuma das opções possuem capacidade o suficiente para alimentar o protótipo. Isso ocorre pois a informação constada no *datasheet* do *LaunchPad* em relação ao consumo, leva em conta apenas o processador sozinho, não o kit de desenvolvimento ao todo, o qual possui mais funções e componentes e, por isso, consome mais. Dessa forma, a baixa capacidade da bateria de Lítio e das pilhas alcalinas, de 240 mAh e 800 mAh respectivamente, inviabilizaram sua utilização, de modo que optou-se por utilizar pilhas AA com capacidade de 2300 mAh.

Para aferir os valores consumidos pelos componentes do nó sensor, utilizou-se um multímetro digital com precisão para medida de corrente contínua de $\pm 1,2\%$. Com isso mediu-se a corrente fornecida pelo conjunto de baterias ao microcontrolador, o consumo variou de 85,5 mA para um pico de 88,0 mA, sendo este percebido a cada 10 segundos, aproximadamente. Essa variação ocorre pois o *LaunchPad* permanece um período em modo *standby* e um curto tempo em modo de leitura e transmissão. Medindo-se o consumo apenas do sensor, verificou-se um dispêndio de 3 mA sem qualquer variação, constatando-se que o consumo do sensor foi menor em relação ao microcontrolador. Levando em consideração as medidas realizadas e a capacidade de 2300 mAh das baterias escolhidas, observa-se uma autonomia estimada de 27 horas. Dessa forma, para um aprimoramento futuro, deve ser escolhido uma bateria com maior autonomia, ou a utilização de painel solar, conforme já citado.

4.5.2 Testes de Alcance

Os testes de alcance foram divididos em duas etapas, com linha de visada e com obstáculos. A com obstáculos foi realizada em área rural com relevo acidentado e obstáculos não muito densos (pequena quantidade de árvores) em um sítio na cidade de Mairinque – SP. Os testes foram realizados em um dia ensolarado, sem nuvens à uma temperatura média de 28 graus Celsius no dia da coleta dos dados.

Consistiram em tentativas de se alcançar a maior distância possível andando vagarosamente portando o nó que estava programado para enviar um sinal para o roteador a cada cinco segundos. Como neste sítio não havia sinal de celular, a metodologia usada

Figura 27 – Teste de alcance máximo 1 (140 m)

