

Leonardo Martins Wollinger

**MONITORAMENTO DE GRÃOS: UMA APLICAÇÃO DE IOT NO
AGRONEGÓCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica e Eletrônica da
Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Eletrônica.
Orientador: Prof. Dr. Richard Demo
Souza

Florianópolis
2018

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

Wollinger, Leonardo

Monitoramento de Grãos : Uma aplicação de IoT no
Agronegócio / Leonardo Wollinger ; orientador,
Richard Souza, 2018.

82 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Eletrônica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

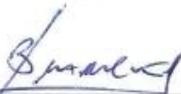
1. Engenharia Eletrônica. 2. Internet das Coisas.
3. Sistemas de Comunicação em Rádio Frequência. 4.
Monitoramento de grãos. 5. Desenvolvimento de
Produto. I. Souza, Richard. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Eletrônica. III. Título.

Leonardo Martins Wollinger

**MONITORAMENTO DE GRÃOS:
UMA APLICAÇÃO DE IOT NO AGRONEGÓCIO**

Este Trabalho foi julgado e adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora

Florianópolis, 18 de dezembro de 2018.



Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, Dr.
Coordenador do Curso de Engenharia Eletrônica

Banca Examinadora:



Prof. Richard Demo Souza, Dr.
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Walter Pereira Carpes Junior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Dedico:

A Deus que iluminou o meu caminho
durante esta longa caminhada.

A minha noiva Bruna Silva, pelo amor,
paciência e companheirismo.

Aos meus pais Silvio Wollinger e
Marci Wollinger pelo amor, apoio e
incentivo em toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de fazer o curso.

Ao professor e Orientador Richard Demo de Souza, pela oportunidade, apoio e confiança.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, que foram muito importantes na minha vida acadêmica.

A todos que não foram citados, mas que de alguma forma participaram da minha formação.

“Ciência e tecnologia revolucionam nossas vidas,
mas a memória, a tradição e o mito moldam nossas
respostas”

- Arthur Schlesinger

RESUMO

Com cerca de 20% do PIB (Produto Interno Bruto) dependente do agronegócio, o Brasil figura entre os maiores produtores de grãos do mundo. Nos últimos anos, tem-se buscado tecnologias que possam facilitar ou otimizar a produção ou reduzir de perdas das mais variadas formas, este trabalho mostra o desenvolvimento de um dispositivo capaz de monitorar temperatura e umidade de grãos, e enviar a um smartphone utilizando Bluetooth Low Energy (BLE). O objetivo é relatar todas as fases de um projeto, da ideia à concepção final.

Palavras-chave: Agricultura. Bluetooth. Redução de perdas.

ABSTRACT

With about 20% of GDP (Gross Domestic Product) dependent of agribusiness, Brazil is among the largest grain producers in the world. In recent years, we have been looking for technologies that can facilitate or optimize production or reduce losses in a wide variety of ways. This work shows the development of a device capable of monitoring grain temperature and humidity and send to a smartphone using Bluetooth Low Energy (BLE) communication. The goal is report all stages of a project, from idea to final design.

Keywords: Agriculture. Bluetooth. Reduction of losses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Visão geral do dispositivo desenvolvido.	26
Figura 2– Radio BLE utilizado.	28
Figura 3 – Radio BLE em <i>case</i> improvisado para teste em campo.	29
Figura 4 – Planta baixa do ambiente de testes.....	29
Figura 5 – RSSI média por pacote antes e depois da rotação de 90°. ...	30
Figura 6 – RSSI média por pacote enviado na medida de referência ...	31
Figura 7 – pdf(h) da medida de referência.	31
Figura 8 – RSSI da primeira medida a 5 metros com LOS.	32
Figura 9 – pdf(h) da primeira medida a 5 metros com LOS.....	33
Figura 10 – RSSI da segunda medida a 5 metros NLOS.....	34
Figura 11 – pdf(h) da segunda medida a 5 metros NLOS.	34
Figura 12 – RSSI da terceira medida a 3 metros NLOS.....	35
Figura 13 – pdf(h) da segunda medida a 5 metros NLOS.	35
Figura 14 – Transmissor em meio a sacas de milho.....	36
Figura 15 – RSSI da quarta medida a 3 metros NLOS.....	36
Figura 16 – pdf(h) da quarta medida a 5 metros NLOS.	37
Figura 17 – Transmissor em meio a sacas de trigo.	38
Figura 18 – RSSI da quinta medida a 4 metros LOS.	38
Figura 19 – pdf(h) da quinta medida a 4 metros LOS.	39
Figura 20 – Transmissor em meio a sacas de açúcar refinado.	40
Figura 21 – RSSI da sexta medida a 4 metros LOS.	40
Figura 22 – pdf(h) da sexta medida a 4 metros LOS.....	41
Figura 23 – RSSI da sétima medida a 7 metros NLOS.	41
Figura 24 – pdf(h) da sexta medida a 7 metros NLOS.	41
Figura 25 –Modelo Log-Distância frente a valores medidos.	43
Figura 26 – Esquemático do circuito protótipo baseado em Atmel.	45
Figura 27 – Protótipo montado em placa ilhada de 60x40mm.....	46
Figura 28 – Sensor DHT11 (azul) e DHT22 (branco).....	47
Figura 29 – Exemplo de cálculo da umidade com dependência da temperatura.....	47
Figura 30 – Modulo HC-08.....	48
Figura 31 – Curva de carga característica de uma célula de Lítio.....	49
Figura 32 – Bateria utilizada	50
Figura 33 – Diagrama funcional básico do <i>data logger</i>	51
Figura 34 – Organização da EEPROM	52
Figura 35 – Diagrama funcional básico do APP	53
Figura 36 – Tela de busca de dispositivos do aplicativo	53
Figura 37 – Gráfico gerado pelo APP	58
Figura 38 – <i>Setup</i> de alimentação e osciladores do CC2650	55

