

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

BRUNO TURIN MORI CAVERDE NUNES
IVAN LUCAS BATISTA ROLIM
MATHEUS KUNHAVALIK DA ROSA

**REDE DE SENSORES SEM FIO APLICADA À METEOROLOGIA
FLORESTAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

BRUNO TURIN MORI CAPAVERDE NUNES
IVAN LUCAS BATISTA ROLIM
MATHEUS KUNHAVALIK DA ROSA

**REDE DE SENSORES SEM FIO APLICADA À METEOROLOGIA
FLORESTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de conclusão de curso 2, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz

CURITIBA
2018

Bruno Turin Mori Capaverde Nunes
Ivan Lucas Batista Rolim
Matheus Kunhavalik da Rosa

Rede de sensores sem fio aplicada a meteorologia florestal

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

Curitiba, 23 de Novembro de 2018.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Ohara Keraususkas Rayel
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer aos nossos familiares e amigos pelo apoio ao longo dos cinco anos de graduação.

Gostaríamos de agradecer ao nosso professor orientador pelos conselhos e suporte, assim como ao professor Alexandre França Tetto pelo suporte e pela colaboração no desenvolvimento da ideia do trabalho. Gostaríamos de agradecer também a todos os outros professores com quem tivemos contato em nossa jornada até este momento.

Por fim, gostaríamos de agradecer profundamente às nossas parceiras, cujo companheirismo, apoio e carinho foram imprescindíveis para que alcançássemos esse momento de nossas vidas.

“There are no strings on me”.
(Pinocchio)

RESUMO

NUNES, Bruno T.M.C.; ROLIM, Ivan L. B.; ROSA, Matheus K. da. REDES DE SENSORES SEM FIO APLICADA A METEOROLOGIA FLORESTAL. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Este trabalho de conclusão do curso de Engenharia de Controle e Automação demonstra o desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio para medições de duas variáveis básicas usadas em pesquisas meteorológicas, umidade relativa do ar e temperatura. O intuito do equipamento é ser utilizado em pesquisas acadêmicas no Departamento de Ciências Florestais da UFPR, substituindo o dispositivo usado atualmente, o *Datalogger* HOBO H08-003-02. Para tal, realizou-se uma revisão bibliográfica acerca do tema, resgatando seus principais conceitos e, a partir de uma pesquisa de mercado, levantou-se, para fins de comparação, uma lista de equipamentos similares que pudessem realizar a mesma função. Atendendo as especificações necessárias e opções disponíveis de componentes e tecnologias, foi determinado o hardware para o desenvolvimento de um protótipo. Para a implementação da rede de sensores foi escolhido o protocolo Sub 1 GHz, e todo o software desenvolvido no RTOS Contiki. Com o protótipo em funcionamento, realizou-se testes primários para verificar o funcionamento do equipamento, seguido de testes comparativos entre o protótipo e o *Datalogger* citado para validação do protótipo.

Palavras-chave: Redes de sensores sem fio. Comunicação sem fio. Meteorologia. Contiki. Sub 1 GHz

ABSTRACT

NUNES, Bruno T.M.C.; ROLIM, Ivan L. B.; ROSA, Matheus K. da. WIRELESS SENSOR NETWORKS APPLIED TO FORESTRY METEOROLOGY. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

This undergraduate thesis shows the development process of a wireless sensors network designed to measure temperature and relative humidity, two of the most relevant variables for meteorology researches. The equipment's purpose is to be used in forestry academic researches at UFPR, in replacement for the datalogger currently in use, HOBO H08-003-02. To do so, a bibliographic review has been made, defining concepts and, from a market research, a list of possible replacements available for the same purpose. The Hardware was chosen so it could meet the specifications of the product, considering various components and technology options. Sub 1 GHz protocol was chosen to implement the wireless sensors networks and the software was developed using Contiki RTOS. With a working prototype, a series of tests has been accomplished. Primary tests were carried out to verify the operation of the equipment, followed by comparative tests between the prototype and the Datalogger mentioned for its validation.

Keywords: Wireless sensors networks. Wireless communication. Meteorology. Contiki. Sub 1 GHz

LISTA DE SIGLAS

6LoWPAN	<i>IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CSV	<i>Comma-separated values</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, scientific and medical</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LR-WPANs	<i>Low-rate wireless personal network</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MQTT-SN	<i>Message Queuing Telemetry Transport – Sensor Network</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
RFD	<i>Reduced function devices</i>
RH	<i>Relative Humidity</i>
RSMB	<i>Really Small Message Broker</i>
RSSF	Rede de sensores sem fio
RSSI	<i>Received signal strength indication</i>
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
RTOS	<i>Real time operating system</i>
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
SDA	<i>Serial Data Line</i>
SMD	<i>Surface Mounting Device</i>
TCP/IP	<i>Transmission Common Protocol / Internet Protocol</i>
TI	<i>Texas instruments</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

VIM Vocabulário internacional de termos gerais e fundamentais da metrologia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– HOBO H08-003-02	16
Figura 2	– Distribuição da tecnologia IoT	20
Figura 3	– Aplicação típica de uma RSSF	21
Figura 4	– HOBO MX1101	27
Figura 5	– RFRHTemp2000A	28
Figura 6	– OMEGA UWRH-2A-NEMA-M12	28
Figura 7	– Projeto a ser desenvolvido	30
Figura 8	– LaunchPad CC1350	35
Figura 9	– HTU21D	37
Figura 10	– HDC 1080	38
Figura 11	– HDC 2010	38
Figura 12	– Raspberry Pi	40
Figura 13	– Caixa de passagem	41
Figura 14	– Camadas da rede implementada	45
Figura 15	– Conexão do sensor	46
Figura 16	– Comparativo da densidade energética	47
Figura 17	– Sistema de alimentação	48
Figura 18	– Construção do protótipo	48
Figura 19	– Construção - Painel fotovoltaico	48
Figura 20	– Montagem do abrigo do sensor no corpo do protótipo	50
Figura 21	– Detalhe do abrigo do sensor	51
Figura 22	– Interface - Valores atuais	52
Figura 23	– Interface - Histórico	53
Figura 24	– Interface - Tabela CSV visualizada no Microsoft Excel	53
Figura 25	– Interface - Envio dos dados por e-mail	54
Figura 26	– Curva de descarregamento da bateria	57
Figura 27	– Curva de descarregamento da bateria do protótipo	58
Figura 28	– Alcance em campo aberto	59
Figura 29	– Alcance em mata fechada	60
Figura 30	– RSSI medido	61
Figura 31	– Dados de temperatura preliminares	63
Figura 32	– Dados de umidade relativa do ar preliminares	63
Figura 33	– Dados de temperatura após calibração dos sensores	65
Figura 34	– Dados de umidade relativa do ar após calibração dos sensores	66
Figura 35	– Curva de exatidão do sensor	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Comparação entre equipamentos	29
Tabela 2	– Tabela de custos para um nó da RSSF	54
Tabela 3	– Tabela de custos para o <i>gateway</i> da RSSF	55
Tabela 4	– Tabela de Erros absolutos médios	64
Tabela 5	– Tabela de Erros absolutos	67
Tabela 6	– Tabela de Erros Máximos	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA	13
1.1.1 Delimitação do Tema	14
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	15
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 IOT	19
2.2 REDE DE SENSORES SEM FIO	20
2.3 SENSORES	22
2.3.1 Princípios de Sensoriamento	23
2.4 CONCLUSÃO	24
3 ESPECIFICAÇÕES E PESQUISA DE MERCADO	25
3.1 ESPECIFICAÇÕES	25
3.1.1 Variáveis	25
3.1.2 Características de Medição	25
3.1.3 Alcance	25
3.1.4 Autonomia	26
3.1.5 Gabinete	26
3.1.6 Interface	26
3.2 PESQUISA DE MERCADO	26
3.2.1 HOBO MX1101	26
3.2.2 RFRHTemp2000A	27
3.2.3 OMEGA UWRH-2A-NEMA-M12	28
3.2.4 Comparação	29
4 PROJETO	30
4.1 REDE SEM FIO	31
4.1.1 Zigbee	31
4.1.2 Sub-1 GHz	32
4.1.3 LoRa	33
4.1.4 Escolha da rede	34
4.2 MICROCONTROLADOR	35
4.3 SENSOR	36
4.3.1 DHT11 e DHT22	36
4.3.2 HTU21D	37
4.3.3 HDC1080 e HDC2010	38
4.4 GATEWAY	39

4.5	INTERFACE COM O USUÁRIO	40
4.6	ALIMENTAÇÃO	40
4.7	GABINETE	41
5	DESENVOLVIMENTO	43
5.1	REDE SEM FIO	43
5.2	SENSOR	45
5.3	ALIMENTAÇÃO	47
5.4	GABINETE	48
5.4.1	Instalação do sensor	49
5.5	INTERFACE	51
5.6	CUSTOS	54
6	RESULTADOS	56
6.1	TESTES DE CONSUMO	56
6.2	TESTES DE ALCANCE	59
6.3	TESTES DE EXATIDÃO	62
7	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Para a orientação de atividades agrícolas e florestais é fundamental o conhecimento de determinadas variáveis meteorológicas, em especial temperatura, umidade relativa do ar e precipitação. Tais dados são utilizados para melhor execução de atividades como plantio, irrigação e prevenção de eventos que podem resultar em prejuízos financeiros e ambientais, tais como incêndios e geadas (SOARES et al., 2015).

Antes do advento dos microcomputadores, o processo de acompanhamento das variáveis previamente citadas era realizado manualmente, sendo necessária a presença de um profissional qualificado em todas as ocasiões nas quais medidas são coletadas. Porém, de acordo com Soares et al. (2015), com o uso de estações automáticas e remotas esses dados são enviados eletronicamente a uma central onde podem ser tratados por um computador, proporcionando um avanço significativo para as ciências atmosféricas.

Recentemente o uso de sensoriamento sem fio sofreu expansão, principalmente no ambiente industrial, com a utilização de medidores inteligentes conectados à internet, IoT (Internet of Things) e a indústria 4.0 (ALBERT, 2015). Naturalmente, esse conceito também é aplicado na área florestal e na agricultura para o acompanhamento das variáveis. Por esses ambientes apresentarem uma área maior a ser coberta é muito comum o uso de uma rede de sensores sem fio (RSSF), desta maneira há uma comunicação entre os nós, não se limitando a uma comunicação mestre-escravo com a central, portanto o alcance é tão maior quanto a quantidade de pontos aplicados na rede.

Segundo Ojha et al. (2015), o advento das RSSF possibilitou uma nova direção para pesquisas, com estas redes sendo amplamente aplicadas de diversas maneiras, como na irrigação automática, monitoramento de vinhedos e na agricultura de precisão.

Hart e Martinez (2006) destacam que tal sistema sem fios nos permite entender melhor os processos ambientais e pode, também, proporcionar um sistema de alerta para possíveis desastres naturais, como enchentes e incêndios. Segundo os autores, o acompanhamento destas variáveis com um sistema sem fio pode beneficiar, principalmente, áreas remotas e de difícil

acesso, as quais foram poucas vezes estudadas devido à sua inacessibilidade. Corroborando tal ideia, Akyildiz et al. (2002) afirma que os nós podem atuar colaborativamente de modo a contornar obstáculos como árvores e montanhas.

Ainda segundo Hart e Martinez (2006), o que os autores chamam de rede de sensores ambientais pode proporcionar uma revolução similar à gerada pelo uso de satélites na área na década de 1970.

1.1.1 Delimitação do Tema

Desenvolver uma rede de sensores sem fio para a medição de variáveis meteorológicas, de forma a gerar uma solução para o monitoramento destes dados sem necessidade de cabeamento. O uso de redes sem fio é justificável pela área que deve ser monitorada, e pela facilidade de implementação.

As variáveis medidas serão a umidade relativa e temperatura, variáveis básicas usadas em pesquisas meteorológicas.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os principais dilemas enfrentados na construção de uma RSSF estão usualmente centrados em custo e eficiência energética. Segundo Ojha et al. (2015) uma solução de baixo custo é sempre desejável para aumentar o uso e possibilidades das aplicações.

Ainda segundo os autores, a portabilidade é um fator essencial para facilitar a aplicação do sistema, porém isto pode comprometer o custo final da rede. Outro fator que pode influenciar o gasto é a precisão dos sensores, pois usualmente um sensor de alta precisão está associado a um valor elevado.

A elaboração do protótipo traz dificuldades de *hardware* e de *software*. Os principais problemas estão relacionados à integração entre os sensores e o microcontrolador escolhidos e a integração do sistema tanto entre *hardwares* como entre o *hardware* e o usuário final. Ainda deve-se levar em conta a montagem de um protótipo robusto o suficiente para possíveis intempéries climáticas, pois a intenção é de que o sensor funcione livremente em campo aberto.

Quanto à organização da rede os problemas advêm da interferência ou baixo alcance do sistema de transmissão sem fio, da escolha do protocolo de comunicação e da escolha de posição dos nós.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma rede de sensores sem fio para meteorologia florestal, visando a caracterização climática e a orientação de atividades a partir de medições de variáveis meteorológicas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar, por revisão bibliográfica, qual protocolo de rede e quais equipamentos utilizar;
- Desenvolver hardware e software de um protótipo do sensor;
- Implementar o sistema de forma simplificada;
- Testar e avaliar a funcionalidade e viabilidade do sensor desenvolvido.

1.4 JUSTIFICATIVA

Pesquisas na área de meteorologia no Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná (UFPR) atualmente utilizam um equipamento importado de alto custo que, por sua vez, requer conexão física a um computador para que os dados coletados pelo sistema sejam adquiridos pelo pesquisador. Há a necessidade de substituição deste sensor por um de custo reduzido e de tecnologia nacional.

No momento, o equipamento utilizado é o *Data Logger* HOBO H08-003-02 da empresa Onset, o qual armazena valores de umidade relativa do ar e temperatura em intervalos de tempo predeterminados, gravando até 7944 medições (ONSET, 2018b). Uma foto do equipamento pode ser vista a seguir na Figura 1.



Figura 1 – HOBO H08-003-02

Fonte: (ONSET, 2018b)

Segundo a fabricante, o equipamento é originalmente concebido para o uso em ambientes fechados e necessita adaptações para o uso em campo. O mesmo consegue registrar dados na faixa de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-4\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $158\text{ }^{\circ}\text{F}$) para a medição de temperatura e de 25 - 95 %RH para a medição de umidade relativa. O Hobo opera com uma bateria de Lítio (CR-2032) por aproximadamente 1 ano.

Segundo Islam e Wong (2014) a incerteza de temperatura é de $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{RH}$.

A interface com o computador é realizada através de uma saída de 3,5 mm e a porta serial no computador. As medidas podem ser lidas em forma gráfica ou de tabela em um *software* da fabricante.

O objetivo deste trabalho era desenvolver um sistema que possua pelo menos as mesmas características de medição, mas que seja um sistema sem fios, para que sua instalação e operação sejam facilitados.

Outro fator importante é o custo, pois o protótipo deve ser mais barato do que as opções disponíveis no mercado atualmente. Estas opções serão discutidas ao longo do trabalho.

A capacidade de funcionamento sem fio oferece comodidade através de um acesso remoto e em tempo real aos dados de interesse, podendo ser operado à distância.

Tais redes podem ser utilizadas para caracterização de clima e microclima de determinada região, auxiliando assim tanto pesquisas na área meteorológica quanto de agricultura.

Outro benefício proporcionado é a predição e localização de eventos potencialmente

danosos, pois segundo Nunes et al. (2005) os incêndios florestais estão ligados à condição do clima. A temperatura, umidade relativa do ar e a velocidade do vento impactam diretamente a intensidade e velocidade de um incêndio florestal. Logo, essas informações são essenciais para a prevenção e o combate aos incêndios florestais

Para Akyildiz et al. (2002), o uso de uma rede sem fio permite que os sensores possam ser distribuídos em uma floresta de tal forma que seja possível determinar, através das variações de umidade e temperatura detectadas, a exata localização de um eventual incêndio para que este possa ser encerrado em tempo hábil. A mesma premissa pode ser assumida para outros tipos de desastres, tendo assim o potencial de minimizar danos sociais, ambientais e monetários.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A revisão bibliográfica foi realizada por meio de consultas a livros, artigos e periódicos, bem como pesquisa online. Inicialmente se pesquisou sobre as necessidades de exatidão e quais variáveis devem ser medidas. A escolha de hardware foi feita com base em custo, robustez, precisão e disponibilidade, tendo como referência os sensores em uso atualmente e com um foco em aplicações florestais. A rede foi selecionada com base em facilidade de implementação e alcance.