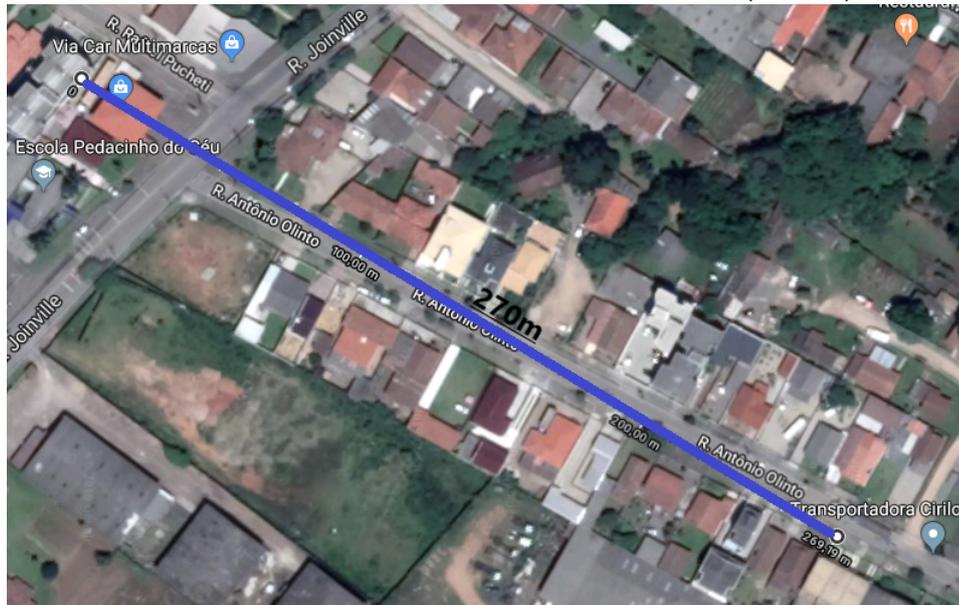


Fonte: Autoria Própria

para medir a distância foi anotar a posição utilizando o GPS (Sistema de Posicionamento Global, do inglês, *Global Positioning System*) a cada momento e a hora em um relógio sincronizado com o relógio do roteador e andar uma dada distância (no primeiro teste aproximadamente 500 metros). Então ao voltar à residência em que o roteador estava instalado era visto qual hora exata o nó parou de enviar pacotes nos *logs* do 6LBR, e com os dados anotados das posições em cada hora pôde se ter uma estimativa da distância máxima que a conexão se manteve intacta. Esse teste repetiu-se duas vezes, na primeira a distância máxima em linha reta calculada utilizando o *Google Maps* foi aproximadamente de 140 metros, e na segunda 131 metros. Os pontos iniciais e finais estão registrados na figura 27. Nas duas vezes nenhum pacote foi perdido, já que em ambos os testes haviam cinco segundos entre todos os pacotes recebidos no *log*.

O teste de alcance com linha de visada foi reproduzido em área urbana, na cidade de São José dos Pinhais. O teste foi realizado em um dia nublado, em temperatura média de 21 graus Celsius durante as medições. O local de início foi a sacada de um apartamento de três andares, aproximadamente 10 metros de altura, e o percurso foi em linha reta na rua em frente à sacada. Notou-se a queda do sinal à aproximadamente 270 metros do ponto inicial. O percurso tomado está representado na figura 28.

Figura 28 – Teste de alcance máximo com linha de visada (270 m)



Fonte: Autoria Própria

Para medir a distância em linha reta de um ponto à outro, escolheu-se utilizar o *Google Maps* em conjunto com o GPS do aparelho celular para se estimar a distância.

Como visto, a distância máxima está muito longe dos 20 Km de alcance máximo mencionados no *datasheet* do *LaunchPad CC1350*. Este valor muito abaixo do esperado pode estar atrelado à vários fatores, incluindo o relevo (não possuía linha de visada), obstáculos na forma de arvoredo não muito denso, condições desfavoráveis durante teste como movimentação, alimentação do nó, efeitos de sombreamento causados pelo ambiente e etc. Um dos grandes vilões foi possivelmente a antena impressa na placa, que não possui o desempenho desejado.

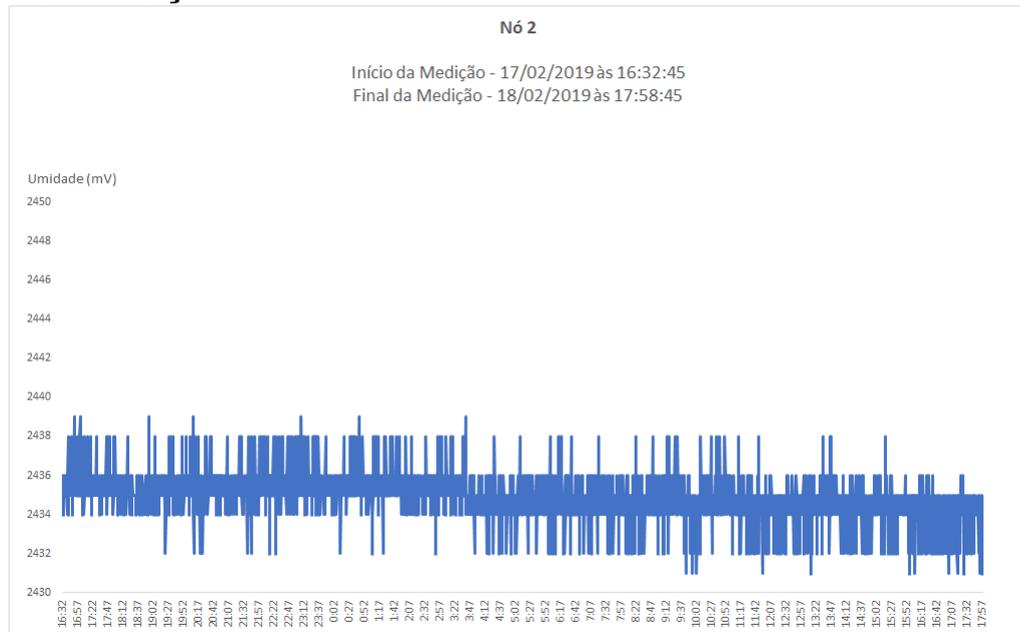
Pode-se perceber que o segundo teste, apesar de vários fatores que pudessem causar desvanecimento de curta e larga escala devido ao ambiente urbano, teve melhor desempenho que o em ambiente rural. Esse fato pode ser explicado pela altura mais elevada do roteador no teste urbano bem como obstáculos menos prevalentes entre os aparelhos comunicantes.