Figura 39 – Possíveis configurações do “ <i>RF front-end</i> ”	56
Figura 40 – Análise da rede de adaptação passiva proposta por [8].	57
Figura 41 – <i>Layout</i> da antena <i>Bow Shaped</i> proposta.	58
Figura 42 – <i>Smith Chart</i> da antena proposta.	58
Figura 43 – Simulação eletromagnética de campos distantes.	59
Figura 44 – <i>Level Shifter</i> com BSS138.	60
Figura 45 – Esquema de ligação e acionamento do sensor DHT11/22.	61
Figura 46 – Esquema elétrico do carregador de bateria.	62
Figura 47 – <i>Stack-up</i> da PCB.	62
Figura 48 – <i>Preview</i> da PCB desenvolvida em Altium.	63
Figura 49 – PCB nua fabricada na AllPCB.	64
Figura 50 – Resultado da montagem do <i>hardware</i>	65
Figura 51 – EEPROM de 512 kBytes.	65
Figura 52 – Projeto e impressão do primeiro case.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PCB – Placa de Circuito Impresso
PAN – *Personal Area Network*
WPAN – *Wireless Personal Area Network*
WAN – *Wide Area Network*
LPWAN – *Low Power Wide Area Network*
(ROSA, 2017) – *Bluetooth Low Energy*
RSSI – *Received Signal Strength Indicator*
LNA – *Low Noise Amplifier*
LOS – *Line Of Sight*
NLOS – *Non Line Of Sight*
Li-Po – *Lithium Polymer Battery*
RH – *Relative Humidity*
DC – *Direct Current*
ISM – *Industrial Scientific and Medical*
EEPROM – *Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*
MCU – *Microcontroller Unit*
IoT – *Internet of Things*
RFID – *Radio Frequency Identification*
MDS – *Minimum Detectable Signal*
D2D – *Device to Device*
GFSK – *Gaussian Frequency Shift Keying*
FHSS – *Frequency-Hopping Spread Spectrum*
RTC – *Real Time Clock*
MOSFET – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*
NFC – *Near Field Communication*
pdf – *Probability Density Function*
SSID – *Service Set Identifier*

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Ampére(s)
AC - Corrente Alternada
DC - Corrente Contínua
GND - Tensão de Referência
Hz - Hertz
LED - Diodo Emissor de Luz
m - Mili
PCB - Placa de Circuito Impresso
RISC - Computador com um conjunto reduzido de instruções
TBJ - Transistor Bipolar de Junção
MOSFET – Transistor de efeito de campo
V - Volt(s)
VCC - Tensão positiva de alimentação
UART - Receptor/Transmissor Universal Assíncrono
W - Watt(s)
 μ - Micro
 Ω - Ohm(s)
J - Joule(s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVO GERAL	25
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
2	ESTUDO DO PATH LOSS E FADING INDOOR	27
2.1	A ESCOLHA DO PADRÃO DE COMUNICAÇÃO	27
2.2	TESTE DE DESEMPENHO EM CAMPO	28
2.2.1	Teste de efeito de polarização da antena	29
2.2.2	Medida de referência.	30
2.2.3	Primeira medida.....	32
2.2.4	Segunda medida	33
2.2.5	Terceira medida	34
2.2.6	Quarta medida.....	36
2.2.7	Quinta medida	37
2.2.8	Sexta medida.....	39
2.2.9	Sétima medida	41
2.2.10	Resumo e conclusões dos experimentos.....	42
3	DESENVOLVIMENTO	45
3.1	O PROTÓTIPO CONSTRUÍDO	45
3.1.1	O sensoriamento.....	46
3.1.2	O radio Bluetooth Low Energy	48
3.1.3	O módulo carregador TP-4056	48
3.1.4	Bateria Li-Po	49
3.1.5	Diagrama de funcionamento.	50
3.1.6	O aplicativo de monitoramento.....	52
3.2	Proposta definitiva do <i>hardware</i>	55
3.2.1	A MCU	55
3.2.2	Design da antena	56
3.2.3	Sensoriamento	59

3.2.4	Carregador de bateria Li-Po.....	61
3.2.5	Desenvolvimento da PCB	62
3.2.6	<i>Bill of Materials</i> (BOM)	65
3.2.7	Autonomia de operação.....	67
3.2.8	Aspectos Mecânicos	68
4	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A – Esquemático completo do <i>hardware</i> definitivo	79
	APÊNDICE B – Código utilizado no protótipo	81

1 INTRODUÇÃO

O Brasil figura entre os maiores produtores e consumidores de grãos e cereais do mundo, sua produção representa, atualmente, cerca de 24% do produto interno bruto (PIB) do país [1], com 35,100 milhões de hectares de soja cultivados na safra 2017/2018 [2].

Nos últimos anos, assistimos o surgimento e crescimento vertiginoso das empresas de agricultura de precisão, que vem movimentando um capital expressivo e atraindo investidores estrangeiros; estima-se que o setor irá movimentar 4,2 bilhões de euros em 2021[3]. O objetivo da agricultura de precisão é potencializar a produção, reduzindo custos e perdas, seja reduzindo mão de obra humana, otimizando processos, ou auxiliando na tomada de decisões. Atualmente o foco das empresas de automação agrícola está nos grandes produtores, enquanto que as pequenas propriedades têm procurado otimizar a tomada de decisões baseadas em sensoriamento e processamento de dados. Grande parte da produção agrícola brasileira vem de pequenas e médias propriedades, que além das variáveis climáticas, sofrem da falta de estrutura e tecnologia, levando à baixa produtividade.

Existem perdas atribuídas a colheita, transporte, processamento e embalagem, mas entre os maiores geradores de perda ou agentes redutores de qualidade de grãos e cereais, está a falta de controle da umidade e temperatura após a colheita, o que pode favorecer a germinação (temperatura entre 25 e 30 °C por longos períodos)[4] ou a deterioração do grão por contaminação fúngica, podendo causar desde a podridão do grão, até a produção de metabólitos secundários, chamados de micotoxinas. A ingestão a longo prazo de alimentos contaminados com micotoxinas podem acarretar sério risco para a saúde humana e animal [5].

Atualmente o número de dispositivos ligados à rede mundial de computadores tem crescido com a disseminação do conceito de IoT (*Internet of Things*) estima-se que até 2020 serão 50 bilhões de dispositivos [6]. Para atender as mais diversas aplicações, estão surgindo padrões de comunicação com as mais variadas características, sejam elas destinadas a longos saltos, como as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*)[7], baixíssimo custo como as tecnologias de RFID (*Radio Frequency Identification*) e NFC (*Near Field Communication*), ou compromisso entre distância e largura de banda como é o caso das WPAN (*Wireless Personal Area Networks*) onde o *Bluetooth Low Energy* (BLE)[8] se enquadra.

Sistemas de IoT têm sido criados no mundo todo para serem empregados às mais diversas funções, sejam elas no auxílio de ofícios diários, aplicações industriais, ou mesmo na área da saúde. As aplicações na agricultura são bastante presentes no cenário atual, uma vez que é de extrema importância o estudo de alternativas eficientes de controle de microrganismos, germinação e outros geradores de perdas, visto o significativo prejuízo na agricultura. Por isso, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de temperatura e umidade, capaz de gerar um histórico das condições a que os grãos foram submetidos. O histórico recente pode ser capturado por um *smartphone* através de uma conexão *Bluetooth*.