O protótipo foi desenvolvido com o *hardware* escolhido e foi elaborado o *software* para operação e comunicação do sistema. Após a construção foram realizados testes de funcionamento em ambiente controlado, assim como levantamento de dados.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na Introdução, primeira parte do trabalho, é apresentada uma contextualização do tema, suas justificativas e objetivos do trabalho.

A segunda parte engloba fundamentação teórica. É realizada uma revisão literária acerca dos temas cujos conhecimentos são necessários para a realização do projeto, como o processo de medição e as redes de sensores sem fio.

Em seguida, no terceiro capítulo, são descritas as necessidades a serem atendidas e as possíveis opções disponíveis no mercado.

O quarto capítulo trata da definição do projeto e escolha de componentes e protocolos.

No quinto capítulo, foi realizado todo o desenvolvimento do protótipo, tanto de

software quanto de *hardware*.

No sexto capítulo estão descritos os testes realizados e os seus resultados.

Por fim, a conclusão descreve as lições aprendidas e propõe sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Descreve-se, neste capítulo, os conceitos teóricos que norteiam redes de sensores sem fio, internet das coisas, assim como suas principais características. São descritos, também, alguns princípios de sensoriamento.

2.1 IOT

Torna-se cada vez mais frequente que uma rede de sensores sem fio esteja conectada à internet. Devido ao advento de protocolos de redes focados em IoT e da grande aplicação RSSF neste conceito, há também uma crescente intersecção entre ambas as tecnologias.

Dispositivos IoT determinam um cenário em que cada dispositivo se comunica com o outro, de forma a automatizar ambientes residenciais, comerciais e industriais. Para Kamilaris e Pitsillides (2016), IoT se trata de objetos, sensores ou atuadores, para os quais possam ser atribuídos endereços IP e fornecidos a habilidade de transferir dados em uma rede, interagindo com a internet para um determinado fim. Tais equipamentos podem estar associados a segurança, privacidade, confiabilidade e escalabilidade, uma vez que se baseiam em plataformas *onlines*.

De acordo com Al-Fuqaha et al. (2015), o uso de dispositivos IoT possui tendência de crescimento nos próximos anos, sendo utilizados em diversas áreas, como pode ser observado na Figura 2, expondo a projeção de distribuição dessa tecnologia para 2025.

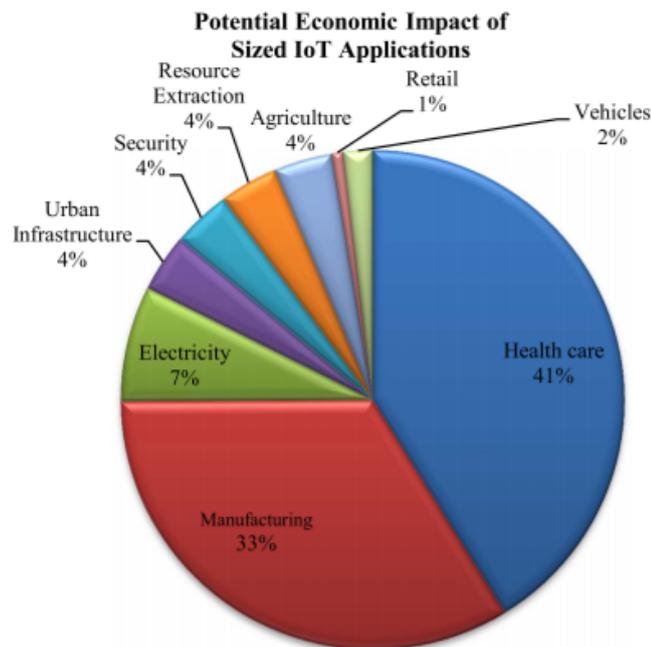


Figura 2 – Distribuição da tecnologia IoT

Fonte: (AL-FUQAHA et al., 2015)

Como pode ser observado, a presença desta tecnologia na agricultura ainda é baixa, área na qual o projeto em desenvolvimento pode encontrar um nicho de aplicação. Para a utilização do equipamento em um ambiente florestal, torna-se fundamental a implementação de uma RSSF para a comunicação entre dispositivos, pois um protocolo sem fio facilitaria o processo de instalação. As características de uma RSSF são descritas a seguir.

2.2 REDE DE SENSORES SEM FIO

Para Akyildiz et al. (2002), o avanço na microeletrônica e na comunicação sem fio proporcionou o desenvolvimento de nós de sensores de maior eficiência e menor porte, o que propicia a redução de custos. Esses sensores coletam, processam e transmitem os dados baseados num esforço colaborativo dos nós do sistema. A Figura 3 representa uma aplicação de uma RSSF:

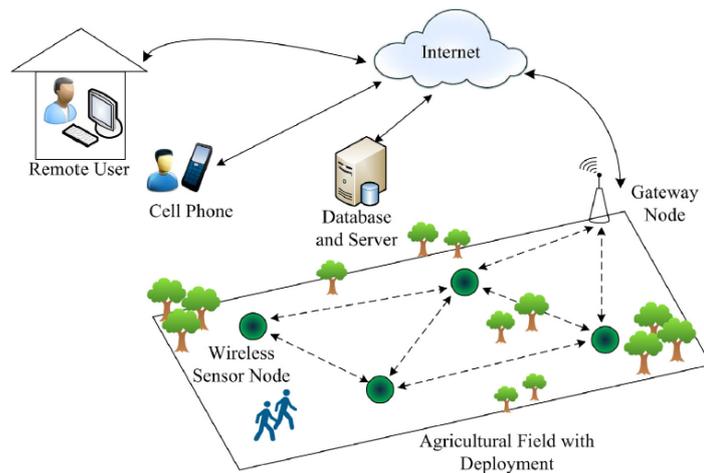


Figura 3 – Aplicação típica de uma RSSF

Fonte: (OJHA et al., 2015)

Segundo Dunkels et al. (2004) e Akyildiz et al. (2002), os dispositivos da rede são, usualmente, limitados em termos de processamento, fator associado ao baixo custo, suas dimensões reduzidas e a fonte de energia dos equipamentos, normalmente limitada e insubstituível devido ao local de instalação. Tais fatores direcionam o foco para a otimização energética em detrimento da qualidade na transmissão de dados, como ocorre em redes tradicionais.

Sendo uma rede de comunicação, uma RSSF está caracterizada também pelos seus nós, sua topologia e seus protocolos. O nó é qualquer dispositivo conectado à rede. Topologia é o nome que se dá à forma com que os nós ficam dispostos em uma rede, define como os componentes estarão conectados e o fluxo de informação (ROSS, 2008). Por fim, um protocolo de comunicação é o conjunto de regras que define como se dará a comunicação e transmissão dos dados, sendo implementados por *software* e *hardware*.

Dos tipos de nós de uma RSSF, podem ser destacados três variações principais, de acordo com Colina et al. (2016):

- Nós de sensores: utilizados para medir as variáveis do ambiente no qual estão contidos e enviar as medições ao nó concentrador ou estação base;
- Nós concentradores: responsáveis por coletar os dados adquiridos pelos demais sensores da rede e enviá-los ao *gateway* que, por sua vez, processa as informações e as envia a uma base de dados que pode ou não estar conectada a internet. Usualmente não possuem sensores como os demais;

- Nós de atuação: em alguns casos, nas redes conhecidas como redes de sensores e atuadores sem fio, há nós de atuação, que possuem a capacidade de modificar a variável medida pelos nós de sensores.

Para o projeto a ser desenvolvido, serão utilizados somente nós de sensores e nós concentradores, uma vez que o objetivo é a medição de variáveis.

Os protocolos de comunicação normalmente dividem seus padrões em camadas, especificando as informações que deverão ser providas por cada uma delas. Os dois principais modelos de padrão são o OSI/ISO (sete camadas) e o TCP/IP (quatro camadas) (KOZIEROK, 2005). Os protocolos dependem da configuração da rede, e também de seu aspecto físico de implementação.

De acordo com Zheng e Jamalipour (2009) e o que foi citado anteriormente, podem-se resumir as características e restrições que definem uma RSSF:

- Sensores alimentados por baterias, com fonte de energia finita e normalmente de difícil substituição ou recarga;
- Por terem capacidade de armazenamento e de processamento limitados e, também, por serem expostos a um ambiente hostil, são suscetíveis a falhas e danos;
- A topologia deve ser autoconfigurável, devido a variação na distribuição dos nós durante a instalação, e deve se adaptar constantemente pois ocorrem mudanças frequentes na topologia devido a perdas e adições de sensores ou falhas de comunicação entre os nós;
- É uma rede destinada a aplicações específicas, com requisitos diferentes de alcance, variáveis e atuações para cada caso;
- Usualmente não utiliza identificação global devido ao grande número de sensores, algo que geraria dificuldades na manutenção dos endereços;
- Devido a concentração de nós em uma região de maior interesse para a aplicação, pode haver redundância nos dados obtidos.

2.3 SENSORES

Uma parte essencial do desenvolvimento de uma RSSF é o sensoriamento. Para isso, faz-se necessário abordar importantes conceitos em relação a sensores e as medições realizadas pelo dispositivo.

De acordo com o vocabulário internacional de termos gerais e fundamentais da metrologia (VIM), um sensor é um elemento de medição afetado diretamente por um fenômeno contendo a grandeza a ser avaliada (BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2010).

Ainda segundo Brusamarello e Balbinot (2010), faz-se necessário categorizar os sensores de forma que estudá-los de maneira metódica seja possível. Agrupam-se, então, em relação a necessidade de fonte de alimentação, em sensores ativos e passivos.

Um sensor é considerado passivo quando não necessita de energia externa para sua atuação, uma vez que a potência do sinal de saída de um sensor tem origem somente na entrada. Exemplo desses é o termopar, que geram diferença de potencial única para cada entrada de temperatura.

Diferente do anterior, um sensor ativo requer uma fonte de energia externa para seu desempenho, denominada sinal de excitação. Esse é modificado no decorrer da operação do sensor de modo a moldar o sinal de saída. Além disso, sensores ativos têm a característica de adicionar energia ao ambiente de medida.

2.3.1 Princípios de Sensoriamento

De acordo com Brusamarello e Balbinot (2010), durante o processo de medição de variáveis, a proximidade entre o valor medido pelo instrumento e o valor verdadeiro da grandeza física em questão corresponde a exatidão de medição, ou seja, um equipamento pode ser considerado mais exato quando há incerteza menor em suas medições. A exatidão é um conceito qualitativo, não podendo ser representado numericamente como uma grandeza.

O grau de proximidade entre os valores medidos por um instrumento em um processo de medição é chamado precisão, isto é, quanto menor a discrepância entre os valores medidos, independentemente do valor verdadeiro, mais preciso é o equipamento. A precisão é um conceito quantitativo, podendo ser representado por medidas de dispersão, tal como desvio padrão (BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2010).

A menor variação da grandeza física medida que induz uma modificação na indicação do instrumento é chamada resolução, ou seja, a variação do indicador do dispositivo quando o dígito menos significativo sofre alteração de uma unidade (BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2010).

Segundo Brusamarello e Balbinot (2010), a sensibilidade de um instrumento de medidas corresponde a razão entre a variação na indicação do dispositivo e a variação do sinal

de entrada, isto é, da grandeza medida.

2.4 CONCLUSÃO

A partir dos conceitos apresentados neste capítulo, justifica-se a implementação desta tecnologia no projeto. Ele deve possuir as características citadas na seção 2.2 e 2.3.

Analisa-se, no capítulo seguinte, os requisitos da aplicação no presente trabalho, bem como a viabilidade de identificar no mercado uma solução comercial que os atenda, dentro ou fora do conceito de RSSF.

3 ESPECIFICAÇÕES E PESQUISA DE MERCADO

Para o desenvolvimento do projeto, é necessário especificar seus requisitos e buscar soluções para RSSF já disponíveis no mercado.

3.1 ESPECIFICAÇÕES

Aqui são descritas as especificações mínimas necessárias para a utilização do sensor pelo Departamento de Ciências Florestais da UFPR na substituição do sistema HOBO H08-003-02.

3.1.1 Variáveis

As variáveis elementares para esta aplicação são temperatura e umidade relativa do ar. O intervalo de medição deve ser variável e de, no máximo, uma hora.

3.1.2 Características de Medição

As características de medição devem ser similares às do sistema utilizado atualmente. Incerteza de $\pm 0,2$ °C para a temperatura e de ± 3 %RH para a umidade relativa. O intervalo de medição para a primeira variável de -20 a 70 °C e de 25 - 95 %RH para a umidade relativa do ar.

3.1.3 Alcance

O alcance necessário para a aplicação atual é de 10 m, para que seja possível a caracterização da distribuição de temperatura e umidade ao longo de uma área florestal de forma aceitável. Será considerada uma extrapolação em relação ao alcance, a fim de atender situações distintas, como pesquisas que necessitem maior alcance ou aplicações na agroindústria. A distância entre a floresta estudada e o local onde se encontrará o nó central também deve ser levada em consideração na escolha da rede. Consideramos para este caso uma distância de 100m, porém, a maximização desta distância traria maior conforto ao pesquisador.

3.1.4 Autonomia

A autonomia mínima da bateria deve ser de um mês, sendo que a maximização deste tempo traria menor esforço de manutenção e mais comodidade ao operador, uma vez que os sensores serão utilizados em áreas remotas e de difícil acesso.

3.1.5 Gabinete

O sensor deve operar em ambiente florestal, portanto, deve ter um mecanismo de proteção a chuva e a pequenas partículas. Logo, segundo Brusamarello e Balbinot (2010), características equivalentes a uma certificação *Ingress Protection* (IP) de, no mínimo, IP33.

3.1.6 Interface

Em um primeiro momento, as informações serão acessadas localmente via computador, provendo acesso aos dados coletados de forma gráfica e organizada. Posteriormente, pode-se aprimorar a rede implementando acesso via internet, possibilitando ao usuário a consulta aos dados através de qualquer lugar e qualquer aparelho conectado à internet.

3.2 PESQUISA DE MERCADO

Através das características necessárias, buscou-se no mercado produtos que atendam as especificações anteriormente descritas.

3.2.1 HOBO MX1101

Este produto seria o sucessor do utilizado no momento pela UFPR. Trata-se de um *Data Logger* que mede as mesmas variáveis, temperatura e umidade relativa, porém exibindo as informações em um visor e fazendo a transmissão de dados através da comunicação *Bluetooth Low Energy* (BLE) para um dispositivo móvel compatível (Android ou iOS) a uma distância de até 30 metros e possui certificação IP50 (ONSET, 2018a). Uma foto do produto, demonstrando sua interface com o usuário, se encontra na figura 4.

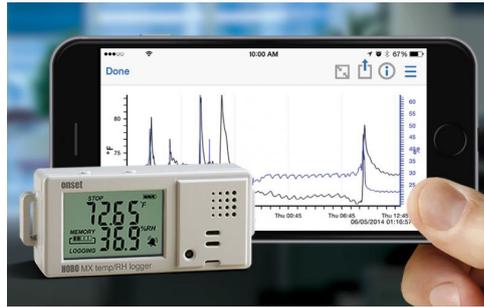


Figura 4 – HOBO MX1101

Fonte: (ONSET, 2018a)

O sensor opera numa faixa de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-4\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $158\text{ }^{\circ}\text{F}$) para medição de temperatura e de 1 \%RH a 90 \%RH para medição de umidade. Sua precisão é de $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\pm 2\text{ \%RH}$ e pode armazenar até 84000 medidas com uma autonomia de 1 ano (2 pilhas AAA). A resolução do sensor é $0,024\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,01\text{ \%RH}$. O produto foi encontrado na internet por valores entre US\$135 e US\$180.