4.5.3 Testes de Desempenho do Sistema

Foram realizados testes para verificar o funcionamento do projeto por completo. Após montar a topologia do sistema e dispondo dos dados angariados pela interface do usuário, foram gerados gráficos para melhor compreender-lo.

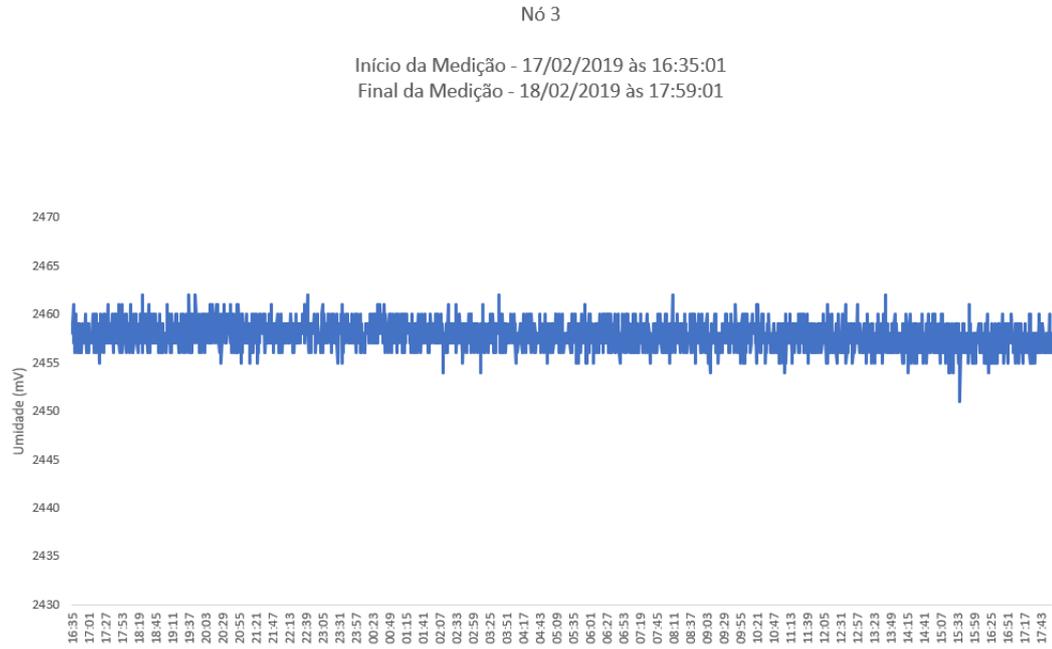
Primeiramente foram utilizados três conjuntos nó-sensor, onde os sensores estavam em uma superfície plana, para obter dados referentes a umidade do solo seco possibilitando a criação de uma memória de massa para cálculo do desvio padrão, coeficiente de variação das populações e noção da confiabilidade dos dados medidos. As Figuras 29, 30 e 31 mostram os dados coletados pelos sensores.