1.1 OBJETIVO GERAL

Existem diversos sistemas de monitoramento do acondicionamento de grãos disponíveis no mercado, são sistemas acoplados a silos e tubulações, com acionadores de ventilação e secagem, responsáveis pelo controle da qualidade do acondicionamento a partir do momento em que chegam nos centros de processamento. Contudo, entre a colheita e o processamento, há um período de armazenagem primária e transporte não monitorados.

Este projeto foi realizado baseado em uma demanda de mercado pouco explorada. Diversos tipos de grãos são armazenados em paióis dentro de sacos de armazenagem, para facilitar o transporte e armazenamento em locais com pouca infraestrutura, até a chegada em centros de processamento.

O objetivo é desenvolver um dispositivo a ser acoplado nesses sacos de armazenagem, seja no interior, junto ao conteúdo, ou amarrado externamente, que capture o histórico termo higrométrico.

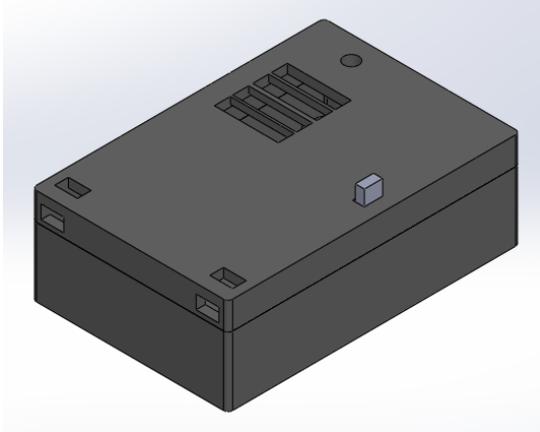
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho trata do estudo das tecnologias necessárias para o desenvolvimento de um protótipo funcional e uma proposta de um produto com a função de realizar a captura de temperatura e umidade periodicamente, criando um histórico que pode ser acessado por um aplicativo em um dispositivo móvel. O objetivo final deste dispositivo, Figura 1, é monitorar e criar um histórico das condições em que uma determinada massa de grãos foi submetida ao longo do tempo.

Os principais pontos abordados nesse trabalho foram:

- a) Estudo de propagação em larga escala.
- b) Escolha do padrão de comunicação.
- c) Escolha dos componentes para o protótipo.
- d) Desenvolvimento de um protótipo funcional.
- e) Escolha dos componentes para a versão final.
- f) Desenvolvimento da antena.
- g) Desenho da PCB.
- h) Desenvolvimento de um APP para smartphone.

Figura 1 – Visão geral do dispositivo desenvolvido.



Fonte: Autor 2018.

2 ESTUDO DO PATH LOSS E FADING INDOOR

Este capítulo dedica-se ao estudo preliminar dos padrões de *fading* e *path loss* da tecnologia utilizada no projeto do dispositivo, em um ambiente modelo de operação.

2.1 A ESCOLHA DO PADRÃO DE COMUNICAÇÃO

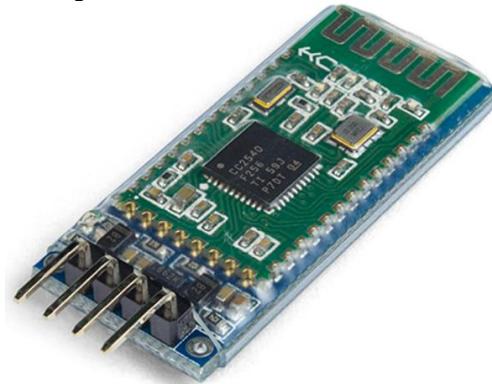
O sistema de comunicação utilizado nesse projeto foi o Bluetooth 4.0 (IEEE 802.15.1), também chamado de Bluetooth Low Energy (BLE) [8], por conveniência de conexão direta com diversos smartphones.

O BLE é classificado como uma *Wireless Personal Area Network* (WPAN) e, é utilizado para comunicação entre dispositivos (D2D) como celulares, *headphones*, *smartwatches*, mouses, teclados, entre outros. Em geral, dispositivos que utilizam WPANs necessitam de grande autonomia energética e curta distância de operação; o BLE tem funcionamento satisfatório até 10 metros com alguns obstáculos e baixo consumo [8].

O padrão opera na faixa ISM [9] partir de 2.402GHz à 2.480GHz com 40 canais de 2MHz de largura de banda, modulação GFSK e espalhamento espectral FHSS [10], técnica capaz de aumentar substancialmente a sensibilidade do receptor, ao custo de uma redução na taxa de bits e um aumento do tempo em que o sinal fica no ar [11]. Os dispositivos Bluetooth são subdivididos em classes baseadas na potência de transmissão: Classe 1 – 100mW, Classe 1.5 – 10mW, Classe 2 – 2.5mW, Classe 3 – 1mW.

Para o desenvolvimento do protótipo foi utilizado o módulo Bluetooth Low Energy classe 2 HC-08, apresentado na Figura 2, baseado no microcontrolador Texas Instruments CC2540, onde a máxima potência de transmissão é de 4dBm e sensibilidade de -93dBm na recepção, ou seja, um *link budget* de 97dBm [12].

Figura 2 – Radio BLE utilizado.



Fonte: Retirado de [12].

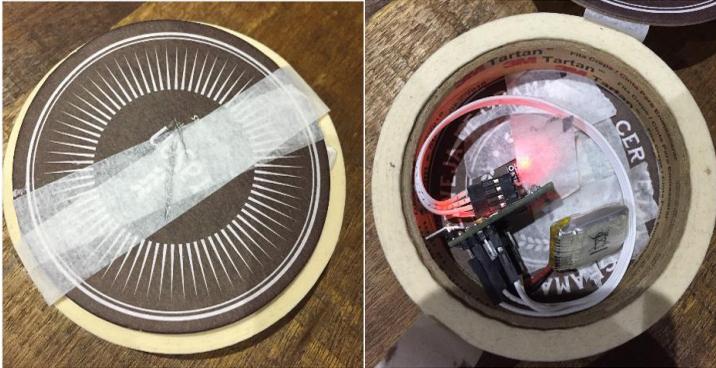
2.2 TESTE DE DESEMPENHO EM CAMPO

Para verificar se o padrão poderia de fato ser utilizado para a aplicação da proposta, foi realizado um estudo de campo com o módulo HC-08 com a intenção de:

- a) Caracterizar os padrões de *fading* do sinal utilizando esta tecnologia;
- b) Caracterizar o canal de um ambiente semelhante à que o dispositivo proposto deverá operar;
- c) Determinar os limites para comunicação com sucesso.