3.2.2 RFRHTemp2000A

Assim como os dispositivos descritos anteriormente, este se trata de um *Data Logger* projetado com sensores de umidade relativa e temperatura através de *Resistance Temperature Detector* (RTD). Assim como o HOBO MX1101, apresenta as medições em um visor, podendo transmiti-las através do transceptor *wireless* RFC1000, para um computador central a uma distância de até 610 m, aproximadamente, de modo a facilitar o acesso à informação para o usuário. Em relação a temperatura, o instrumento opera na faixa de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Exatidão calibrada em $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na faixa de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Resolução em $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Em relação a umidade relativa do ar, o dispositivo opera entre 0 e 95 \%RH . Exatidão calibrada em $0,5\text{ \%}$ nas faixas de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 10 \%RH a 90 \%RH (MICRODAQ, 2015).

O equipamento opera com o *software* MadgeNET, sob frequência de $2,45\text{ GHz}$ dentro do protocolo IEEE 802.15.4. Possui memória para armazenagem de 16128 medições, podendo realizá-las entre intervalos que podem variar de 1 segundo a 24 horas. A alimentação é feita através de bateria de lítio de 9 V com autonomia de 3 anos caso os intervalos entre medições sejam de 1 minuto (uso padrão) (MICRODAQ, 2015). O produto, que está disponível por US\$ 299, pode ser visto na Figura 5.



Figura 5 – RFRHTemp2000A

Fonte: (MADGETECH,)

3.2.3 OMEGA UWRH-2A-NEMA-M12

O OMEGA UWRH-2A-NEMA-M12 é um transmissor de temperatura e umidade relativa do ar industrial e sem fio com certificação IP65. Utilizando frequência de 2,4 GHz, com protocolo IEEE 802.15.4, tem um alcance de até 120 m (OMEGA, 2015b). O equipamento pode ser visto Figura 6.



Figura 6 – OMEGA UWRH-2A-NEMA-M12

Fonte: (OMEGA, 2015b)

Segundo a fabricante, no processo de medição da temperatura o instrumento opera na faixa de -10 °C a 70 °C e resolução em 0,1 °C. Para a umidade relativa do ar, o dispositivo

opera entre 2 %RH e 98 %RH com exatidão de $\pm 2,5$ %RH de 20 %RH a 80 %RH e $\pm 3,5$ %RH abaixo de 20 %RH e acima de 80 %RH (OMEGA, 2015a).

O equipamento possui uma bateria de lítio de 3,6 V que dura 3 anos com um intervalo entre medidas de um minuto. O OMEGA UWRH-2A-NEMA-M12 está disponível nacionalmente por R\$ 2.315.

3.2.4 Comparação

Os equipamentos citados atendem a grande parte das especificações necessárias. Em contrapartida, possuem custo elevado, dificultando a aquisição para troca do produto utilizado atualmente. Outro fator importante é que estes dispositivos não funcionam em rede, fugindo do escopo de uma de uma RSSF e dificultando a coleta de dados por vários sensores para análise de uma determinada área.

Tabela 1 – Comparação entre equipamentos

Equipamento	Protocolo Wireless	Alcance	Autonomia	Preço
HOBO MX1101	BLE	30 m	1 ano	U\$ 180
RFRHTemp2000A	IEEE 802.15.4 a 2,45 GHz	610 m	3 anos	U\$ 299
OMEGA	IEEE 802.25.4 a 2,4 GHz	120 m	3 anos	R\$ 2.315

Fonte: Autoria Própria

Portanto, valida-se a necessidade de um protótipo que atenda as especificações, atue em rede e possua um custo menor.

4 PROJETO

Com base nos equipamentos disponíveis no mercado, em especial o *Data Logger* HOBO H08-003-02, da empresa ONSET, definiram-se algumas das especificações do protótipo a ser construído. A partir destas especificações foi realizada uma pesquisa de soluções e componentes disponíveis, para definir o projeto a ser desenvolvido.

O protótipo consiste de uma rede com três nós, sendo um concentrador e dois nós adjacentes. Cada nó adjacente da rede contará com um sensor de temperatura e umidade, e o concentrador terá uma conexão serial, via USB, com um módulo Raspberry Pi como *gateway* para interface com o usuário.

A figura 7 representa o diagrama do projeto, com seus componentes e suas integrações.

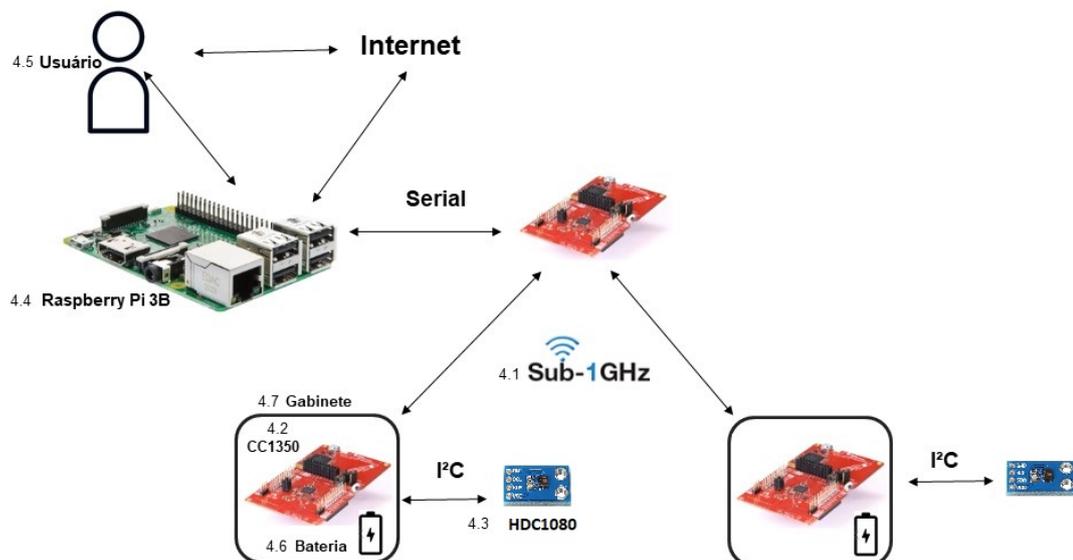


Figura 7 – Projeto a ser desenvolvido

Fonte: Autoria Própria

O protocolo escolhido para a rede de sensores foi o Sub-1 GHz e, para sua implementação, será utilizado o LaunchPad CC1350 da Texas Instruments (TI). O sensor

escolhido foi o HDC1080, também da TI, que utiliza o protocolo I²C para comunicação, tal protocolo é suportado pelo LaunchPad. A comunicação entre o Raspberry Pi e o LaunchPad concentrador será feito através de serial sobre USB, e no Raspberry serão desenvolvidas as funções de *data logger* e interface. Para proteção e alimentação do sistema, serão utilizados um gabinete e uma bateria, respectivamente.

A seguir são listadas todas as etapas de desenvolvimento para escolha dos componentes.

4.1 REDE SEM FIO

Tratando-se de uma rede sem fio, é necessária a escolha de um protocolo para a comunicação levando em consideração os aspectos que caracterizam uma RSSF e as especificações do produto. Para tal foram consideradas diversas redes, listam-se a seguir as três mais relevantes para o projeto.

4.1.1 Zigbee

O Zigbee é um protocolo criado para desenvolver aplicações de IoT com baixo consumo de energia e baixo custo, sendo uma rede do tipo *low-rate wireless personal networks* (LR-WPANs). O protocolo é baseado na camada física dentro do protocolo IEEE 802.15.4 que, teoricamente, garante taxa de transmissão de 250 kbps na frequência de 2,4 GHz (FERRARI et al., 2007). As camadas superiores da OSI/ISO são descritas por padrões da Zigbee Alliance, uma organização de empresas de diversos segmentos responsáveis pelo protocolo (ALLIANCE, 2018).

Em uma rede Zigbee, existem três tipos de nós possíveis. Os dispositivos chamados *full function devices* (FFD) podem ser nós do tipo roteador ou coordenador, e os dispositivos denominados *reduced function devices* (RFD) podem ser nós do tipo *end device*. Os dispositivos FFD são mais completos e podem se comunicar com todos os outros dispositivos da rede. A diferença entre um nó do tipo coordenador e roteador é que, diferente do segundo, o primeiro pode criar a rede. Os dispositivos RFD são mais simples e destinados para coleta de dados, não atuam na administração da rede e podem se comunicar apenas com um dispositivo FFD (FERRARI et al., 2007).

Uma rede Zigbee pode operar em três tipos de topologia de rede: em estrela, em *cluster* ou mista. A topologia em estrela requer um nó FFD coordenador e os outros nós

RFD conectados a ele, pois nesta topologia os nós só se comunicam com um nó principal. A topologia cluster tem um nó FFD coordenador, outros nós FFD roteadores e RFD conectados a ele, possibilitando o aumento de alcance da rede. Já a topologia mista, também chamada de *mesh*, é uma combinação da topologia em estrela e *cluster*, em que cada nó pode se comunicar livremente com qualquer outro nó da rede, aumentando a capacidade de adaptação (FERRARI et al., 2007).

A rede Zigbee é uma das redes com menor consumo energético para transmissão de dados e, por isso, possui um alcance menor, por volta de 100 m. Este problema pode ser contornado pela possibilidade de utilização de uma rede *mesh*.

4.1.2 Sub-1 GHz

Sub-1 GHz é o nome que se dá a um meio de comunicação em rádio frequência que opera em frequências menores que 1 GHz, como 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz. A utilização destas frequências baixas facilitam a propagação das ondas e diminui os efeitos de interferência, ao passo que a maioria dos protocolos utiliza a faixa de frequência *Industrial, scientific and medical* (ISM) de 2,4 GHz/5 GHz, como o protocolo Wi-Fi (IEEE 802.11 a/b/g/n) (AUST et al., 2012).

A desvantagem do Sub-1 GHz em relação a estas redes é que sua taxa de transmissão de dados é menor, uma vez que trabalha em frequências inferiores. Porém, devido às suas características, possui um maior alcance de rede com menor consumo de energia. Estas frequências ainda se encontram na faixa ISM e, portanto, não há necessidade de licenciamento ou questões regulamentares (AUST et al., 2012).

Os alcances de uma rede Sub-1 GHz podem chegar a até 100 km, mas, usualmente, atinge-se um raio de cerca de 25 km em aplicações reais. Para aplicações em que é necessário um maior fluxo de dados, esse alcance é ainda menor, pois há uma correlação entre a taxa de transmissão, alcance e consumo de energia (LETHABY, 2017).

Os protocolos de camada física para Sub-1 GHz normalmente são baseados no protocolo IEEE 802.15.4. Dentre as vantagens deste protocolo estão a possibilidade de funcionamento na topologia *mesh*, baixo consumo energético, possibilidade de operar com grande quantidade de nós, comunicação confiável e um grande alcance (ZHENG; JAMALIPOUR, 2009).

Normalmente, nos equipamentos de Sub-1 GHz, somente os protocolos de camada física são determinados, sendo necessária a escolha de outros protocolos para as demais

camadas para que seja estabelecida uma rede funcional (LETHABY, 2017). Esta necessidade é um fator que dificulta a implementação de soluções comerciais práticas. Os sistemas para uma tecnologia Sub-1 GHz podem ser, por exemplo, Sigfox, TI 15.4-Stack ou Contiki.

Sigfox é um provedor de rede focado em IoT que fornece todos os protocolos necessários para implementação de uma RSSF. A sua utilização com a tecnologia Sub-1 GHz pode alcançar distâncias de comunicação de até 30 km, mas com taxas de transmissão de dados de apenas 100 bps. Outra desvantagem, além da baixa taxa de transmissão e de ser um serviço pago, é a dificuldade do Sigfox em transmissões bidirecionais, dificultando o uso em redes com sensores e atuadores (LETHABY, 2017).

O TI 15.4-Stack é uma solução proprietária da Texas Instruments e está limitada à topologia estrela, possui alcance de alguns quilômetros e tem um grande foco em eficiência energética. É implementada através do software *SimpleLink* (LETHABY, 2017).

Por fim, o Contiki é um *real time operating system* (RTOS) *open source* para IoT que oferece suporte a uma variedade de *hardwares* e possui uma comunidade de desenvolvedores ativa, facilitando a integração do sistema (CONTIKI, 2018). Ao programar um equipamento com o Contiki, está embutido nesse sistema operacional toda a operação da rede sem fio e protocolos necessários. Este sistema traz suporte a redes Sub-1GHz em *mesh* e estrela.

4.1.3 LoRa

LoRa é uma tecnologia de camada física utilizada para comunicações sem fio de longo alcance. As frequências de comunicação são similares às do Sub-1 GHz, variando entre 460 MHz a 928 MHz, dependendo da localização. Estas frequências se encontram dentro da banda ISM, sendo a primeira implementação de baixo custo para uso comercial. A modulação utilizada pelo LoRa, de espalhamento espectral em *chirp* (sinal cuja frequência se altera no decorrer do tempo), tem sido bastante utilizada em comunicação militar e espacial, uma vez que esta possui a vantagem de possuir um alcance extremamente longo, com boa imunidade contra interferências pela sua robustez (ALLIANCE, 2015).

Para as outras camadas de rede que fazem uso do LoRa, normalmente se utilizam os protocolos do LoRaWAN. Este tipo de rede permite a construção de uma topologia estrela-de-estrelas, em que um nó repetidor pode se comunicar com outros nós abaixo dele e a um *gateway* concentrador. Isto é definido também pelos três tipos de nós de uma rede LoRaWAN definidos abaixo (MARAIS et al., 2017):

- Classe A: nós de sensores, com comunicação em tempos aleatórios;
- Classe B: extensão da classe A, possuindo capacidade de transmissão e comunicação em tempos determinados;
- Classe C: Nós concentradores, que dispõem da característica de estar sempre disponível para receber dados, exceto quando está transmitindo.

Embora o LoRaWAN seja um protocolo aberto, o LoRa é proprietário da Semtech, única fabricante de circuitos integrados com esta tecnologia (MARAIS et al., 2017).

4.1.4 Escolha da rede

Ao analisar as redes citadas, entende-se como a mais pertinente a Sub-1GHz, pois, por operar em frequências menores, é possível alcançar maiores raios de atuação e contornar obstáculos de forma facilitada, além de diminuir o problema de interferência, fato importante visto que a rede desenvolvida estará distribuída dentro de uma floresta. A queda na taxa de transmissão resultante das frequências menores não afeta o projeto, uma vez que taxa de geração de dados é baixa, se tratando apenas de medições dos sensores.

Essa escolha foi feita, em detrimento do ZigBee, por motivos de alcance e pela disponibilidade da rede, uma vez que o ZigBee opera em frequências maiores (2,4GHz) e necessitaria diversos pontos intermediários a fim de cobrir a mesma área. Também possui a desvantagem de estar sujeito a maior interferência devido ao espectro de frequência. Já em relação ao LoRa os fatores analisados foram o fato deste se tratar de um protocolo fechado, necessitando de componentes de um fabricante específico. Mas o principal fator é que o protocolo LoRaWAN só funciona em topologia estrela, e a possibilidade de se utilizar uma rede *mesh* em Sub-1 GHz, no caso de uma RSSF com muitos nós, é um grande atrativo devido a ampliação de alcance, da capacidade de contornar obstáculos e a redução de falhas na rede devido a possíveis problemas em um nó concentrador.

Para a implementação da rede Sub-1 GHz será utilizado o Contiki. Segundo Dunkels et al. (2004), os idealizadores do projeto, o RTOS foi desenvolvido como um sistema que demanda baixa capacidade de processamento, otimizado para o baixo consumo de bateria dos nós de uma RSSF e de fácil integração com demais dispositivos, uma vez que suporta diversos equipamentos de múltiplos fabricantes. Portanto não fica atrelado a equipamentos e *softwares* do mesmo fornecedor, como é o caso da TI 15.4-Stack.

Segundo Sarmiento e Romero (2013), o Contiki atualmente utiliza a nova versão do protocolo IP, o IPv6, que permite maior quantidade de endereços e maior suporte a entrega dos dados em tempo real, facilitando assim a integração dos dispositivos com a internet.

Para a operação de uma rede em Sub-1 GHz é necessário um rádio e um microcontrolador compatível com tal rede, componente analisado na próxima seção.