Figura 29 – Medição nó 2



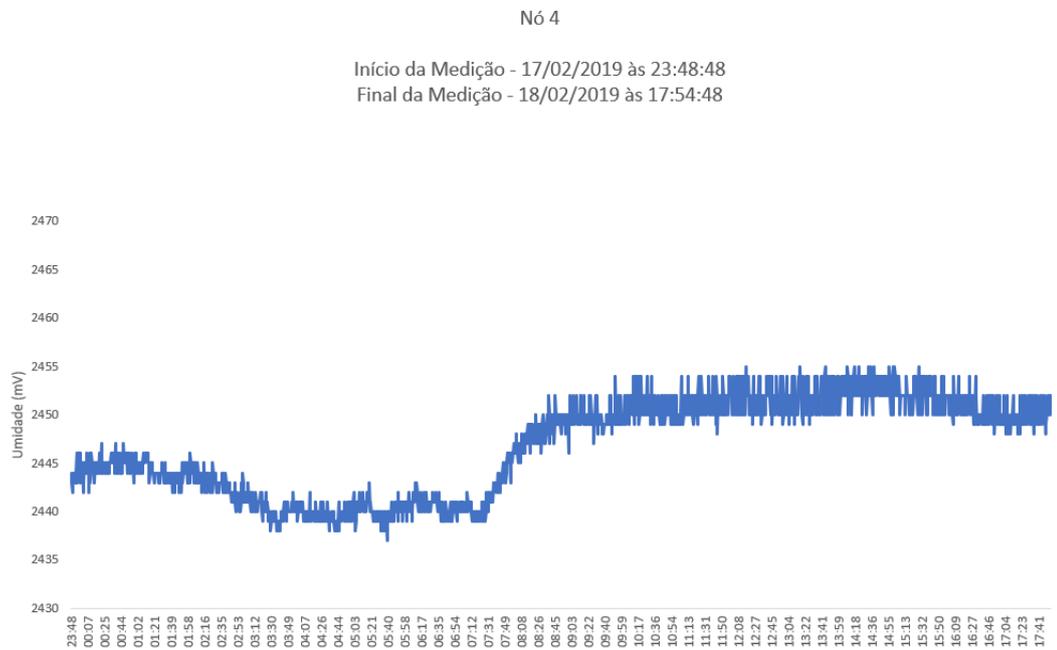
Fonte: Autoria Própria

Figura 30 – Medição nó 3



Fonte: Autoria Própria

Figura 31 – Medição nó 4



Fonte: Autoria Própria

Para o cálculo do desvio padrão e coeficiente de variação foram utilizadas as equações 1 e 2, respectivamente.

$$DP^2 = \frac{\sum_{x=1}^N (x - y)^2}{N} \quad (1)$$

$$CV = \frac{DP}{y} \quad (2)$$

Onde x = valor de umidade medido, y = valor médio de umidade, N = número total de dados medidos. O resultado do cálculo é exibido na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de desvio padrão e coeficiente de variação

Nó	Valor Médio	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
2	2434,93 mV	1,49	0,061%
3	2457,79 mV	1,36	0,055%
4	2446,79 mV	4,97	0,20%
Geral	2449,83 mV	12,65	0,52%

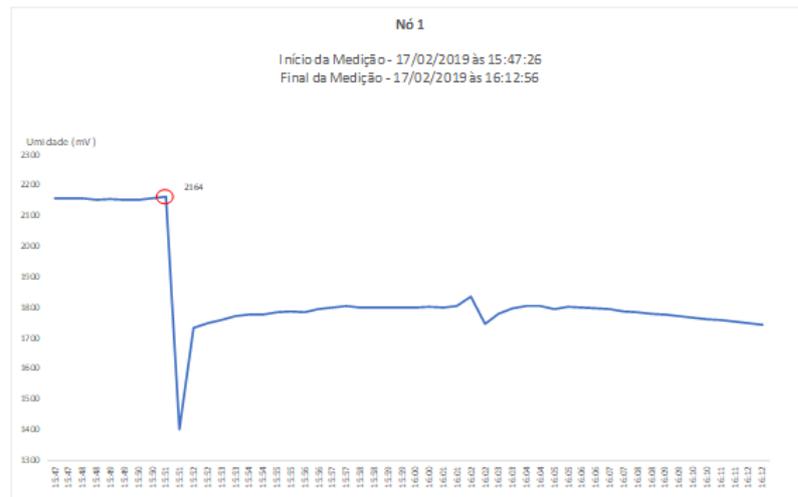
Fonte: Autoria Própria

Ao analisar a Tabela 5 é possível notar que a precisão dos sensores, analisando cada um separadamente, é alta tendo em vista o baixo valor de desvio padrão e coeficiente de variação calculados, expressando que os valores tendem a estar muito próximos do valor médio medido no período. A pequena oscilação nos valores medidos pelo nó 4 podem ser resultado de algum problema momentâneo de conexão ou fornecimento de energia, visto que, acaba se estabilizando após curto período. A precisão geral do sistema diminui quando todos os sensores são analisados concomitantemente, uma vez que os erros percentuais de todas as unidades medidoras acabam sendo agregados.

Para identificar a sensibilidade quanto a variação dos sensores, um conjunto nó-sensor foi colocado em um vaso cheio de terra seca e o valor de umidade coletado pelo sensor foi comparado com um limiar previamente estabelecido de 2160 mV. Ao atingir esse valor o sistema de irrigação foi ativado automaticamente pelo Raspberry Pi. A Figura 32 mostra o resultado obtido.

Com o teste realizado foi possível notar a alta sensibilidade do sensor quando submetido a uma diferença considerável de umidade em curto período de tempo e também mesmo após o cenário mencionado o sensor se manteve preciso, mantendo os valores medidos com baixa oscilação.