O transmissor foi colocado em um invólucro inerte improvisado, como mostrado na Figura 3, para que pudesse ser introduzido em diversos locais.

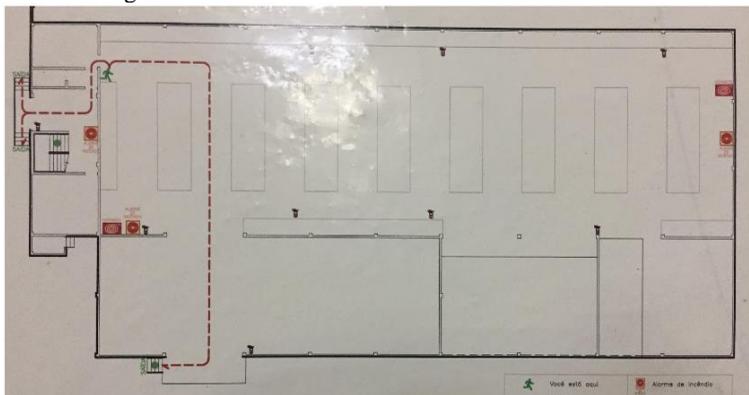
Figura 3 – Radio BLE em *case* improvisado para teste em campo.



Fonte: Autor 2018.

O experimento foi realizado em um depósito de itens para supermercado, Figura 4, onde o transmissor foi inserido em meio a prateleiras metálicas e embalagens de diversos produtos. As medidas foram realizadas entre 2 e 7 metros com e sem linha de visada, explorando também a altura das prateleiras e diferentes tipos de obstáculos. O teste foi realizado fazendo-se medidas de RSSI média de cada pacote para um conjunto de 1000 pacotes, os dados foram recebidos por um computador.

Figura 4 – Planta baixa do ambiente de testes.

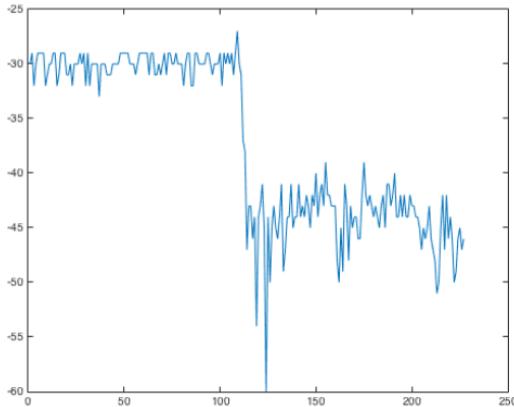


Fonte: Autor 2018

2.2.1 Teste de efeito de polarização da antena

Durante a montagem e testes iniciais do circuito de testes, foi observado que, em curtas distâncias, a RSSI instantânea é muito dependente da polarização da antena. O teste foi realizado com uma separação de aproximadamente 30 cm entre transmissor e receptor, realizando uma rotação de 90° do rádio transmissor durante a transmissão dos pacotes.

Figura 5 – RSSI média por pacote antes e depois da rotação de 90° .



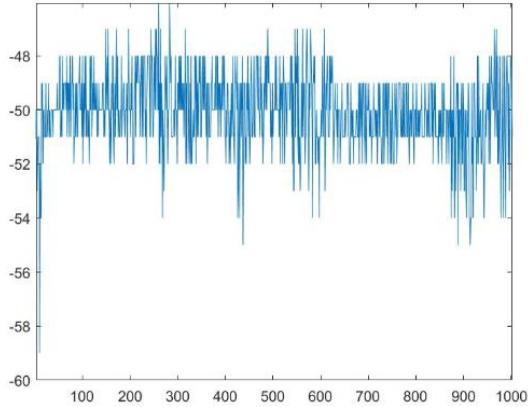
Fonte: Autor 2018

A rotação do transmissor acontece logo após a medida de número 100, onde é possível ver, na Figura 5, que há uma queda de 15dB e o aumento do *fading*, variação instantânea da intensidade do sinal. Este efeito não pode ser percebido em distâncias maiores devido ao surgimento de multipercursos, onde deixa de existir um raio predominante e surgem diversas cópias idênticas do sinal, mas com diferentes atrasos inerentes aos diferentes percursos. Estes múltiplos sinais sofrem mudanças de polarização nas reflexões, somam-se na antena e são amplificados pelo LNA, por isso a polarização deixa de ser importante em maiores distâncias.

2.2.2 Medida de referência.

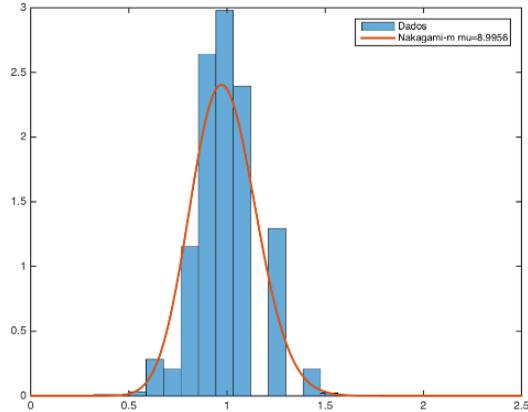
Uma medida de referência foi realizada para servir de base a todo o estudo de campo. A coleta dos pacotes foi realizada a uma distância de 1 metro sem obstáculos. Uma referência é importante para ter uma ideia do comportamento do sistema sem presença de diversos fatores que podem influenciar no funcionamento.

Figura 6 – RSSI média por pacote enviado na medida de referência.



Fonte: Autor 2018

Figura 7 – pdf(h) da medida de referência.



Fonte: Autor 2018

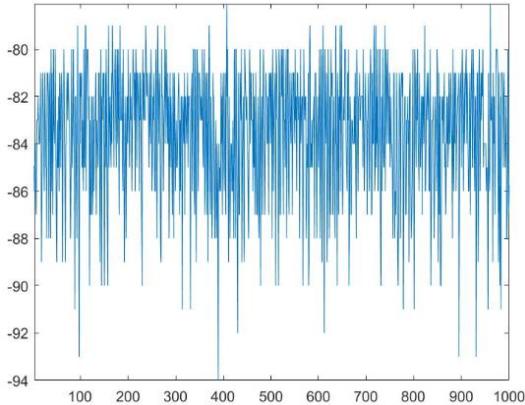
A RSSI média da primeira medida foi de -50dBm, Figura 6. A função densidade de probabilidade (pdf(h)) [13] aproximada pela distribuição Nakagami- m com $m=8$, distribuição utilizada para modelar a aleatoriedade do *fading* que contempla LOS e NLOS [14], Figura 7, mostra que o cenário com LOS à pouca distância tem pouco *fading*. O valor do parâmetro de Nakagami, m , indica a severidade do *fading*, valores abaixo de 1 representam padrões de *fading* muito severos.