4.2 MICROCONTROLADOR

A fabricante Texas Instruments oferece microcontroladores com a tecnologia de transmissão de rádio já embarcada, tal tecnologia - criada para aplicações de redes de sensores e IoT - contempla os equipamentos com Sub-1 GHz e facilita a integração e comunicação dos sensores.

Dentre estes microcontroladores encontra-se o CC1350. Esse microcontrolador foi desenvolvido para apresentar um baixíssimo consumo de energia, possuindo um processador voltado a sensoriamento que pode atuar de forma independente, otimizando o consumo energético quando não está transmitindo.

Para fins de protótipo, será utilizado o *LaunchPadTM development kit*, visto na Figura 8, uma plataforma da TI para prototipagem e desenvolvimento, que facilita o processo de programação e sua interface. O LaunchPad oferece conexão serial através de USB, simplificando assim, a interação entre usuário e microcontrolador. Essa placa de desenvolvimento tem o custo de US\$29 e é entregue no Brasil pela TI EUA.

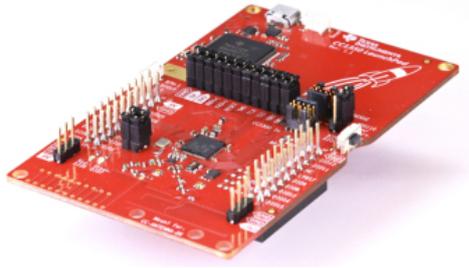


Figura 8 – LaunchPad CC1350

Fonte: (INSTRUMENTS, 2018c)

Para um produto final, pode ser usado apenas o chip do microcontrolador, cujo custo é significamente inferior, próximo a US\$3. No entanto, neste seriam necessários um projeto da placa e sua montagem, trazendo complexidade ao produto.

A programação do equipamento é feita através da linguagem C, cuja utilização é vasta e comum a programação de microcontroladores, facilitando a criação de projetos no *software* Code Composer da TI, que oferece depuração e fácil conexão com os *LaunchPads*. O Contiki oferece suporte ao LaunchPad.

4.3 SENSOR

A partir das especificações de medição do *data logger* HOBO, foram pesquisadas diversas opções de sensores para a aplicação deste trabalho.

Para a determinação de um sensor de temperatura é preciso conhecer os diferentes métodos de medição desta variável para que possa ser medida eletricamente. Alguns dos tipos mais comuns de sensores de temperatura são: termorresistores, que funcionam através da associação entre o valor da resistência elétrica do componente e a temperatura em que esse se encontra; termopares, com medição da força eletromotriz gerada pela diferença de temperatura de junção em dois metais, através do efeito de Seebeck; sensores de infravermelho, que medem temperatura sem contato, através da leitura da radiação eletromagnética emitida por um corpo.

Já para medição de umidade relativa, encontrou-se três tipos principais de sensores: higrômetros elétricos, baseados na variação de resistência através de umidade; sensor capacitivos, que permitem que o vapor de água presente no ar penetre o material dielétrico, alterando a capacitância do dispositivo e, com isso, medindo o índice de umidade; psicrômetros, esses sensores possuem dois termômetros lado a lado, um com o bulbo seco e outro com o bulbo úmido e, devido a evaporação da água, o segundo termômetro indicará uma temperatura menor do que o outro, sendo que o princípio deste instrumento é que quanto maior for a diferença entre os resultados de ambos os dispositivos, mais seco estaria o ar naquele ambiente.

Como umidade relativa do ar e temperatura são variáveis interdependentes, usualmente um mesmo sensor eletrônico é capaz de fornecer medições de ambas as grandezas. Este tipo de sensor será utilizado no trabalho, de modo a facilitar as conexões elétricas e diminuir o número de componentes e, por consequência, o custo. A seguir são listados os principais sensores encontrados no mercado e a justificativa de escolha do modelo HDC1080.

4.3.1 DHT11 e DHT22

São sensores comumente usados em projetos para medição destas variáveis. São fabricados pela Aosong Electronics Co. e estão disponíveis facilmente em diversas versões

e podem ser encontrados por preços que variam de 3 a 12 reais, no caso do DHT11, e de 10 a 32 reais para o DHT22. São muito utilizados em projetos amadores ou onde a medição não necessita ter grande nível de precisão.

A faixa de medição do DHT11 se dá entre 20 - 90 %RH (± 5 %RH a 25 °C) e 0 a 50 °C (± 2 °C) com resolução de 16 bits, a comunicação é serial, *single-bus*. Portanto, não atende a necessidade do projeto para as medições necessárias.

O DHT22 é similar ao DHT11, porém apresenta maior qualidade de medição, associada a um preço mais elevado em relação ao DHT11. A faixa de medição se dá entre 0 - 99.9 %RH (± 2 %RH a 25 °C) e -40 a 80 °C ($\pm 0,5$ °C a 1 °C) com resolução de 16 bits, a comunicação é serial, *single-bus*. Em modo repouso, o sensor utiliza 15 μ A e 500 μ A quando medindo. O equipamento pode ser alimentado com tensões entre 3,3 e 5,5 V.

4.3.2 HTU21D

O HTU21D é um sensor de temperatura e umidade fabricado pela TE Connectivity, o sensor pode ser observado na Figura 9. É encontrado por valores próximos a US\$ 1,70 em sites chineses já em placa soldada, facilitando a sua utilização. A sua resolução de medição varia de 8/12 bits (0,7 %RH e 0,04 °C) a 12/14 bits (0,04 %RH e 0,01 °C) para umidade relativa e temperatura, respectivamente. Em *sleep mode* o sensor apresenta consumo típico de 20 nA e em 450 μ A quando está medindo e pode ser operado com tensões entre 1,5 e 3,6 V.



Figura 9 – HTU21D

Fonte: (ELETRÔNICA, 2018)

A comunicação é feita através da interface I²C, um protocolo que segundo Corcoran (2013), se baseia em barramento de dois fios para comunicação, podendo ter diversos dispositivos, classificados como mestre ou escravo. Os dispositivos conectados ao barramento são acessados através de um endereço, facilitando a integração de dispositivos compatíveis.

As medições de umidade do ar ocorrem entre 0 e 100 %RH com ± 2 %RH de precisão típica, já as medidas de temperatura ocorrem entre -40 e 125 °C com precisão de $\pm 0,3$ °C. A precisão da medição de temperatura deste sensor é um pouco inferior à do HOB0 H08-003-02 e das especificações necessárias, mas o baixo custo e consumo tornam o HTU21D uma opção atrativa.

4.3.3 HDC1080 e HDC2010

Estes sensores são produzidos pela Texas Instruments, medem temperatura e umidade relativa e também se comunicam com protocolo I²C. O HDC1080, visto na Figura 10, tem faixa de medição entre 0 - 100 %RH (tipicamente ± 2 %RH) para umidade e -40 a 125 °C (tipicamente $\pm 0,2$ °C) para temperatura, com resolução de 14 bits. Já o HDC2010, visto na Figura 11, 0 -100 %RH (tipicamente ± 2 %RH) e -40 a 80 °C (tipicamente $\pm 0,2$ °C), também com resolução de 14 bits. Fotos dos sensores podem ser vistos a seguir:



Figura 10 – HDC 1080

Fonte: (INSTRUMENTS, 2016)



Figura 11 – HDC 2010

Fonte: (INSTRUMENTS, 2018b)

Os equipamentos possuem um baixo consumo de energia, 1,2 μ A com 1 medição por segundo e 100 nA em *sleep mode* para o HDC1080 e 500 nA com 1 medição por segundo e 50 nA em *sleep mode* para o HDC2010.

Ambos os sensores são componentes *Surface Mounting Device* (SMD) avulsos e, por isso, necessitam de uma placa extra para utilização, uma vez que o mesmo precisa estar afastado do microcontrolador para obter para obter as variáveis ambientais e não do sistema em si. Os encapsulamentos são muito pequenos, com uma distância de pinos de 0,5 mm, o que dificulta a realização da soldagem pela equipe.

O HDC1080 pode ser encontrado na internet já soldada em placa, por aproximadamente US\$ 4,00. O HDC2010 foi encontrado apenas avulso. Outra vantagem da placa do sensor é que ele já acopla os resistores de pull-up necessários para operação do protocolo I²C.

Embora maior do que o HDC2010, o HDC1080 também possui um baixo consumo

energético, e possui todas as suas características de medição dentro de nossas especificações. Por ser vendido em uma placa pronta, facilitando assim sua instalação, este será o sensor escolhido.

4.4 GATEWAY

Para a interface entre a rede de sensores e o usuário é necessário um *gateway*, este dispositivo acessa os dados obtidos pela rede Sub - 1 GHz e o converte para que o usuário possa acessar através de um outro meio, no caso, um computador. No *gateway* será necessário um sistema para armazenar os dados adquiridos para que estes não se percam se houver alguma falha na rede, adicionando a função de *data logger* ao sistema.

A opção mais simples é a utilização de um nó a mais do mesmo microcontrolador com um leitor de cartão microSD para o armazenamento dos dados. A conexão com o computador pode ser feita através de comunicação serial. Uma grande desvantagem desse sistema é que o usuário necessita de conexão física a um nó ou retirar o cartão de memória para leitura.

Outra opção é a utilização de um microcontrolador MSP432E401Y, também da TI. Esse equipamento pode fazer uma conexão do sistema com a Internet através de uma saída RJ45. Desta maneira é possível implementar uma rede IoT, possibilitando o acesso dos dados remotamente. Os dados podem ser armazenados ou em um cartão SD, como no caso anterior, ou diretamente na nuvem.

No entanto, a opção escolhida é a integração entre um nó da rede, o concentrador, e um Raspberry Pi via serial com um cabo USB. O Raspberry Pi é um computador compacto e de baixo custo, de fácil utilização e com maior disponibilidade. Portanto, será possível fazer a integração com a internet, assim como no caso anterior. Para o projeto será usado um Raspberry Pi 3B, Figura 12, pois a equipe já possui o equipamento.



Figura 12 – Raspberry Pi

Fonte: (PI, 2018)

Esta integração apresentaria maiores vantagens, uma vez que o dispositivo Raspberry Pi pode permanecer ligado ininterruptamente devido ao seu baixo consumo energético, possibilitando uma experiência remota ao usuário, em consequência da fácil integração com a internet. Por permitir a instalação de diversos tipos de programas e sistemas, possibilita diversas opções de interface.

Além disso, a utilização de um *gateway* com IPv6 permite que o software supervisor e de banco de dados sejam executados em qualquer computador que tenha acesso à internet, o que torna a opção bastante flexível, econômica e escalável.

4.5 INTERFACE COM O USUÁRIO

Entende-se que, para a interface do usuário, o simples acesso aos dados coletados através de um banco de dados não é suficiente. Para que seja possível uma melhor usabilidade, visa-se a utilização de uma interface gráfica - com possibilidade de acesso através da internet - com tabela contendo a identificação do nó, a medição das variáveis umidade relativa, temperatura e tempo, além de um gráfico temporal acompanhando as variáveis citadas.

4.6 ALIMENTAÇÃO

Para a definição de bateria são necessários testes empíricos com o sistema em funcionamento, uma vez que não se tem facilmente disponíveis os dados de consumo do LaunchPad, que será usado no protótipo, assim como não se sabe o período de atividade do controlador em cada ciclo. No entanto, todos os componentes foram escolhidos de modo a consumir a menor quantidade de energia possível, a fim de se atender a especificação de um

mês.

Uma opção é a alimentação do sistema por energia solar, através de painéis fotovoltaicos. É uma solução mais complexa e de maior custo, no entanto, traria grande aumento de autonomia e agregaria uma tecnologia sustentável ao projeto. Um fator que desfavorece esta opção é o fato dos equipamentos se encontrarem em um ambiente de floresta fechada, sem a incidência de luz direta, o que reduz a eficiência da geração. No entanto, utilizou-se essa estratégia.

4.7 GABINETE

Essa especificação apresenta desafios, uma vez que o equipamento precisa estar protegido, de forma a impedir danos a seus componentes eletrônicos, ao mesmo tempo em que deve ser exposto ao meio de forma a realizar leituras fidedignas das variáveis desejadas.

Para cumprir os requisitos especificados, têm-se duas opções: o uso de uma estrutura pré-fabricada genérica ou o projeto e construção de um modelo através de uma impressora 3D.

Para redução de custos, escolheu-se utilizar caixas de passagens pré-fabricadas. A opção escolhida é demonstrada na Figura 13. A estrutura possui dimensões apropriadas ao projeto (154 mm x 110 mm x 70 mm) e, quanto ao grau de proteção, possui certificação IP 54, ou seja, os equipamentos dentro da estrutura estarão protegidos contra depósitos de poeira e jatos d'água provindos de qualquer direção. O custo da caixa foi de R\$ 45.



Figura 13 – Caixa de passagem

Fonte: (STECK, 2017)

Optou-se por uma alternativa que apresentasse transparência para que a alimentação do sistema através de painéis fotovoltaicos seja possível e segura, conforme descrito anteriormente.

A estrutura ainda necessita de adaptação para expor o sensor ao ambiente, de forma a permiti-lo a realização de leituras mais fidedignas.

5 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, serão descritos os processos realizados durante a execução do protótipo.

5.1 REDE SEM FIO

Os testes e o desenvolvimento da rede sem fio foram realizados em etapas, todas através do RTOS Contiki.

Para aplicar uma rede funcional, o RTOS utiliza 6LoWPAN (*IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks*). De acordo com Lethaby (2017), esse protocolo permite que dispositivos com baixo poder de processamento possam se comunicar diretamente com qualquer outro que tenha um endereço IP, permitindo a inserção da rede na Internet.

O primeiro teste de rede foi a realização da troca de pacotes UDP (*User Datagram Protocol*) entre dois *LaunchPads*, implementando a camada de transporte. UDP foi utilizado em detrimento de TCP pois a não confiabilidade da rede é uma característica muito frequente em RSSF, como visto anteriormente. Segundo Colina et al. (2016), diferente do protocolo de transporte TCP, o UDP não realiza o processo de desfragmentação da mensagem ao enviar e ao remontar no recebimento, desta maneira, aplicações que necessitam de redução do tempo de processamento e do consumo energético podem se beneficiar do uso do protocolo UDP. Outra característica desta rede é que a mesma não necessita do processo de *handshake*, elevando a autonomia.

Em seguida, foi necessário implementar o *gateway*. Para tal, o nó concentrador foi programado, também através do RTOS, para fazer a distribuição de IPs para os nós da rede e receber os dados dos mesmos, funcionando como um *Border Router 6LoWPAN*. Este nó foi conectado ao Raspberry Pi, responsável pela interface entre a rede 6LoWPAN e uma rede local, permitindo acesso à qualquer dispositivo conectado a ela.

Uma dificuldade encontrada foi a indisponibilidade de IPv6 em algumas das redes nas quais o equipamento precisou ser utilizado. Para solucionar tal problema, utilizou-se o *radvd*, *software* que distribui endereços IPv6 para os dispositivos da rede local, tornando possível a

utilização da RSSF em locais onde o IPv6 não é suportado. Essa solução não permite a conexão dos nós diretamente na internet, no entanto é suficiente para o funcionamento da RSSF.

Para um acesso padronizado aos dados fornecidos pela rede de sensores, faz-se necessário um protocolo de nível mais elevado. Para tal, o MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) foi utilizado. Segundo Stanford-Clark e Truong (2013), o MQTT é um protocolo aberto e leve, baseado em publicações e inscrições em tópicos e ideal para a utilização em situações em que a rede é intermitente. No entanto, o MQTT tradicional exige uma conexão confiável e sem perdas, utilizando o TCP. Como visto anteriormente, numa RSSF a confiabilidade não é garantida, portanto é recomendado o uso do protocolo de transporte UDP. Faz-se necessária, portanto, uma adaptação ao protocolo MQTT. Foi utilizado para isto o MQTT-SN (*Message Queuing Telemetry Transport - Sensor Network*) que, de acordo com Stanford-Clark e Truong (2013), possibilita a utilização do MQTT em uma RSSF.

Para a utilização do protocolo, deve existir um servidor MQTT, também chamado de *broker*, que recebe os valores publicados e disponibiliza os dados aos dispositivos inscritos em seus tópicos. Neste projeto foi utilizado o *Mosquitto* RSMB, pois essa versão suporta o MQTT-SN (ECLIPSE, 2013). Como no projeto todos os nós tem um endereço IPv6 os mesmos têm a habilidade de publicar diretamente no servidor, onde quer que esteja. No protótipo, o servidor foi implementado no Raspberry Pi, na LAN, com o objetivo de ter toda a infraestrutura necessária de rede, sem depender de redes externas.