Figura 32 – Medição nó 1



Fonte: Autoria Própria

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do protótipo atingiu parte de seu objetivo em representar uma rede de sensores sem fio para controle da irrigação em pequena escala, uma vez que foi construído com êxito com base no que foi projetado, sendo uma solução com baixo custo e com possibilidade de expansão. No que se refere aos objetivos alcançados, compreende-se que o projeto possui limitações em relação às distâncias atingidas, pois o alcance ficou abaixo do esperado, o que acabou restringindo os testes para distâncias mais curtas, sendo constatada a distância máxima de 270 m em ambiente urbano.

As maiores dificuldades encontradas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho foram os problemas técnicos, em relação ao 6LBR, ao RSMB, ao *Node-RED* e a comunicação entre estes. Material sobre a configuração específica de tais sistemas e protocolos não é de fácil acesso, sendo os recursos mais utilizados os fornecidos durante as aulas de redes de sensores sem fio e auxílio do orientador. Muitas vezes o *troubleshooting* dos *bugs* no código e erros de montagem levavam vários dias para serem resolvidos devido a falta de conteúdo sobre o tópico desejado. Isto pode estar atrelado ao fato dessas tecnologias estarem em fase de desenvolvimento e testes, havendo poucos casos de *hardware* e *software* em produção no mercado que inclui o uso dessas soluções de código aberto. Muitas utilizam-se de código e *hardware* proprietário para integração de seus sistemas. Muitos problemas relacionados à configuração e montagem incorretas que sem a ajuda do orientador deste trabalho teriam sido muito difíceis de serem solucionados.

A utilização de outros tipos de sensores foi algo sugerido ao decorrer do trabalho, como o de temperatura, por exemplo. Porém, esses dispositivos de sensoriamento são encontrados por valores relativamente altos para que possuam precisão considerável, se comparados ao sensor de umidade empregado. Além disso, são grandezas que são consideradas informações auxiliares apenas. Para o propósito de um sistema simples e de baixo custo para irrigação, não agregam informação essencial como o sensor de umidade do solo, de forma a justificar o aumento de custo e consumo de energia. Inicialmente foi planejado a adição do sensor DHT22, porém durante sua implementação não foi encontrada uma biblioteca para C pronta para o *LaunchPad* CC1350, o que tornou a implementação deste muito complexa. Desta forma, foi decidido retirar o sensor de temperatura do protótipo, por este não impactar de forma alguma a ativação da bomba d'água e existirem formas mais simples de se obter a temperatura local.

Outra dificuldade encontrada foi a aquisição de um sensor de umidade do solo que

fosse calibrado para a grandeza de quilograma de água por quilograma de solo, uma vez que esse tipo de dispositivo possui um alto custo. O sensor adquirido trabalha com a variação da sua saída de 0 V a 3,3 V, sendo que para a sua devida calibração seria necessário a utilização do outro sensor comentado. Por esse motivo, não foi possível realizar a calibração do sensor empregado. Pelo valor da umidade ideal do solo ser subjetiva e variar de cultivo para cultivo, temperatura, tipo de solo, incidência solar entre outros fatores que não cabem no escopo deste trabalho, a decisão do *threshold* foi decidida empiricamente para fins de demonstração, entre um valor de tensão medido de 2700 mV (solo seco) e 1100 mV (sensor mergulhado em água ou solo totalmente encharcado). Uma sugestão seria um trabalho multidisciplinar incluindo participantes de engenharia agrônômica, para enriquecer o trabalho e torná-lo mais efetivo, podendo então criar aplicações reais para o projeto em campo.

Para otimizar o desempenho do sistema de irrigação sugerem-se trabalhos futuros para tornar o sistema mais completo e robusto. Como a utilização de outras formas de sensoriamento como sensores de insolação e de chuva, que possam auxiliar o gerenciamento dos recursos importantes em uma plantação. Melhorias no *hardware*, como a troca do microcontrolador CC1350 para o CC1352 com *hardware* superior e adição de uma antena externa, de modo a alcançar maior capacidade de transmissão em longas distâncias. Integração do sistema de irrigação com interface à um serviço de previsão do tempo online, que ajude evitar a irrigação quando for previsto chuva. Testes sem obstáculos e em situação real do sistema completo, de forma a comprovar o desempenho dos protocolos de comunicação e dos sensores e comparar o desempenho do sistema para esses dois casos.