É importante salientar que o ambiente de testes possui uma quantidade grande de iluminação fluorescente, 5 empilhadeiras elétricas (5 toneladas), uma rede Wi-Fi indoor em 2.4GHz e uma movimentação grande de pessoas, o que torna o canal bastante dinâmico.

2.2.3 Primeira medida

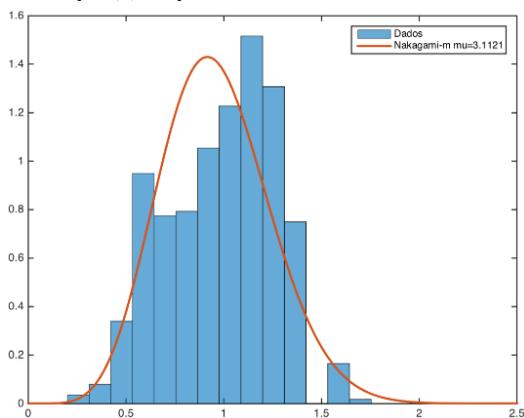
A primeira medida foi feita de uma prateleira à outra, onde a separação é de aproximadamente 5 metros. Ambas as prateleiras têm diversos tipos de mercadorias, mas transmissor e receptor estão em linha de visada.

Figura 8 – RSSI da primeira medida a 5 metros com LOS.



Fonte: Autor 2018

Figura 9 – pdf(h) da primeira medida a 5 metros com LOS.



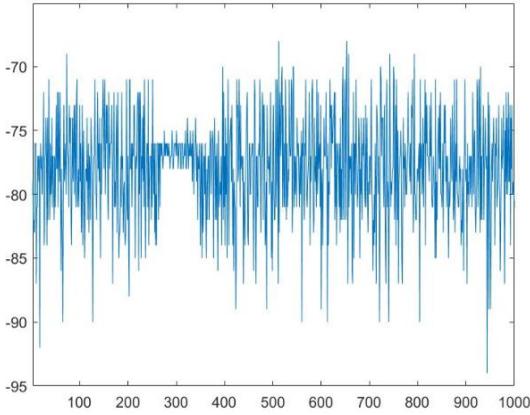
Fonte: Autor 2018

Como esperado, a RSSI média de -83dBm, Figura 8, teve uma grande queda devido ao maior percurso de propagação e recombinações de multipercurso. É notável também a presença de um *fading* maior em relação à medida de referência, isso pode ser provado pelo valor de $m=3.11$ da pdf(h), Figura 9, que representa uma distribuição mais severa que a referência.

2.2.4 Segunda medida

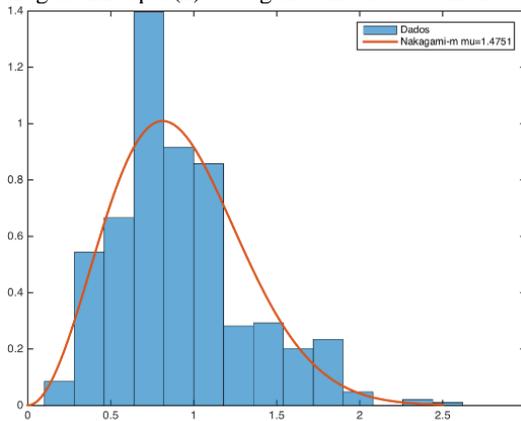
A segunda tomada foi feita também a 5 metros, entretanto sem linha de visada. Transmissor e receptor foram posicionados na frente e nas costas de uma prateleira com *pallets* contendo produtos de limpeza líquidos.

Figura 10 – RSSI da segunda medida a 5 metros NLOS.



Fonte: Autor 2018

Figura 11 – pdf(h) da segunda medida a 5 metros NLOS.



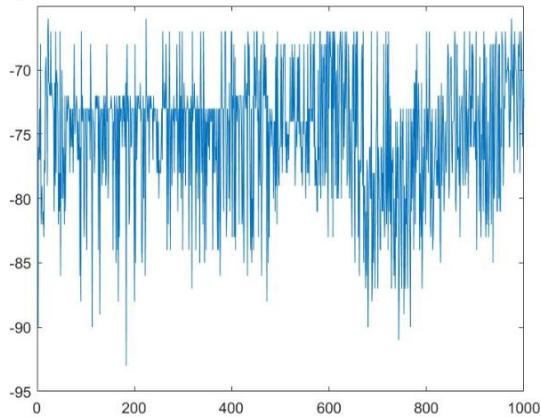
Fonte: Autor 2018

A medida a 5 metros sem linha de visada tem RSSI média igual a -77dBm , Figura 10, e $m=1.47$, Figura 11, que pode parecer estranho à primeira vista, já que teve RSSI média maior que a anterior, contudo, com um maior espalhamento da distribuição de probabilidade de Nakagami o valor de m se apresenta com um valor menor, o que representa uma propagação mais severa.

2.2.5 Terceira medida

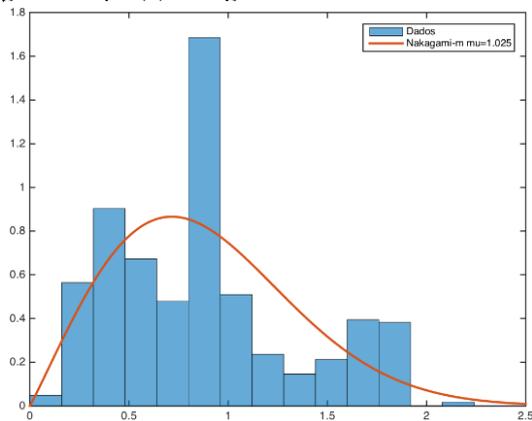
Tomada a uma distância de cerca de 3 metros sem visada, a terceira medida tem um *pallet* contendo caixas de sabão em barra como obstáculo.

Figura 12 – RSSI da terceira medida a 3 metros NLOS.



Fonte: Autor 2018

Figura 13 – pdf(h) da segunda medida a 5 metros NLOS.



Fonte: Autor 2018

A terceira medida teve uma distribuição com $m=1.025$, Figura13, ainda menor que a segunda medida, mas com RSSI média de -74 dBm, Figura 12. O baixo valor de m nesse caso provavelmente está relacionado à grande movimentação de pessoas e maquinas nesse local.