Uma função não existente na biblioteca MQTT utilizada que precisou ser implementada é a reinicialização do nó caso ocorra perda de conexão com o *broker*. Caso o nó não receba confirmações de recebimento das publicações, chamados de *puback*, por alguns ciclos, o mesmo se reinicia. No entanto, a implementação realizada não armazena os valores não recebidos para posterior envio, funcionalidade que poderia ser implementada com maior tempo para o desenvolvimento.

Com o uso do MQTT-SN, os protocolos de todas as camadas da rede implementada estão definidos, resumidos na Figura 14.

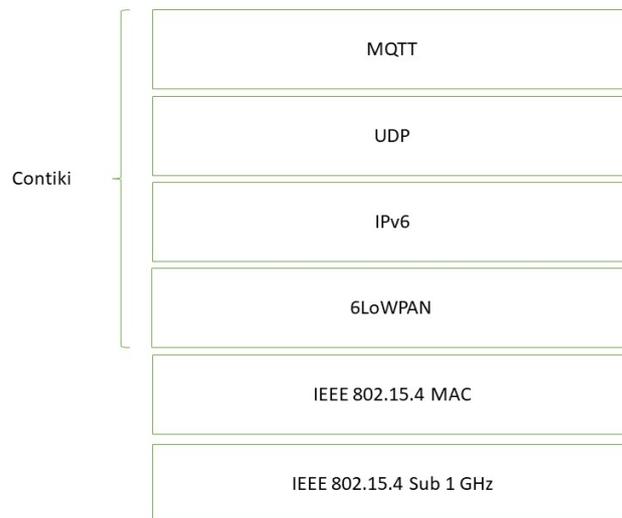


Figura 14 – Camadas da rede implementada

Fonte: Autoria Própria

Para a publicação dos dados dos sensores, foram criados os tópicos MQTT “temp”, para temperatura, e “hum”, para umidade relativa do ar. As mensagens publicadas pelos nós nestes tópicos são as medidas realizadas pelo sensor escolhido. Cada sensor publica em um tópico baseado no seu *MAC Address* valores de medição a cada intervalo de tempo pré-determinado, para testes utilizou-se 5 minutos. Por exemplo : 00124B0013753905/temp.

A implementação deste sensor dentro do Contiki será demonstrada no tópico a seguir.

5.2 SENSOR

Para a utilização do sensor escolhido , o HDC1080, é necessário conectá-lo fisicamente ao LaunchPad conforme a Figura 15:

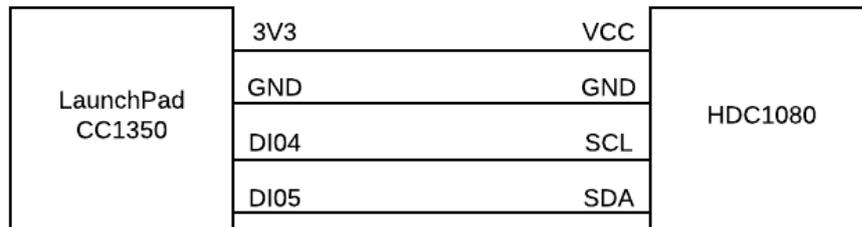


Figura 15 – Conexão do sensor

Fonte: Autoria Própria

A alimentação do sensor deve ser de 3,3 V, a mesma tensão aplicada à alimentação da placa. Os pinos SCL e SDA do dispositivo foram conectados aos pinos DI04 e DI05 do LaunchPad, respectivamente. Estas duas conexões são responsáveis pela comunicação I²C, os resistores de *pull-up* necessários para este protocolo já se encontram na PCB do HDC1080.

Para a implementação deste protocolo de comunicação pelo Contiki, foram utilizadas bibliotecas de comunicação I²C fornecidas dentro do próprio RTOS. Já para a implementação do sensor, foi utilizada uma versão modificada de uma biblioteca disponível no Contiki para o sensor HDC-1000 (OIKONOMOU, 2017). As modificações necessárias nesta biblioteca foram o endereço I²C e o *Device id* do componente, pois os outros endereçamentos dos registradores e o tratamento de dados necessários para converter os valores de temperatura em graus Celsius e a umidade em %RH são os mesmos entre esses sensores. As conversões são feitas com base no datasheet do sensor, transformando os dados brutos de 14 bits em um valor com unidade de medida padronizada.

Os sensores são vendidos e distribuídos já calibrados, no entanto, o processo de soldagem, tanto do chip na PCB quanto a realizada pela equipe, pode causar aquecimento elevado no circuito, podendo resultar em uma descalibração. Para corrigir esse problema, TI recomenda adicionar um *offset* na programação do dispositivo, de forma a eliminar o erro das medidas.

Após o sucesso da implementação do sensor, o código foi integrado ao MQTT, desenvolvido anteriormente, finalizando o software protótipo.

5.3 ALIMENTAÇÃO

Para maximizar o tempo de autonomia do protótipo, optou-se pelo uso de uma bateria de íons de lítio recarregável NCR18650B, possibilitando o uso de um pequeno painel solar que a fornece energia, aumentando sua autonomia e agregando uma tecnologia sustentável.

A bateria foi escolhida devido à sua grande capacidade, de 3200 mAh, alta densidade energética em relação à outros tipo de bateria como pode ser visto na Figura 16, de 243 Wh/kg, e possibilidade de recarregamento (SANYO, 2012). O painel fotovoltaico utilizado possui tensão nominal de 5 V e potência nominal de 0,9 W.

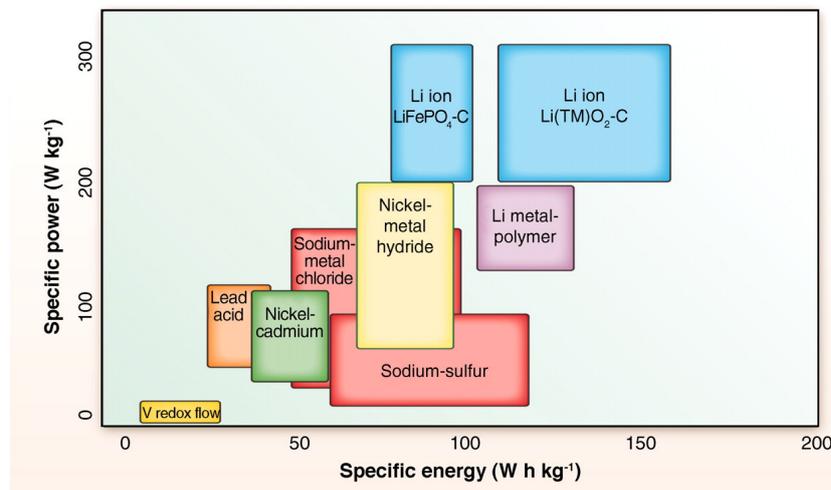


Figura 16 – Comparativo da densidade energética

Fonte: (DUNN et al., 2011)

Como a tensão de alimentação do conjunto é de 3,3 V e a tensão nominal da bateria é de 3,6 V, foi necessário implementar um conversor. Por, usualmente, ter maior eficiência em relação a um regulador de tensão e possibilitar, também, a elevação de tensão, um conversor chaveado buck-boost foi utilizado.

Outro fator levado em consideração foi a recarga da bateria pelo painel solar, que possui tensão nominal de 5 V. Para isso, utilizou-se um carregador de baterias de lítio, de modo a garantir carregamento correto da bateria.

O conversor (DD0603SB) foi encontrado em sites internacionais por US\$ 1, o carregador (TP4056) é encontrado por US\$ 0,17, o painel por US\$ 1,73 e a bateria (NCR18650B) por US\$ 2,92.

Um diagrama da alimentação do protótipo pode ser visualizado na Figura 17.

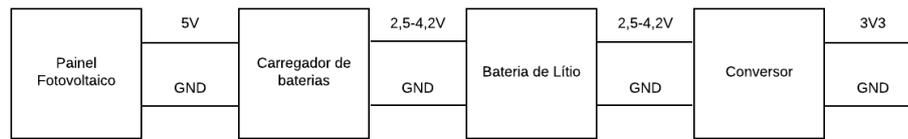


Figura 17 – Sistema de alimentação

Fonte: Autoria Própria

Para economia de energia, foi necessário, também, incluir na programação funções que colocam o microcontrolador principal e o sensor em *sleep mode* na maior parte do tempo, modo no qual diminuem seu consumo. Outro recurso utilizado, disponível pelo hardware, é a remoção de diversas chaves, que retiram a alimentação dos *LEDs* e do *Debugger* presentes na placa, reduzindo o consumo do *Launchpad* a apenas o microcontrolador.

Melhorias que necessitariam ser implementadas para um produto satisfatório, seriam a utilização da versão da bateria com um circuito de proteção, evitando que a mesma atinja níveis de tensão inferiores à 2,5 V, e o monitoramento da carga da bateria, por exemplo através de um sensor I^2C , tais dados podem, também, ser enviados também por MQTT.

5.4 GABINETE

O gabinete foi desenvolvido a partir da caixa de passagem descrita no capítulo anterior, conforme Figuras 18 e 19. O *LaunchPad* e o *slot* para bateria foram parafusados, enquanto o conversor e o carregador de lítio foram fixados com cola. O painel solar foi encaixado próximo a tampa de acrílico para facilitar a recepção de raios solares.



Figura 18 – Construção do protótipo

Fonte: Autoria Própria



Figura 19 – Construção - Painel fotovoltaico

Fonte: Autoria Própria

Uma estrutura que poderia ser implementada para aprimoramento do protótipo é o suporte para fixação do sensor em árvores e outras superfícies verticais.

Todas as conexões elétricas foram feitas através de *jumpers* para permitir testes, adaptabilidade e modularidade ao protótipo. Em ambas as figuras o sensor ainda não se encontra alocado em sua devida estrutura, como será debatido em seguida.

5.4.1 Instalação do sensor

A alocação do sensor no protótipo apresentou desafios, designar um espaço dentro da caixa de passagem para o dispositivo foi um problema, uma vez que o sensoriamento só poderia ocorrer de maneira mais exata caso houvesse a menor quantidade possível de obstáculos para a troca de calor entre o sensor e o ambiente a sua volta.

Para que as medidas disponham da exatidão especificada, têm-se duas opções: manter o sensor dentro da caixa de passagem, porém realizando uma abertura na estrutura para que haja troca de energia entre o sensor e o ambiente, ou construir uma estrutura externa para alocação do sensor. Ambas as opções apresentam vulnerabilidades em relação à proteção dos dispositivos. Manter o sensor em uma estrutura externa possibilita maior exatidão nas medidas ao mesmo tempo em que o torna suscetível à danos ambientais e a entrada de insetos no abrigo de proteção do sensor. Realizar uma abertura na caixa de passagem para que o dispositivo tenha trocas de calor com o ambiente mesmo dentro da estrutura tem a desvantagem de violar a proteção da caixa, colocando em risco os outros componentes do protótipo. Sendo assim, optou-se por manter o sensor em uma estrutura externa à caixa de passagem. Definiu-se a solução de fixar o fundo de um recipiente cilíndrico na parte inferior externa da caixa de passagem, conforme Figura 20.



Figura 20 – Montagem do abrigo do sensor no corpo do protótipo

Fonte: Autoria Própria

Em relação ao recipiente no qual o sensor é alocado para proteção, faz-se necessário levar em consideração o problema do acúmulo de ar quente nas proximidades do sensor, uma vez que sua baixa densidade faz com que se mantenha acima do ar ambiente, ficando preso no topo da estrutura longe da abertura do copo, o que põe em risco a exatidão das medidas. Quanto maior a razão entre altura e diâmetro da abertura do cilindro, mais difícil se torna a dispersão do calor interno através do vento, por esse motivo, procurou-se minimizar esta propriedade na escolha da estrutura (HIBBELER, 2004).

Para evitar que a estrutura absorva calor na forma de radiação, o que também prejudicaria a exatidão das medições, optou-se por um copo de acrílico na cor branca, por ter maior capacidade de reflexão (NUSSENZVEIG, 1998).

O sensor é inserido no fundo desse recipiente, tendo contato elétrico com o restante do protótipo através de *jumpers* que atravessam a caixa de passagem até o interior do copo através de uma pequena abertura na estrutura, através da qual a certificação IP 54 já não seria mais garantida, porém os cabos de conexão foram selados com silicone de modo a maximizar a proteção dos componentes internos. A abertura do recipiente é voltada para baixo de forma a proteger o sensor dos efeitos da chuva e coberto por uma rede de náilon de forma a evitar a entrada de insetos, como ilustra a Figura 21.



Figura 21 – Detalhe do abrigo do sensor

Fonte: Autoria Própria

Com base nos critérios descritos por Brusamarello e Balbinot (2010), o grau de proteção atingido é equivalente ao IP33.

5.5 INTERFACE

Para o desenvolvimento de uma interface com o usuário, foi criada uma *dashboard* a partir do Node-RED no Raspberry Pi. O Node-RED é uma ferramenta de programação baseada em blocos, desenvolvida originalmente pela IBM, para a internet das coisas (NODE-RED, 2018). Tanto o ambiente de programação quanto o acesso à sua interface são feitos através da rede pelo o IP do servidor, por um navegador, possibilitando acesso remoto.

O Node-RED foi instalado no Raspberry Pi, onde foi programado de maneira a realizar as funções de coleta de dados do MQTT, armazenamento das medidas em um banco de dados e interface gráfica. Para a coleta de dados MQTT, o programa desenvolvido se inscreveu em todos os tópicos publicados no *broker* local.

Foi utilizado o MariaDB como o banco de dados, implementado também no Raspberry Pi. O MariaDB é um dos mais populares servidores de banco de dados do mundo, *open source*, e foi criado pelos desenvolvedores do MySQL, com compatibilidade de comandos (FOUNDATION, 2018).

O *dashboard* de interface com o usuário possui uma tela de visualização das variáveis em tempo real, uma tela para o acompanhamento histórico dos dados e uma para o envio dos dados escolhidos por e-mail, tais telas são acessadas através de um menu lateral na interface.

Na aba Valores Atuais, pode ser visualizado, para cada sensor, um indicador dos

valores atuais das variáveis umidade relativa do ar ou de temperatura, bem como um gráfico das medidas das últimas 24 horas, que pode ser visto na Figura 22.

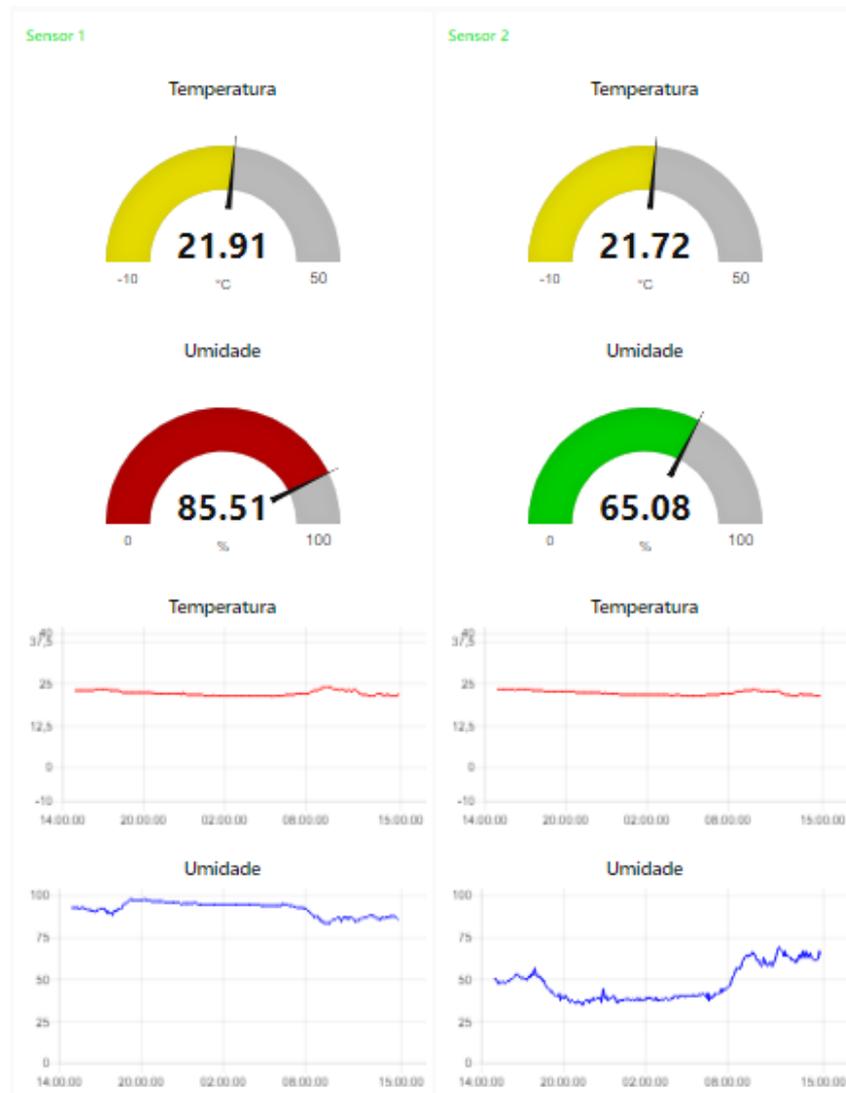


Figura 22 – Interface - Valores atuais

Fonte: Autoria Própria

Na aba Histórico, é apresentada uma interface onde é possível visualizar um gráfico temporal dos valores armazenados no banco de dados. Para a construção deste gráfico, pede-se que o usuário determine data de início e data final das medidas para análise, bem como o nó e a variável de interesse, como o exemplo na Figura 23.