REFERÊNCIAS

- ADVANTECH. **IoT Sensor Device Management**. 2015. <http://www.advantech-i.com/enews/ecg/november2015/iot-sensor-device-mgmt/#link2>. Acesso em: 01 de fev. 2019.
- AHMED, S.; TOPALOV, A.; SHAKEV, N. **A Robotized Wireless Sensor Network Based on MQTT Cloud Computing**. 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM), Donostia-San Sebastian, p. 1-6, 2017.
- ANASTASI, G.; CONTI, M.; FRANCESCO, M. D.; PASSARELLA, A. **Energy conservation in wireless sensor networks: A survey**. *Ad hoc networks*, v. 7, n. 3, p. 537-568, 2008.
- ARDUINOLANDIA. **MÓDULO RELÉ 5V**. 2019. <https://www.arduino-landia.com.br/modulo-rele-5v>. Acesso em: 03 de fev. 2019.
- ATEAM, S. **Keysight VIP slides**. KEYSIGHT Technologies, 2015. Disponível em: <https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Slide_IOT_Part_2.pdf>. Acesso em: 25 de mai. 2017.
- BATISTA, S. C. O. **Estudo técnico e econômico de um dispositivo visando à automação de sistemas de irrigação a partir do monitoramento do conteúdo de água no solo**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2012.
- BRUNO, P. S.; LUCAS, A. M.; CLAYSON, S. F. S.; JOÃO, B. B.; BRUNA, S. P.; MARCOS, A. M.; LUIZ, F. M. V.; OLGA, N. G.; ANTONIO, A. F. L. **Internet das Coisas: da Teoria à Prática**. 2016. Disponível em: <<http://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>>. Acesso em: 20 de out. 2017.
- CALBO, A. G.; SILVA, W. L. C. **Sistema Irrigas para manejo de irrigação: fundamentos, aplicações e desenvolvimentos**. Embrapa Hortaliças, 2005.
- CARLOS, H. C.; C., J. P. **Internet of Things implementation with nodes based on low-power microcontroller MSP430**. 2017 International Conference on Information Systems and Computer Science, 2017.
- COLINA, A. L.; VIVES, A.; ZENNARO, M.; BAGULA, A.; PIETROSEMOLI, E. **Internet of Things In 5 days**. 2016. <https://github.com/marcozennaro/IPv6-WSN-book/blob/master/Releases/IoT%20in%20five%20days%20-%20v1.1%2020160627.pdf>.
- COLITTI, W.; STEENHAUT, K.; CARO, N.; BUTA, B.; DOBROTA, V. Rest enabled wireless sensor networks for seamless integration with web applications. In: IEEE. 2011 IEEE Eighth International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems, 2011. p. 867 – 872.

CONTIKIOS.ORG. **Contiki: The Open Source OS for the Internet of Things**. 2002. <http://www.contiki-os.org/>.

COSTA, R. A. G. da. **Utilização de data warehouses para gerenciar dados de redes de sensores sem fio que monitoram polinizadores**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2011.

DIGI INTERNATIONAL, INC. **WiseConn Brings New Efficiencies to Agriculture with Precise Irrigation**. 2019. <https://www.digi.com/customersuccesses/wiseconn-brings-new-efficiencies-to-agriculture>. Acesso em: 01 de fev. 2019.

EBC, P. **Agricultura é quem mais gasta água no Brasil e no mundo**. 2013. Disponível em: <<http://www.ebc.com.br/noticias/internacional/2013/03/agricultura-e-quem-mais-gasta-agua-no-brasil-e-no-mundo>>. Acesso em: 31 de mai. de 2018.

EGGLY, G.; FINOCHIETTO, M.; DIMOGERONTAKIS, E.; SANTOS, R.; OROZCO, J.; MESEGUER, R. Real-time primitives for coap: Extending the use of iot for time constraint applications for social good. In: **Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings**. 2018. v. 2, n. 19, p. 1257.

FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London, 2011.

FRENZEL, L. **What's The Difference Between IEEE 802.15.4 And ZigBee Wireless?** 2013. Disponível em: <<http://www.electronicdesign.com/what-s-difference-between/what-s-difference-between-ieee-802154-and-zigbee-wireless>>. Acesso em: 20 de mai. 2017.

HERRERO, R. Analytical model of iot coap traffic. **Digital Communications and Networks**, Elsevier, 2018.