2.2.6 Quarta medida

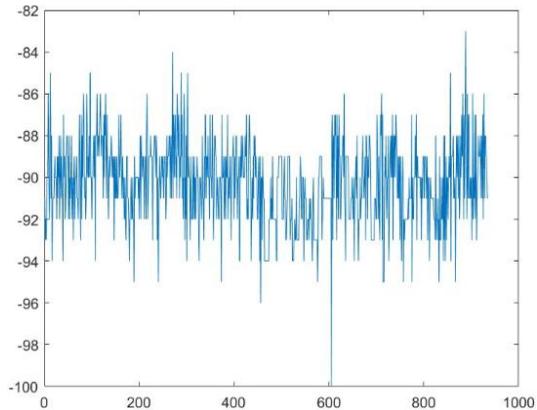
A quarta medida é a que melhor se aplica a proposta do projeto, visto que o transmissor foi inserido em um *pallet* com sacas de grãos de milho, Figura 14, cerca de 1 metro do chão e 3 metros do receptor.

Figura 14 – Transmissor em meio a sacas de milho.



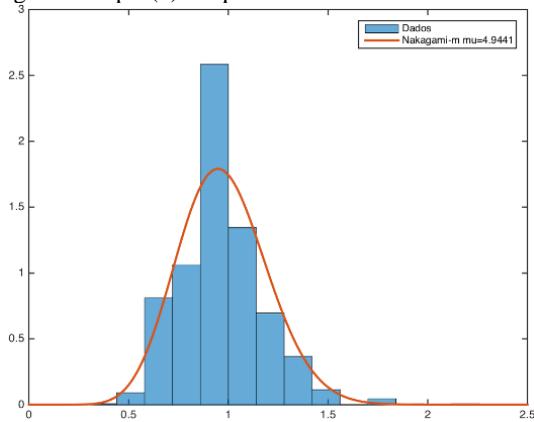
Fonte: Autor 2018

Figura 15 – RSSI da quarta medida a 3 metros NLOS.



Fonte: Autor 2018

Figura 16 – pdf(h) da quarta medida a 5 metros NLOS.



Fonte: Autor 2018

Neste experimento, a Figura 15 mostra que foi obtida a pior RSSI média, -90dBm, possivelmente relacionado à opacidade do obstáculo. Contudo, a distribuição, na Figura 16, possui $m=4.94$, provavelmente explicado pela estabilidade do canal, visto que o experimento ocorreu no local menos movimentado do campo de testes.

2.2.7 Quinta medida

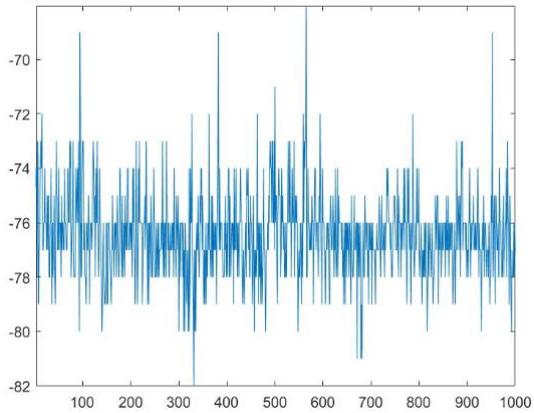
A quinta medida foi feita com o transmissor posicionado à 3 metros de altura e 4 metros de distância com linha de visada. O transmissor estava entre sacas de trigo, Figura 17.

Figura 17 – Transmissor em meio a sacas de trigo.



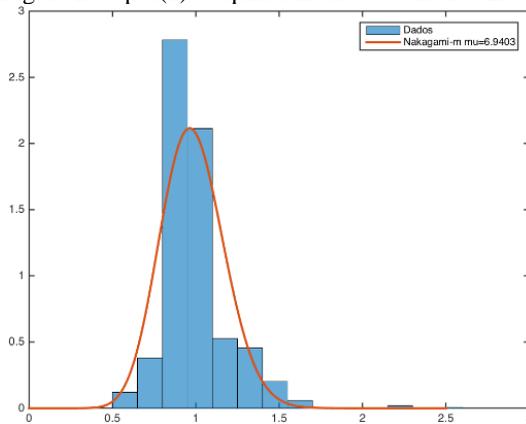
Fonte: Autor 2018

Figura 18 – RSSI da quinta medida a 4 metros LOS.



Fonte: Autor 2018

Figura 19 – pdf(h) da quinta medida a 4 metros LOS.



Fonte: Autor 2018

A alta RSSI média vista na Figura 18, -76dBm, e o alto valor de m visto na Figura 19, 6.94, devem-se principalmente à linha de visada, e à invariância do canal.

2.2.8 Sexta medida

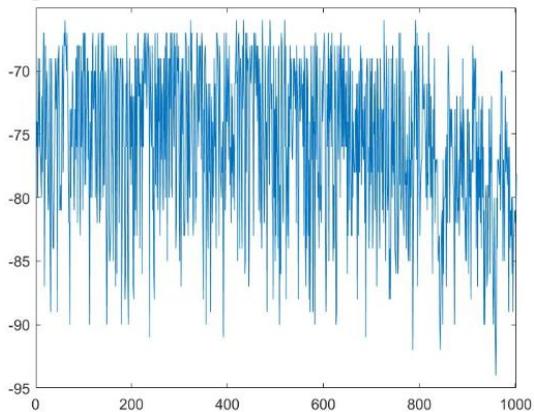
A sexta medida comprova a conclusão pressuposta acima, temos aqui uma mesma altitude e distância do experimento anterior, Figura 20, entretanto, num local com grande fluxo de máquinas e pessoas, assim como na terceira medida. O valor médio da RSSI deste experimento é de -76dBm, Figura 21, entretanto, tivemos aqui o maior efeito de *fading* de todos os experimentos, $m=0.75$, Figura 22.

Figura 20 – Transmissor em meio a sacas de açúcar refinado.



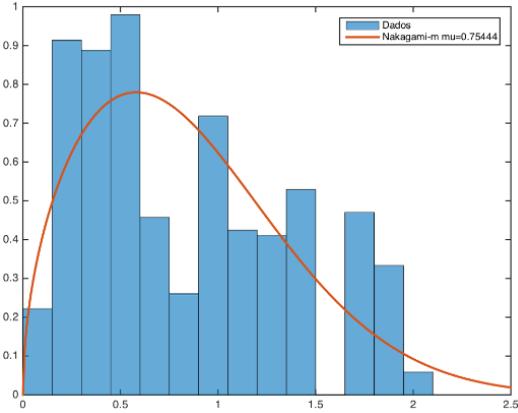
Fonte: Autor 2018

Figura 21 – RSSI da sexta medida a 4 metros LOS.