Figura 23 – Interface - Histórico

Fonte: Autoria Própria

Na aba Enviar Dados, implementou-se a função de transformar as medidas armazenadas no banco de dados em uma planilha em formato CSV (*Comma-separated values*), para que seja possível a extração dos dados para análise posterior em *softwares* editores de planilhas, como o Microsoft Excel, de forma similar à gerada pelo HOBO, que pode ser vista na Figura 24.

	A	B	C	D	E	F
1	idmeasures	idnodes	idmgtt_topics	value_float	value_text	timestamp
1078	2408	1	26	2319 23.19		18/10/2018 15:04
1079	2412	1	26	2319 23.19		18/10/2018 15:09
1080	2416	1	26	2317 23.17		18/10/2018 15:14
1081	2420	1	26	2317 23.17		18/10/2018 15:19
1082	2424	1	26	2315 23.15		18/10/2018 15:24
1083	2428	1	26	2312 23.12		18/10/2018 15:29
1084	2432	1	26	2312 23.12		18/10/2018 15:34
1085	2436	1	26	2307 23.07		18/10/2018 15:39
1086	2440	1	26	2307 23.07		18/10/2018 15:44
1087	2444	1	26	2307 23.07		18/10/2018 15:49
1088	2448	1	26	2308 23.08		18/10/2018 15:54
1089	2452	1	26	2308 23.08		18/10/2018 15:59
1090	2456	1	26	2308 23.08		18/10/2018 16:04
1091	2460	1	26	2307 23.07		18/10/2018 16:09
1092	2464	1	26	2305 23.05		18/10/2018 16:14
1093	2468	1	26	2302 23.02		18/10/2018 16:19
1094	2472	1	26	2313 23.13		18/10/2018 16:24
1095	2476	1	26	2319 23.19		18/10/2018 16:29
1096	2480	1	26	2319 23.19		18/10/2018 16:34
1097	2484	1	26	2316 23.16		18/10/2018 16:39
1098	2488	1	26	2316 23.16		18/10/2018 16:44
1099	2492	1	26	2317 23.17		18/10/2018 16:49

Figura 24 – Interface - Tabela CSV visualizada no Microsoft Excel

Fonte: Autoria Própria

Criou-se a possibilidade deste conjunto de dados ser enviado ao usuário via e-mail,

funcionalidade ativada através de um botão na interface, mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Interface - Envio dos dados por e-mail

Fonte: Autorial Própria

Para o acesso à interface através da internet, basta realizar a correta configuração da rede local, desta maneira é possível acessá-la e coletar os dados a partir de qualquer dispositivo conectado à internet.

5.6 CUSTOS

Para um nó do protótipo, os custos foram reunidos na Tabela 2, com uma taxa USD de R\$ 3,72 (16 de outubro de 2018).

Tabela 2 – Tabela de custos para um nó da RSSF

Componente	Preço em R\$	Preço em US\$
Launchpad CC1350	107,9	29,0
Sensor HDC1080	14,9	4,0
Bateria NCR18650B	10,9	2,9
Gabinete	45,0	12,1
Conversor DD0603SB	3,7	1,0
Carregador TP4056	0,6	0,2
Painel Fotovoltaico	6,4	1,7
Total	189,4	50,9

Fonte: Autorial Própria

Para um eventual produto final, os custos podem ser reduzidos drasticamente. É possível adquirir o chip CC1350 por US\$ 3,70, sendo assim necessário o desenvolvimento

de uma PCB (*Printed Circuit Board*). O chip do sensor HDC1080 pode ser adquirido por US\$ 1,38. Para este cenário, considerando os custos com a confecção da PCB de US\$ 0,20 (JLCPCB, 2018), o custo ficaria em US\$ 23,20. O maior custo ficaria em função do gabinete, que necessitaria de uma alternativa. Seria também alocado no custo final uma margem referente a gastos de propaganda, transporte e engenharia, assim como a margem de lucro.

Já em relação ao *gateway*, os custos estão reunidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela de custos para o *gateway* da RSSF

Componente	Preço em R\$	Preço em US\$
Launchpad CC1350	107,9	29,0
Raspberry Pi 3B	130,2	35,0
Total	238,1	64,0

Fonte: Autoria Própria

São necessários para uma operação completa pelo menos 1 *gateway* e 1 nó de sensor, resultando num custo mínimo de US\$ 114,90. Este custo é inferior a todos os produtos alternativos listados no capítulo 3, tornando o protótipo uma solução de menor custo. Ademais, a possibilidade de adicionar mais nós de sensores faz com que para aplicações que necessitem de mais pontos de medição o protótipo seja ainda mais atrativo, diluindo o custo maior do *gateway*.

Com o *Hardware* e o *Software* funcionando, o protótipo foi concluído. Na sessão seguinte demonstraremos os resultados dos testes do equipamento.

6 RESULTADOS

Neste capítulo são descritos os testes realizados e os resultados obtidos. Estes foram divididos em testes de consumo, onde analisou-se o consumo de energia do protótipo, testes de alcance, etapa em que analisou-se a distância máxima de comunicação entre dois nós, e testes de exatidão, na qual é feita uma comparação entre as medições feitas pelo protótipo e pelo HOB0.

6.1 TESTES DE CONSUMO

Após montado o protótipo, realizou-se testes de consumo. Um primeiro teste foi realizado com o auxílio de um resistor de $0,15 \Omega$, utilizado como *shunt*, e de um osciloscópio. Através da queda de tensão neste resistor seria possível aferir a corrente circulando no circuito, no entanto, como a mesma é muito baixa, assim como a resistência *shunt* utilizada, o ruído foi maior do que a tensão gerada, sendo impossível analisar o sinal. Com tempo hábil, a maneira ideal para a realização do teste seria com uma ponta de prova de corrente, sendo possível então aferir o consumo do protótipo e seu *duty cycle* em relação ao período em *sleep mode* e de transmissão de dados.

Um método distinto, porém menos exato, para estimação do consumo, é a medição da corrente de entrada no *Launchpad* com o auxílio de um multímetro. Com uma entrada de 3,3 V, a corrente medida possui oscilação mínima em torno de 5,9 mA quando o kit está em *sleep mode*, subindo para um pico de 13,0 mA durante um breve período de cerca de 2 segundos quando está em transmissão, estas medidas foram realizadas com um multímetro comum, o que não garante uma medida precisa. A partir do conhecimento desses números, pôde-se calcular a corrente média consumida pelo equipamento durante sua operação em 6,0 mA, resultando em uma potência de 19,6 mW. Portanto, levando em consideração a capacidade de 3350 mAh da bateria utilizada, chega-se a uma autonomia estimada de 23 dias.

Aferiu-se, posteriormente, a intensidade da corrente elétrica na saída da bateria, antes do conversor elétrico, para que as perdas neste dispositivo fossem consideradas. Quando a bateria possui tensão de 4,0 V a corrente exigida é de 8,0 mA, resultando em uma potência

de 32,0 mW. Considerando uma tensão nominal de 3,6 V da bateria, pode-se chegar a uma expectativa de autonomia de aproximadamente 16 dias. Para essas condições, o rendimento medido do conversor é próximo de 60 %, tal eficiência é muito inferior à esperada, seja por operar fora da região nominal, seja pela má qualidade do produto, sendo que, para um ganho significativo na autonomia de bateria, um conversor de maior rendimento deve ser utilizado.

Em situações de plena luminosidade, a potência gerada pelo painel fotovoltaico excede a potência consumida pelo protótipo. Em testes realizados com o painel exposto em dias pouco ensolarados, obteve-se correntes com picos de 50 mA, podendo gerar, neste caso, 250 mW de potência e 900 mW nominais, uma vez que a tensão fornecida é de 5 V. Mesmo com grande oscilação devido ao ângulo e intensidade da luz solar recebida, a potência fornecida pelo equipamento tem o potencial de prolongar a autonomia energética do protótipo.

Para determinação empírica da autonomia do protótipo em situações adversas de luminosidade, ou na ausência completa de luz, utilizou-se como base a curva de descarregamento da bateria implementada, exposta na figura 26. O processo teve como princípio o monitoramento da tensão da bateria em dois nós do protótipo: um deles sem o painel fotovoltaico; um deles exposto a luz ambiente durante dias chuvosos, ou seja, com baixa intensidade de luz solar recebida.

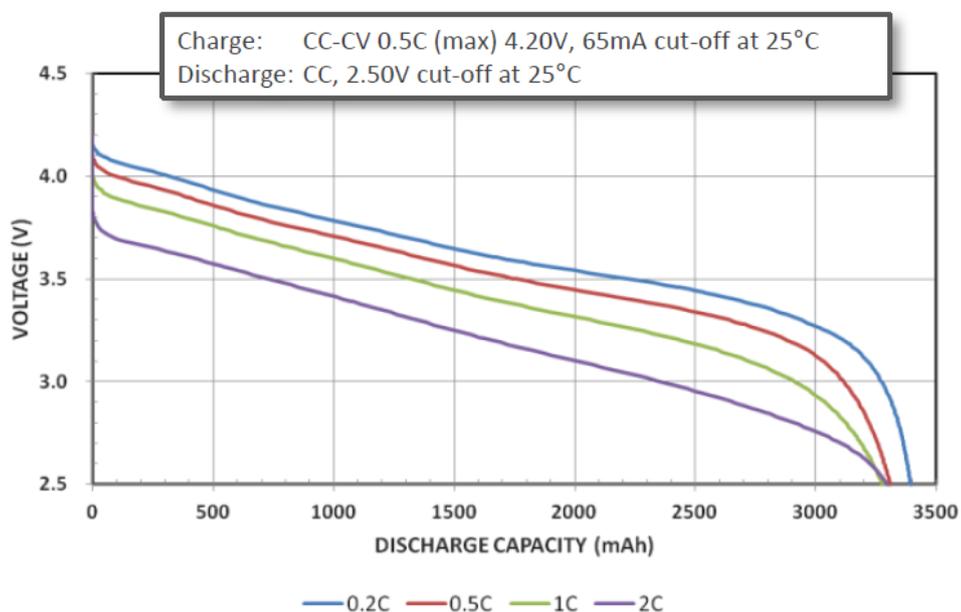


Figura 26 – Curva de descarregamento da bateria

Fonte: (SANYO, 2012)

Para fins de cálculo, partiu-se do princípio que o protótipo mantém operação enquanto a bateria possuir carga acima de 3,25 V. Considerou-se também que a curva de descarregamento

da bateria é linear entre 3,25 V e 4,00 V. Conclui-se, assim, a partir das medições realizadas e evidenciadas na figura 27 que a autonomia do protótipo na ausência de luz solar seja de aproximadamente 14 dias, enquanto sua autonomia em situações adversas de luminosidade pode chegar a 19 dias. Como a bateria consegue manter o protótipo em funcionamento até a tensão de 2,5V, estima-se que o equipamento poderia operar por até mais um dia, visto que o descarregamento da bateria após 3,25 V é demasiadamente rápido.

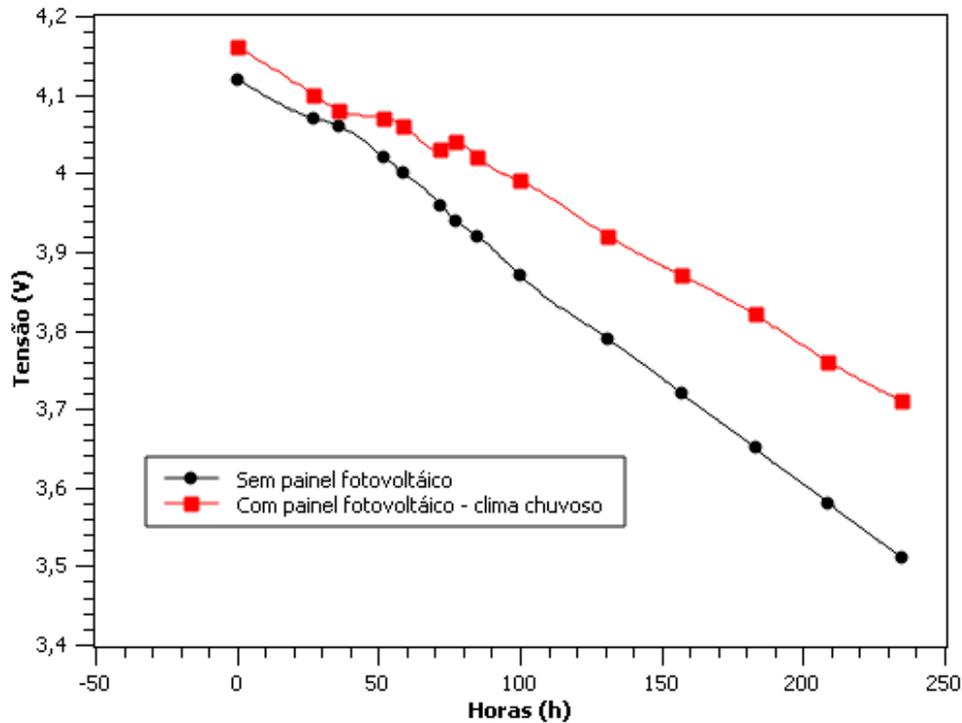


Figura 27 – Curva de descarregamento da bateria do protótipo

Fonte: Autoria Própria

A autonomia obtida nos testes realizados é inferior à especificada e muito abaixo da esperada para um nó de uma RSSF. As causas para o consumo exacerbado podem ter diversas origens e demandariam uma análise de maior complexidade para suas determinações. É possível que haja problemas relacionados a eficiência do Contiki e do *software* elaborado ao longo do trabalho. A eficiência da solução energética também pode estar aquém da ideal, visto que os componentes foram escolhidos visando menor custo. Como uma forma de contornar tal adversidade, é possível utilizar uma bateria de maior capacidade e a utilização de painéis solares maiores, oferecendo maior potência.

6.2 TESTES DE ALCANCE

Os testes de alcance foram realizados em locais de campo aberto e em locais de mata, com o intuito de obter o alcance mínimo especificado. Ambos os testes foram realizados no Parque Tingui, em Curitiba.

O teste foi realizado entre dois nós, através de trocas de pacotes UDP, os quais alteravam os estados dos LEDs dos LaunchPads. Portanto, esse teste resultou em uma medida discreta, com o funcionamento ou o não da comunicação.

O teste em campo aberto resultou num alcance próximo a 60 m, como mostrado na Figura 28. As medidas foram realizadas através de GPS, portanto apresentam incerteza.