IBRAHIM, M.; MOHAMED, R.; AHMAD, N. **Precision Agriculture Applications using Wireless Moisture Sensor Network**. 2015 IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC), Kuching, Malaysia, 2015.

IEEE 802 LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE. **IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4g (TG4g) Smart Utility Networks**. 2011. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4g.html>. Acesso em: 20 de jun. 2018.

IMINDS – GHENT UNIVERSITY. **Converged, configurable LPWAN architecture for IoT devices**. 2016. <https://biblio.ugent.be/publication/7257956/file/725801.pdf>. Acesso em: 20 de mai. 2018.

KRISTOFFER, O. F.; ISIDRO, M. B.; JON, E. M. G.; SAMUEL, M. G. D.; ROSULA, S. J. R. **Precision Agriculture Monitoring System using Wireless Sensor Network and Raspberry Pi Local Server**. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON) - Proceedings of the International Conference, 2016.

LEROY MERLIN. **Caixa de Passagem Externa 170x145x90mm Steck**. 2019. https://www.leroymerlin.com.br/caixa-de-passagem-externa-170x145x90mm-steck_85083950. Acesso em: 03 de fev. 2019.

LOUREIRO, A. A.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ, L. B.; MINI, R. A. de F.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. **Redes de sensores sem fio**. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC), 2003.

MELO, P. **Padrão IEEE 802.15.4 - A base para as especificações Zigbee, WirelessHart e MiWi**. 2017. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/padrao-ieee-802-15-4/>>. Acesso em: 20 de mai. 2017.

MORITZ, G. L.; RAYEL, O. K. **Aula 4: Modelo Osi, IPv6, mDNS e 6LoWPAN**. 2018. Aula ministrada na disciplina de Redes de Sensores sem Fio, do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba 2018. Disponível em https://www.dropbox.com/s/nea5hndcq78543e/05_OSI_MAC_Roteamento.pdf?dl=0.

MORITZ, G. L.; RAYEL, O. K. **Aula 5: Acesso à Internet para redes 6LoWPAN**. 2018. Aula ministrada na disciplina Laboratório de Redes de Sensores sem Fio, do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba 2018.

MUNDO GEO. **Mercado de Agricultura de Precisão deve ultrapassar 4 bilhões de Euros em 3 anos**. 2018. <http://mundogeo.com/blog/2018/03/02/mercado-de-agricultura-de-precisao-deve-ultrapassar-4-bilhoes-de-euros-em-3-anos/>. Acesso em: 20 de mai. 2018.

NAVARRO, H. H.; B, R. T.-S.; C, F. S.-V.; A, C. A.-P.; LÓPEZ-RIQUELMÉ, J.; D, R. D.-M. **A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management**. 2014. Disponível em: <<http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5800/wsa.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 07 de fev. 2019.

NOVAK, P.; PIERCE, F. J. **Aspects of precision agriculture**. Adv. Agronomy, v.67, p.1-85, 1999.

OJHA, T.; MISRA, S.; RAGHUWANSHI, N. S. **Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges**. Computers and Electronics in Agriculture, v. 118, p. 66-84, 2015.

PANTAZIS, N. A.; NIKOLIDAKIS, S. A.; VERGADOS, D. D. **Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey**. IEEE Communications surveys e tutorials, v. 15, n. 2, p. 551-591, 2013.

PAZ, V. P. da S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. **Recursos Hídricos, Agricultura Irrigada e Meio Ambiente**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, p.465-473, 2000.

POPOVIC, T.; LATINOVIC, N.; PESIC, A.; ZECEVIC, Z.; KRSTAJIC, B.; DJUKANOVIC, S. **Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study**. Computers and Electronics in Agriculture, v. 140, p. 255-265, 2017.

QUEIROZ, D. V. de. **Simulação Realista de Redes de Sensores Sem Fio Industriais**. Tese de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, 2016.