Fonte: Autor 2018

Figura 22 – pdf(h) da sexta medida a 4 metros LOS.

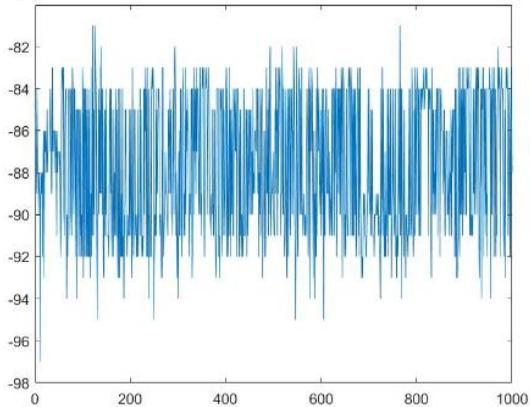


Fonte: Autor 2018

2.2.9 Sétima medida

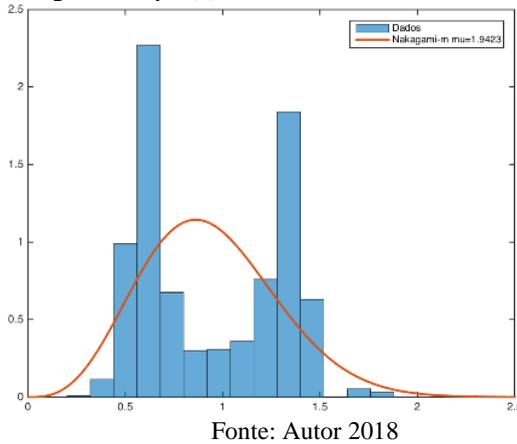
A sétima medida foi uma verificação do limite do alcance do sistema. A tomada de valores foi feita à uma distância de 7 metros, na mesma altura do transmissor, sem visada, duas prateleiras com produtos diversos como separação, sem movimentação de pessoas.

Figura 23 – RSSI da sétima medida a 7 metros NLOS.



Fonte: Autor 2018

Figura 24 – pdf(h) da sexta medida a 7 metros NLOS.



A Figura 23 mostra uma RSSI média de -88dBm, e $m=1.94$, Figura 24.

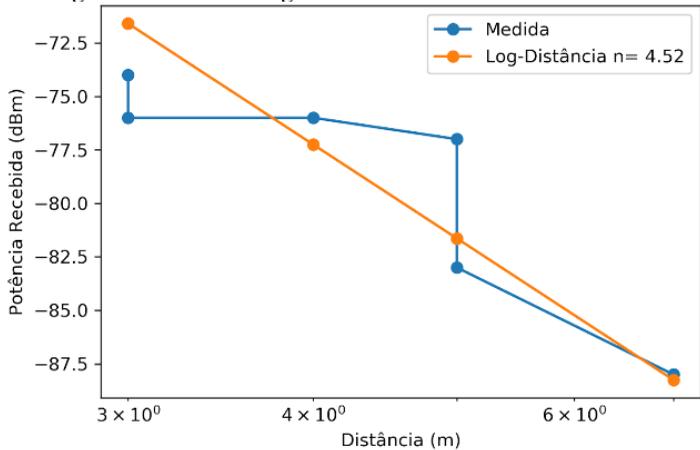
2.2.10 Resumo e conclusões dos experimentos

A tabela 1 mostra que o efeito de *fading* está mais relacionado à presença de pessoas e máquinas movimentando-se no ambiente do que obstáculos estáticos. A distância entre transmissor e receptor não tem grande correlação com o efeito de *fading*, mas sim com a RSSI média. O tipo de obstáculo tem grande influência na RSSI média, mas pouca influência no *fading*. O sucesso da conexão está mais relacionado ao *fading* e menos relacionado à RSSI média, desde que não seja tão baixa quanto a sensibilidade do receptor.

Tabela 1 – Resumo dos experimentos realizados em campo.

Medição	Distância (m)	RSSI média (dBm)	m Nakagami
Referência	1 - LOS	-50	8.99
1	5 - LOS	-83	3.11
2	5 - NLOS	-77	1.47
3	3 - NLOS	-74	1.02
4	3 - NLOS	-90	4.94
5	4 - LOS	-76	6.94
6	4 - LOS	-76	0.75
7	7 - NLOS	-88	1.94

Figura 25 – Modelo Log-Distância frente a valores medidos.



Fonte: Autor 2018

Na Figura 25 são confrontados os valores medidos com o modelo Log-distância, dado pela equação 2.1[15], um modelo simples que captura a essência da propagação do sinal.

$$\Pr(D) = \Pr(D_0) \left[\frac{D_0}{D} \right]^n \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, D_0 e $\Pr(D_0)$ são a distância e RSSI média da medida de referência. O modelo log distância se aplicou relativamente bem nesse caso, com um expoente de perda de propagação de 4,52. As discrepâncias existentes entre as curvas estão relacionadas aos diferentes fatores a que os experimentos foram submetidos.

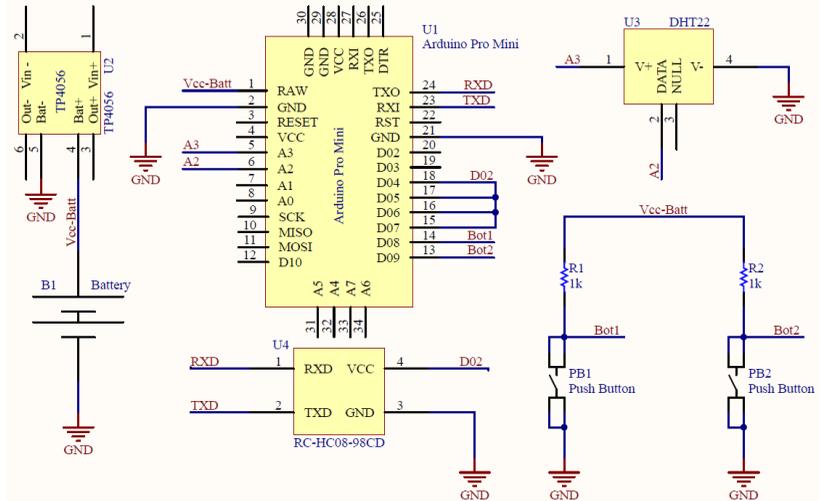
3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento detalhado do projeto com relação a três aspectos: mecânico, eletrônico, e de processamento. Serão apresentados estes aspectos com relação à versão protótipo e à versão final.