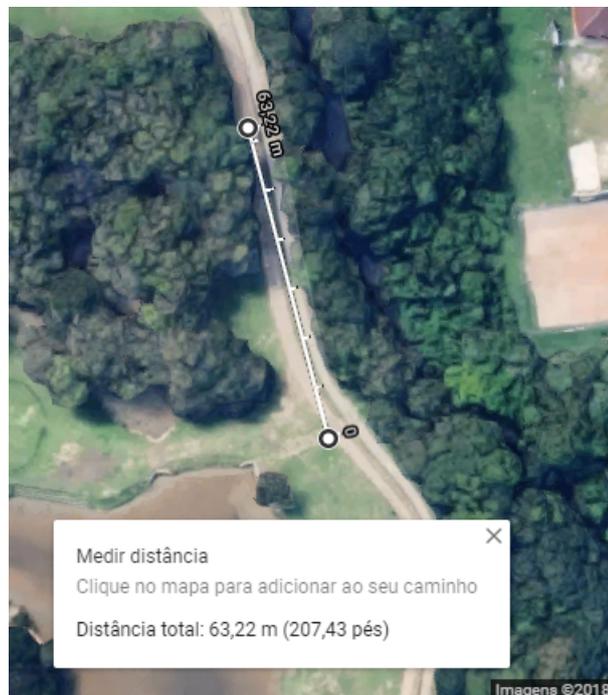


Figura 28 – Alcance em campo aberto

Fonte: Autoria Própria

Já para o teste em ambiente de mata fechada, o alcance medido foi de aproximadamente 30 m, como pode ser visto na Figura 29.



Figura 29 – Alcance em mata fechada

Fonte: Autoria Própria

Os testes resultaram em alcance dentro das especificações de distância entre os nós, porém fora das especificação de distância entre um nó e o *gateway*, de 100 m, muito aquém do possível para uma rede Sub - 1GHz. Para uma análise mais substancial, realizou-se um teste para medidas da intensidade de sinal transmitido entre os nós. Essa medição foi realizada analisando os valores de *Received signal strength indication* (RSSI), que indicam a intensidade de sinal do pacote recebido (BENKIC et al., 2008). Esse teste foi realizado através do programa de computador Smart RF Studio 7, da TI, desta maneira é possível isolar um possível problema no Contiki, que poderia estar ocasionando o baixo alcance. Devido à limitações de tempo e espaço, realizou-se o teste com uma distância máxima de 84 m, abrangendo os 60 m de alcance obtidos no teste anterior, com visada direta e em ambiente externo, porém não em campo aberto. Segundo INSTRUMENTS (2018a), o LaunchPad possui sensibilidade de recepção do sinal de -110 dBm a 50 Kbps para Sub-1 GHz. Os valores obtidos com uma frequência de comunicação de 915 MHz e taxa de 50 Kbps através da média de RSSI de 100 pacotes em cada ponto podem ser observados na Figura 30.

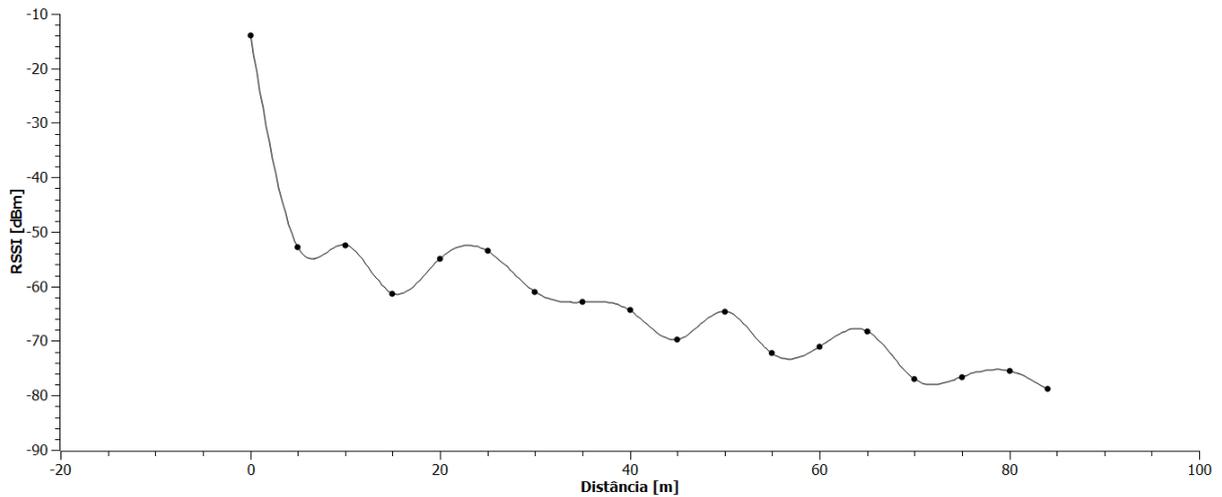


Figura 30 – RSSI medido

Fonte: Autoria Própria

Como pode ser observado, em 60 m , distância na qual no teste anterior perdeu-se a conexão entre os nós, o RSSI medido foi de -71,1 dBm, superior à sensibilidade do CC1350, portanto a comunicação deveria continuar funcionando. No entanto, o RSSI caiu muito rapidamente e provavelmente não alcançaria a distância estipulada pela rede Sub-1 GHz, o que poderia indicar um problema de *hardware*, para confirmação é necessário realizar o teste até atingir a sensibilidade ou obter o modelo da propagação.

Segundo Goldsmith (2005), com base nas medidas obtidas e no modelo de atenuação descrito na equação 1, é possível obter o parâmetro γ , o coeficiente de perda de percurso. Deste modo, pôde-se estimar o alcance máximo.

$$P_r(dBm) = P_t(dBm) + K(dB) - 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

Onde P_r é a potência recebida, P_t a potência transmitida, utilizou-se a potência máxima de transmissão do CC1350, de 15dBm, d_0 é a distância de referência, que, por ser ambiente externo usou-se 10 m, pelo efeito de dispersão, e K é uma constante que depende da frequência e d_0 .

Adequando os dados obtidos à equação através da minimização do erro médio quadrático, têm-se $\gamma = 4,5707$, que é maior que o esperado para ambientes externos segundo Goldsmith (2005), evidenciando uma queda no alcance mais acentuada que o previsto. Este valor elevado pode ter sido ocasionado também pelo ambiente no qual o teste foi realizado, que

apresentava alguns obstáculos laterais.

Com o modelo e a sensibilidade do CC1350, é possível aferir que a distância máxima é de aproximadamente 400 m. A distância obtida é muito superior à obtida utilizando o Contiki, portanto é possível supor que o RTOS causa grande parte da queda de alcance. No entanto, os 400 m obtidos são inferiores às especificações da rede Sub-1 GHz, o que pode indicar também um problema de *hardware*, mas uma investigação mais a fundo seria necessária.

Este problema de alcance poderia ser contornado com a utilização de nós intermediários, fazendo uso da topologia *mesh* suportada pela rede, ou do uso de uma antena externa, o que permitiria alcances mais próximos das especificações do protocolo. No entanto, essa antena aumentaria o custo e o consumo de bateria do protótipo. Para uma solução definitiva, seria necessária uma análise mais aprofundada ou eventual troca de *hardware*, por uma CC1310, por exemplo, que não demandaria muitas adaptações de *software* e também suporta Sub-1GHz.

6.3 TESTES DE EXATIDÃO

Para o teste de exatidão, a rede foi instalada nas dependências da UFPR, com ambos os nós coletando medidas entre intervalos de 10 minutos. Como referência, utilizou-se um sensor HOBO previamente calibrado com base em uma estação meteorológica confiável. O modelo utilizado foi o HOBO U23-001, equipamento que possui especificações superiores ao H08-003-02, com intuito de trazer maior exatidão aos testes. O equipamento possui exatidão de $\pm 0,21$ °C e $\pm 2,5$ %RH (ONSET, 2018).

Os três sensores foram armazenados no mesmo local por um período de 5 dias.

Durante as primeiras 65 horas, as medidas foram coletadas com o objetivo obter uma comparação com a referência. As medidas de temperatura, dos dois sensores da RSSF e do HOBO, podem ser vistas na Figura 31. As medidas foram coletadas entre 16:00 de 25/10/2018 e 09:00 de 28/10/2018.

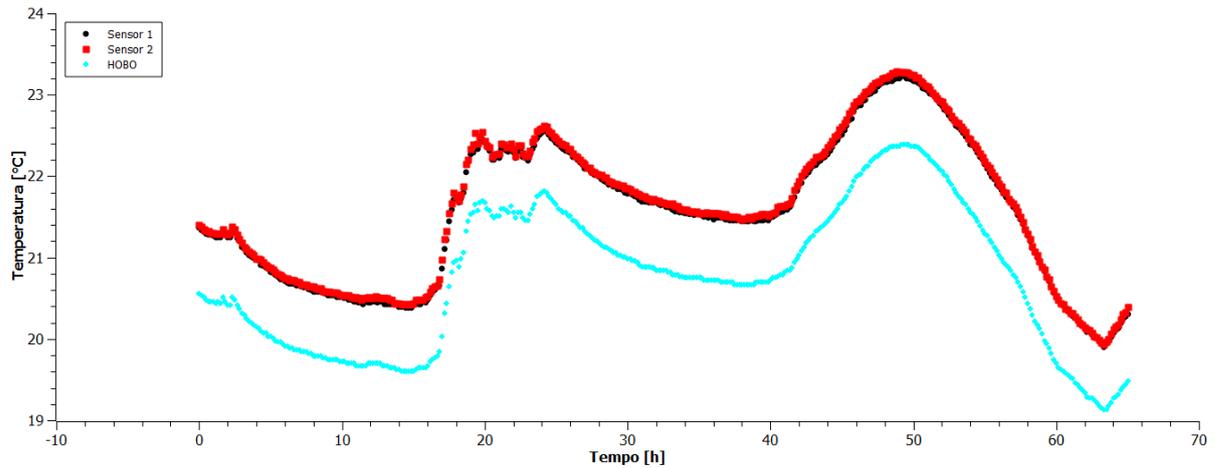


Figura 31 – Dados de temperatura preliminares

Fonte: Autoria Própria

Como pode ser observado graficamente, a temperatura dos dois sensores estão muito próximas, porém, com um *offset* em relação às medidas coletadas pelo HOBO. No entanto, percebe-se que as três curvas têm o comportamento semelhante.

As medidas de umidade relativa do ar podem ser observadas na Figura 32.

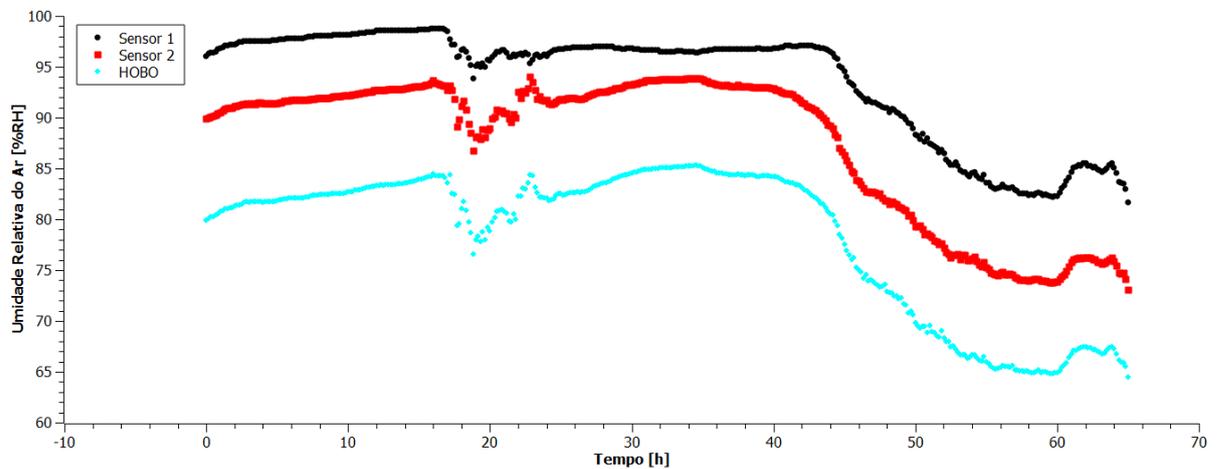


Figura 32 – Dados de umidade relativa do ar preliminares

Fonte: Autoria Própria

Neste caso, apesar da semelhança, as três curvas têm um valor de *offset* em relação às outras, o que demonstra que o erro é, majoritariamente, sistemático.

Para uma primeira análise, calculou-se o erro médio entre as medidas de cada sensor e da referência, o que pode ser visualizado na Tabela 4. Através destes valores, é possível

constatar que as medidas de umidade apresentam um erro absoluto médio maior em relação à referência se comparado aos erros de temperatura.

Tabela 4 – Tabela de Erros absolutos médios

Sensor	Es Temp. [°C]	Es Umid. [%RH]
1	-0,80	-15,39
2	-0,84	-9,15

Fonte: Autoria Própria

A partir dos resultados acima expostos, deu-se início ao processo de calibração. Optou-se por construir uma regressão linear para ajuste das medições. A reta de regressão possui a seguinte expressão:

$$Y = a + bx \quad (2)$$

Em que b representa a inclinação da reta e a representa a ordenada na origem.

A inclinação da reta de regressão e a ordenada na origem são calculada a partir das seguintes expressões, respectivamente:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (4)$$

Sendo n o número de medidas realizadas.

Podem ser observadas abaixo as retas de regressão obtidas para medição de temperatura do sensor 1, umidade relativa do sensor 1, temperatura do sensor 2 e umidade relativa do sensor 2, respectivamente:

$$Y = 0,995x - 0,700 \quad (5)$$

$$Y = 1,269x - 0,406 \quad (6)$$

$$Y = 0,985x - 0,524 \quad (7)$$

$$Y = 0,995x - 0,087 \quad (8)$$

A próxima etapa foi a adequação das medidas a partir de suas regressões lineares. Aplicou-se esses ajustes para as medições realizadas por 48h entre 14:00 de 28/10/2018 e 14:00 de 30/10/2018. Os gráficos após calibração podem ser vistos abaixo nas figuras 33 e 34.

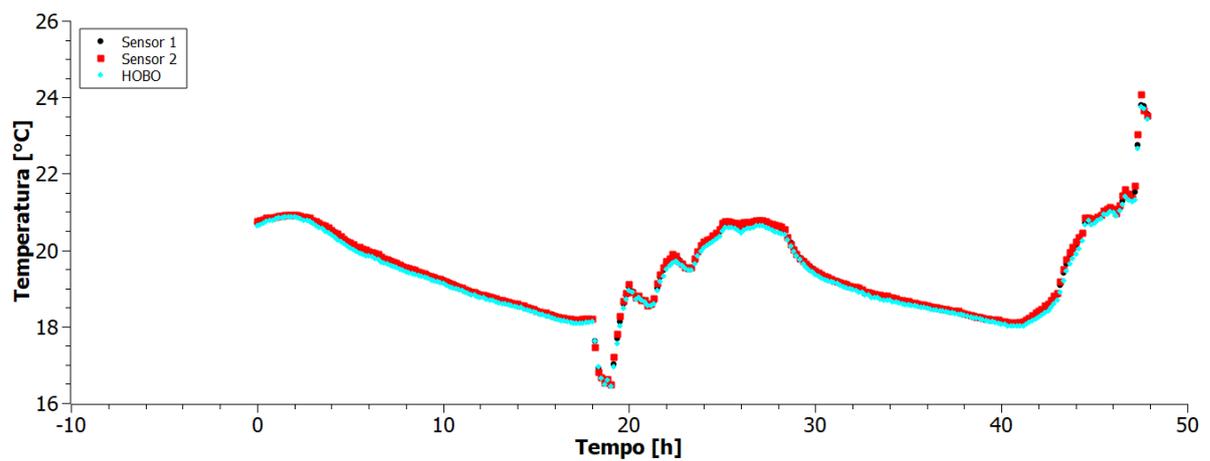


Figura 33 – Dados de temperatura após calibração dos sensores

Fonte: Autoria Própria

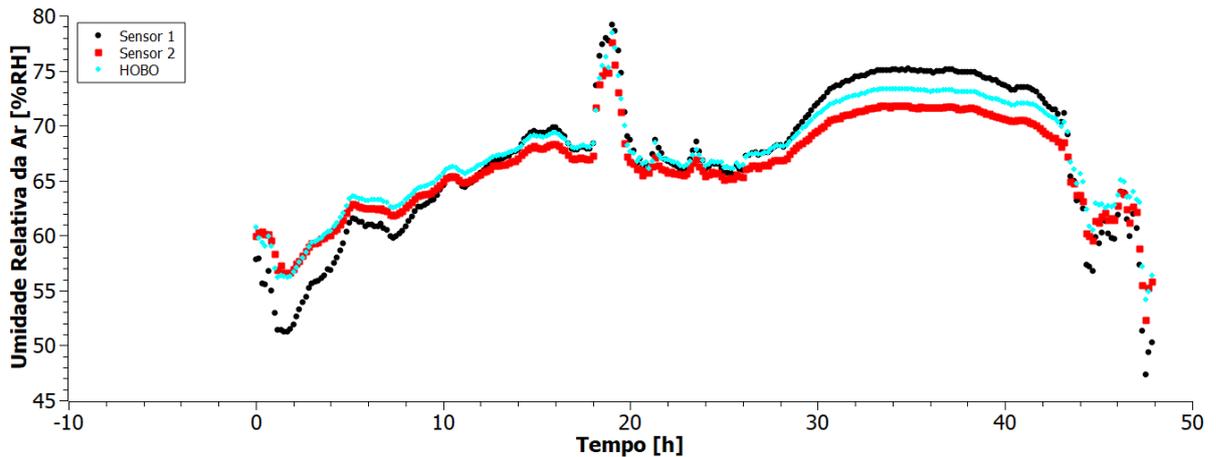


Figura 34 – Dados de umidade relativa do ar após calibração dos sensores

Fonte: Autoria Própria

Neste caso, após a correção, ambos os sensores apresentam um erro perceptível, porém com medições muito próximas à referência. Tal inexatidão pode ser explicada pelo fato do erro das medidas não ser constante para toda a faixa de medição, em especial para umidade, que varia mais acentuadamente para a faixa utilizada, como pode ser visto na Figura 35. É possível observar que, para medidas na faixa de 70 %RH, a exatidão já passa para ± 3 %RH.