- RASPBERRYPI.ORG. **RASPBERRY PI 3 MODEL B**. 2017. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>.
- RAYEL, O. K.; MORITZ, G. L. **Aula 5: Modelo Osi, MAC e Roteamento**. 2018. Aula ministrada na disciplina de Redes de Sensores sem Fio, do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba 2018. Disponível em https://www.dropbox.com/s/nea5hndcq78543e/05_OSI_MAC_Roteamento.pdf?dl=0.
- REIS, G. O. **Estratégias para avaliação de consumo de energia em redes de sensores sem fio**. 2015. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- RESEARCH DESIGN LAB. **Digital Soil Moisture Sensor**. 2014. <https://researchdesignlab.com/projects/soil%20moisture.pdf>. Acesso em: 20 de mai. 2018.
- RESENDE Álvaro V.; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.; VILELA, M. F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. M. **Agricultura de Precisão no Brasil: Avanços, Dificuldades e Impactos no Manejo e Conservação do Solo, Segurança Alimentar e Sustentabilidade**. jun. 2010. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/870646/agricultura-de-precisao-no-brasil-avancos-dificuldades-e-impactos-no-manejo-e-conservacao-do-solo-seguranca-alimentar-e-sustentabilidade>>. Acesso em: 20 out. 2017.
- RF WIRELESS WORLD. **LoRa vs Zigbee | Difference between LoRa and Zigbee**. 2012. <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/LoRa-vs-Zigbee.html>. Acesso em: 20 de mai. 2018.
- ROY, D. G.; MAHATO, B.; DE, D.; BUYYA, R. Application-aware end-to-end delay and message loss estimation in internet of things (iot)—mqtt-sn protocols. **Future Generation Computer Systems**, Elsevier, v. 89, p. 300–316, 2018.
- SANTOS, R. **Guide for Soil Moisture Sensor YL-69 or HL-69 with Arduino**. 2013. <https://randomnerdtutorials.com/guide-for-soil-moisture-sensor-yl-69-or-hl-69-with-the-arduino/>. Acesso em: 20 de mai. 2018.
- SENAR. **Avanços Tecnológicos Melhoram a Produtividade na Agricultura**. 2016. Disponível em: <<http://www.senar.org.br/agricultura-precisao/avancos-tecnologicos-melhoraram-a-produtividade-na-agricultura>>. Acesso em: 20 out. 2017.
- SHELBY, Z.; BORMANN, C. **6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet**. Wiley, 2009.
- SHELBY, Z.; HARTKE, K.; BORMANN, C. **The constrained application protocol (CoAP)**. 2014.
- SHELKE, R.; KULKARNI, G.; SUTAR, R.; BHORE, P.; NILESH, D.; BELSARE, S. **Energy management in wireless sensor network**. Computer Modelling and Simulation, UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, p. 668-671, 2013.

- SILVA, M. A. M. da. **Rede de sensores para aplicação em agricultura: um estudo de caso**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- SRBINOVSKA, M.; GAVROVSKI, C.; DIMCEV, V.; KRKOLEVA, A.; BOROZAN, V. **Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks**. Journal of cleaner production, v. 88, p. 297-307, 2014.
- STANFORD-CLARK, A.; TRUONG, H. L. Mqtt for sensor networks (mqtt-sn) protocol specification. **International business machines (IBM) Corporation version**, v. 1, 2013.
- TABISH, R.; TOUATI, F.; MNAOUER, A. B.; GHALEB, A. **A Comparative Analysis of BLE and IEEE802.15.4 (6LoWPAN) For U-HealthCare Applications**. 11 2013.
- TEXAS INSTRUMENTS. **CC1350 SimpleLink™ Ultra-Low-Power Dual-Band Wireless MCU**. 6 2016.
- TEXAS INSTRUMENTS. **Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE) Management**. 2018. <http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>. Acesso em: 06 de fev. 2019.
- UTZIG, J. T. **REDES DE SENSORES SEM FIO – UM ESTUDO TEÓRICO COM EXPERIMENTAÇÃO VIA SIMULAÇÃO**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário Feevale, 2007.
- VIDA DE SILICIO. **Mini bomba submersa 5V p/ Água**. 2019. <https://www.vidadesilicio.com.br/mini-bomba-submersa-5v-agua>. Acesso em: 03 de fev. 2019.
- WI-SUN. **Comparing IoT Networks at a Glance**. 2017. <https://www.wi-sun.org/wp-content/uploads/Wi-SUN-Comparing-IoT-Networks.pdf>. Acesso em: 01 de fev. 2019.
- WISECONN. **Applications**. 2019. <https://www.wiseconn.com/applications/agriculture/>. Acesso em: 01 de fev. 2019.
- YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. **Wireless sensor network survey**. Computer networks, v. 52, n. 12, p. 2292-2330, 2008.
- YOUSEF, E. M. H.; BASEL, H. Y. E. **Precision Agriculture for Greenhouses Using a Wireless Sensor Network**. 2017 Palestinian International Conference on Information And Communication Technology, 2017.