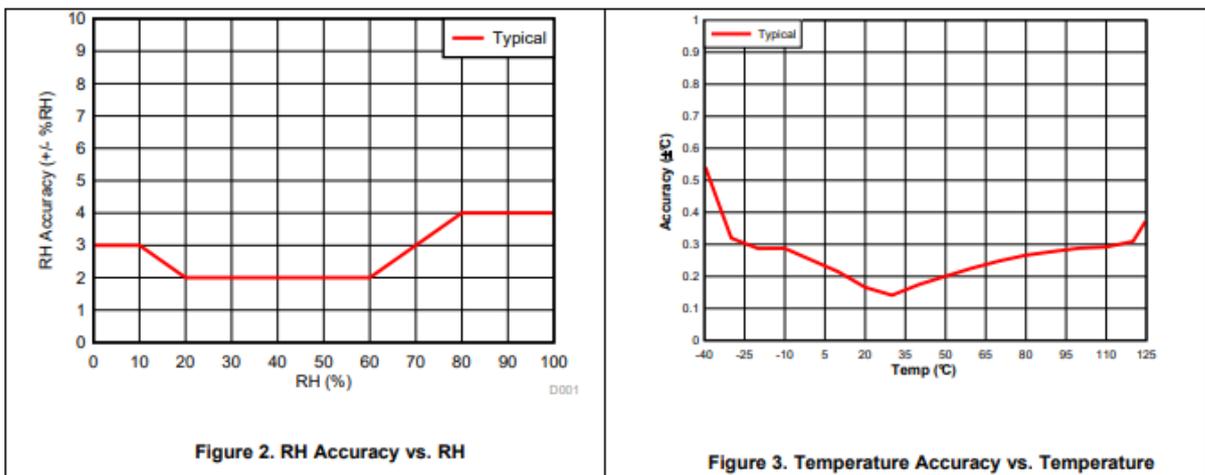


Figura 35 – Curva de exatidão do sensor

Fonte: (INSTRUMENTS, 2016)

Para medidas de temperatura, como pode ser observado na figura, a região de medição permaneceu num intervalo no qual o erro é inferior ao nominal de $\pm 0,2$ °C, justificando as medidas mais exatas.

Os erros médios absolutos em relação à referência de cada sensor podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de Erros absolutos

	Erro	
	Temperatura [°C]	Umidade [%RH]
Sensor 1	0,087	1,55
Sensor 2	0,109	1,14

Fonte: Autoria Própria

É possível observar que, com a correção do erro sistemático, as medidas se aproximaram da referência, permanecendo dentro da região de exatidão determinada pelos sensores na Figura 35 e da exatidão especificada.

Para uma análise mais detalhada da exatidão, encontrou-se os erros máximos de cada sensor para a medição de cada uma das variáveis, bem como o valor medido pela referência no momento em que tais erros ocorreram.

Tabela 6 – Tabela de Erros Máximos

	Umidade [%RH]		Temperatura [°C]	
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 1	Sensor 2
Erro Máximo	6,9	4,2	0,25	0,38
Valor da Referência	54,2	63,1	19,89	23,32

Fonte: Autoria Própria

Os erros de temperatura ficam dentro do intervalo de exatidão se combinadas as incertezas do sensor e da referência.

Para umidade, verifica-se que o erro máximo de sensor 1 ficou acima da combinação das incertezas do sensor e da referência. Para o sensor 2, o erro ficou muito próximo desse valor. É possível observar que tais erros ocorrem para medidas abaixo de 64,5 %RH, valor mínimo de umidade relativa atingido durante o processo de coleta de dados para calibração. Portanto, o sensor não pôde ser corretamente calibrado para esta faixa, justificando o erro obtido.

Faz-se necessário justificar que não foi possível realizar um processo ideal de calibração, visto que, para tal, há necessidade de expor o equipamento, através de um calibrador,

a uma faixa muito maior de temperatura e umidade relativa do ar, com a realização de várias medidas para cada ponto de aquisição de dados, a fim de estabelecer uma regressão linear com maior exatidão e estimar a incerteza do equipamento.

7 CONCLUSÃO

Considera-se que, como protótipo, o equipamento atendeu ao seu propósito, uma vez projetado e construído com sucesso, permitindo sua operação conforme previsto durante as etapas iniciais do projeto, como comprovado em testes. A etapa mais complexa da construção de uma RSSF, a implementação da rede, foi realizada com êxito, facilitando a implementação de novos sensores para a aquisição de demais variáveis para aplicação em outros cenários.

Constata-se que o protótipo não atinge plenamente todas as especificações iniciais deste trabalho, pois o alcance da operação se encontra muito aquém do ideal, atingindo uma média de 60 m quando atuando em campo aberto, inferior aos 100 m almejados. Tal carência do protótipo dificulta sua aplicação em ambientes amplos, porém atende com facilidade cenários que não demandem grande alcance, como monitoramento de estufas e jardins, e com adaptações poderiam ser atingidas distancias maiores de comunicação.

Após a efetiva detecção dos erros sistemáticos nas medidas adquiridas em campo, realizou-se com sucesso um procedimento de calibração dos sensores, culminando em uma exatidão dentro das especificações propostas, acentuando a aplicação do equipamento para situações que demandem medidas confiáveis.

A autonomia do protótipo também ficou aquém do especificado, e uma solução energética alternativa deve ser desenvolvida, bem como realização de testes mais precisos.

Entende-se que, quando comparado a produtos similares disponíveis no mercado, o equipamento desenvolvido é uma solução viável para o monitoramento de variáveis meteorológicas, principalmente por possuir custo bastante competitivo, menor do que todas as opções encontradas no mercado, versatilidade de aplicações e exatidão das medições.

Para trabalhos futuros, sugere-se: realização de um processo aprimorado de calibração; implementação de outros sensores no equipamento, aumentando o conjunto de variáveis a serem medidas, elevando a versatilidade do dispositivo; atualizações e melhorias no *hardware* e *software* do equipamento, de forma a otimizar seu consumo, alcance e custo, juntamente da realização de testes mais robustos conforme sugerido ao longo do trabalho; desenvolvimento de outras redes de sensores para aplicações florestais ou na agricultura; construção e utilização do protótipo para trabalhos onde seja necessário o levantamento de variáveis meteorológicas.

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. **Computer networks**, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002. ISSN 1389-1286.
- AL-FUQAHA, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M.; ALEDHARI, M.; AYYASH, M. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015.
- ALBERT, M. Seven things yto know about the internet of things and industry 4.0. **Modern Machine Shop Magazine**, v. 88, n. 4, p. 74, 2015.
- ALLIANCE, L. What is lorawan. In: . 2015.
- ALLIANCE, Z. **Zigbee**. 2018. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/>>.
- AUST, S.; PRASAD, R. V.; NIEMEGERERS, I. G. M. M. Ieee 802.11ah: Advantages in standards and further challenges for sub 1 ghz wi-fi. In: **2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. 2012. p. 6885–6889. ISSN 1550-3607.
- BENKIC, K.; MALAJNER, M.; PLANINSIC, P.; CUCEJ, Z. Using rssi value for distance estimation in wireless sensor networks based on zigbee. In: IEEE. **Systems, signals and image processing, 2008. IWSSIP 2008. 15th international conference on**. 2008. p. 303–306.
- BRUSAMARELLO, V. J.; BALBINOT, A. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2010.
- COLINA, A. L.; VIVES, A.; BAGULA, A.; ZENNARO, M.; PIETROSEMOLI, E. Iot in five days. **E-Book, June**, 2016.
- CONTIKI. **Contiki: The Open Source OS for the Internet of Things**. 2018. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://www.contiki-os.org/why>>.
- CORCORAN, P. Two wires and 30 years: A tribute and introductory tutorial to the i2c two-wire bus. **IEEE Consumer Electronics Magazine**, IEEE, v. 2, n. 3, p. 30–36, 2013.
- DUNKELS, A.; GRONVALL, B.; VOIGT, T. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In: **29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks**. 2004. p. 455–462. ISSN 0742-1303.
- DUNN, B.; KAMATH, H.; TARASCON, J.-M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 334, n. 6058, p. 928–935, 2011.
- ECLIPSE. **Mosquitto**. 2013. Acessado em: 15 de agosto de 2018. Disponível em: <<https://www.eclipse.org/proposals/technology.mosquitto/>>.

ELETRÔNICA, B. da. **Sensor de Temperatura e Umidade HTU21D**. 2018. Acessado em: 23 de maio 2018. Disponível em: <<http://www.baudaeletronica.com.br/sensor-de-temperatura-e-umidade-htu21d.html>>.

FERRARI, G.; MEDAGLIANI, P.; PIAZZA, S. D.; MARTALO, M. Wireless sensor networks: performance analysis in indoor scenarios. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, Springer, v. 2007, n. 1, p. 081864, 2007.

FOUNDATION, M. **About MariaDB**. 2018. Acessado em: 29 de setembro de 2018. Disponível em: <<https://mariadb.org/about/>>.

GOLDSMITH, A. **Wireless communications**. Cambridge university press, 2005.

HART, J. K.; MARTINEZ, K. Environmental sensor networks: A revolution in the earth system science? **Earth-Science Reviews**, Elsevier, v. 78, n. 3, p. 177–191, 2006. ISSN 0012-8252.

HIBBELER, R. C. **Mecânica–Dinâmica para engenharia**. São Paulo: Pearson Brasil, 2004.

INSTRUMENTS, T. **HDC1080**. 2016. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/HDC1080>>.

INSTRUMENTS, T. **CC1350**. 2018. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/CC1350>>.

INSTRUMENTS, T. **HDC2010**. 2018. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/HDC2010>>.

INSTRUMENTS, T. **LAUNCHXL-CC1350**. 2018. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-CC1350>>.

ISLAM, N.; WONG, N.-h. Urban greenery as a mitigation strategy for urban heat island effect in high density commercial districts of dhaka, bangladesh. In: **Sustainability Matters: Asia's Energy Concerns, Green Policies and Environmental Advocacy**. World Scientific, 2014. p. 167–232.

JLCPCB. **Prototype PCBs**. 2018. Acessado em: 26 de outubro de 2018. Disponível em: <<https://jlcpcb.com/>>.

KAMILARIS, A.; PITSILLIDES, A. Mobile phone computing and the internet of things: A survey. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 3, n. 6, p. 885–898, Dec 2016. ISSN 2327-4662.

KOZIEROK, C. M. **The TCP/IP guide: a comprehensive, illustrated Internet protocols reference**. No Starch Press, 2005.

LETHABY, N. Wireless connectivity for the internet of things: One size does not fit all. **Texas Instruments**, 2017.

MADGETECH. **RFRHTemp2000A Wireless Humidity and Temperature Data Logger**. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://international.madgetech.com/data-loggers/product-applications/sensitive-items-storage-verification/rfrhtemp2000a.html>>.

MARAIS, J. M.; MALEKIAN, R.; ABU-MAHFOUZ, A. M. Lora and lorawan testbeds: A review. In: IEEE. **AFRICON, 2017 IEEE**. 2017. p. 1496–1501.

MICRODAQ. **MadgeNet Wireless Humidity and Temperature Data Logger**. 2015. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://international.madgetech.com/data-loggers/product-applications/sensitive-items-storage-verification/rfrhtemp2000a.html>>.

NODE-RED. **Node-RED: Flow-based programming for the Internet of Things**. 2018. Acessado em: 29 de setembro de 2018. Disponível em: <<https://nodered.org/about/>>.

NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Estimativa da umidade relativa das 13: 00 h, com base nos dados das 9: 00 h e das 15: 00 h, para o estado do paraná. **Floresta**, v. 35, n. 2, 2005. ISSN 1982-4688.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica-volume 4:  tica, relatividade, física quântica.. **São Paulo: Blucher**, 1998.

OIKONOMOU, G. **Driver for the Sensortag HDC sensor**. 2017. Acessado em: 12 de agosto de 2018. Disponível em: <<https://github.com/contiki-os/contiki/blob/master/platform/srf06-cc26xx/sensortag/hdc-1000-sensor.c>>.

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**, Elsevier, v. 118, p. 66–84, 2015.

OMEGA. **UWRH-2A-NEMA-M12**. 2015. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<https://www.omega.com/das/pdf/UWRH-2A-NEMA-M12.pdf>>.

OMEGA. **Weather Resistant Wireless Relative Humidity/Temperature Transmitter**. 2015. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <https://br.omega.com/googlebase/product.html?pn=UWRH-2A-NEMA-M12&gclid=Cj0KCQjw4eXPBRctARIsADvOjY0swEeIcKUJy_PJ1Bqh1D8V372L7-Z4OFX5bKTrUUjnjqH3G1z3mX6QaAktMEALw_wcB>.

ONSET. **HOBO Bluetooth Low Energy Temperature/Relative Humidity Data Logger**. 2018. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1101>>.

ONSET. **HOBO Temperature/Relative Humidity Data Logger**. 2018. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/h08-003-02>>.

ONSET. **HOBO U23 Pro v2 Temperature/Relative Humidity Data Logger**. 2018. Acessado em: 30 de outubro de 2018. Disponível em: <<https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u23-001>>.

PI, R. **BUY A RASPBERRY PI**. 2018. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>>.

ROSS, J. **Redes de computadores**. Julio Ross, 2008.

SANYO. **Datasheet NCR18650B**. 2012.

SARMIENTO, D. A. L.; ROMERO, H. A. G. Dise o e implementación de ipv6 en un sistema embebido. **Tecnura**, v. 17, n. 37, p. 167–176, 2013.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Meteorologia e climatologia florestal**. Produção Independente, 2015. 262 p. ISBN 9788590435358.

STANFORD-CLARK, A.; TRUONG, H. L. Mqtt for sensor networks (mqtt-sn) protocol specification. **International business machines (IBM) Corporation version**, v. 1, 2013.

STECK. **Caixas de Passagem e Distribuição**. 2017. Acessado em: 15 de fevereiro 2018. Disponível em: <<http://www.steck.com.br/pt/produtos/caixas-de-passagem-e-distribuicao>>.

ZHENG, J.; JAMALIPOUR, A. **Wireless sensor networks: a networking perspective**. John Wiley & Sons, 2009.