3.1 O PROTÓTIPO CONSTRUÍDO.

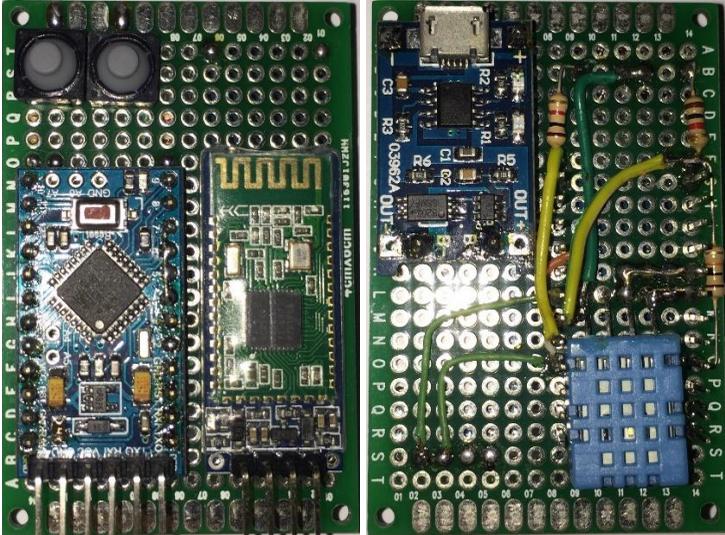
Para iniciar os testes, desenvolver o algoritmo de uso e a experiência do usuário, foi feito um protótipo baseado em Atmega, Figuras 26 e 27, usando o kit de desenvolvimento Arduino Pro-Mini [16], que é bastante utilizado por ser um *Embeddable System*. O protótipo conta com um rádio HC-08, idêntico ao utilizado nas simulações de campo, um carregador de baterias de lítio polímero (Li-Po) TP-4056 e um sensor de temperatura e umidade DHT-11.

Figura 26 – Esquemático do circuito protótipo baseado em Atmel.



Fonte: Autor 2018

Figura 27 – Protótipo montado em placa ilhada de 60x40mm.



Fonte: Autor 2018

3.1.1 O sensoriamento

O sistema realiza medidas periódicas de temperatura e umidade, alimentando o sensor, DHT11 ou DHT22, Figura 28, segundos antes da tomada de valores. O sensor possui um elemento capacitivo interno dedicado a medida de umidade, que precisa ser aquecido durante 2 segundos antes da amostragem [17].

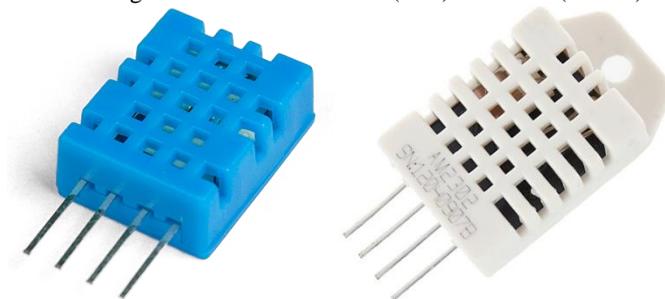
A alimentação do sensor é feita pela porta A3, que possui capacidade de fornecimento de até 40mA por porta. O sensor DHT11 consome 0.3mA durante a amostragem e 60uA em *stand-by*, já a versão melhorada DHT22 consome 1.5mA durante leitura e 50uA em *stand-by*. Portanto, a alimentação do sensor disponibilizada somente três segundos antes da amostragem evita um consumo desnecessário de até 60uA, que durante muitas horas torna-se relevante.

O sensor DHT11 pode ser alimentado com tensão entre 3.5 e 5.5V_{DC}, possui resolução de 16 Bits, repetibilidade de $\pm 1\%$ para umidade relativa (RH) e $\pm 1\%$ para a temperatura, acurácia de $\pm 5\%$ RH e $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$.

Já o DHT22 pode ser alimentado com tensão entre 3.3 e 6V DC, tem resolução de, também, 16 bits, mas com repetibilidade de $\pm 1\%$ RH

$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e acurácia de $\pm 2\%$ RH $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mostrando-se, portanto, um sensor mais preciso e mais exato, porém mais caro U\$10,00 contra U\$5,00 do DHT11.

Figura 28 – Sensor DHT11 (azul) e DHT22 (branco).



Fonte: Retirado de [17] e [18].

A umidade relativa é uma medida da concentração de vapor de água em relação à saturação para uma mesma temperatura [19], pode ser obtida através de:

$$RH(\%) = \frac{W}{W_s(T)} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde W é a concentração medida e $W_s(T)$ é a concentração de saturação. A concentração de vapor de água no ar é proporcional ao aumento da temperatura, isso significa que para uma massa de ar com vapor de água constante, a umidade relativa cai com o aumento da temperatura conforme demonstra a Figura 29.

Figura 29 – Exemplo de cálculo da umidade com dependência da temperatura.

Temperatura	25°C	25°C	25°C	20°C	10°C	0°C
Concentração de Vapor de água	5 g/kg	10 g/kg	20 g/kg	3,5 g/kg	3,5 g/kg	3,5 g/kg
Saturação	20 g/kg	20 g/kg	20 g/kg	14 g/kg	7 g/kg	3,5 g/kg
Umidade Relativa	5/20 = 25%	10/20 = 50%	20/20 = 100%	3,5/14 = 25%	3,5/7 = 50%	3,5/3,5 = 100%

Fonte: Adaptado de [19].

3.1.2 O radio Bluetooth Low Energy

O rádio transmissor utilizado para comunicação entre o *data logger* e o *smartphone* é o HC-08 [12], Figura 30, que utiliza padrão de comunicação Bluetooth V4.0 e interface TTL UART para comunicação com o microcontrolador. O módulo opera em 2.4 GHz, que é uma faixa de frequência classificada como ISM, ou seja, livre de regulamentação desde que respeitem a potência limite de transmissão e a largura de banda.

No Brasil, o espectro ISM 2.4GHz está definido de 2.4 à 2.4835 GHz, dividido em 11 canais de 22MHz de largura. A ANATEL na resolução nº506 de 2008 [20] define a intensidade limite do campo elétrico em 50 mV/m².

O HC-08, Figura 30, transmite a uma potência limite de 4dBm (2.5mW) e possui sensibilidade de -93dBm (0.5pW). Uma antena omnidirecional de microfita, também chamada de *microstrip antenna*, está implementada na PCI, a diretividade não é informada pelo fabricante, mas antenas com topologia *Bow Shaped* possuem baixa diretividade, pouco mais de 0dBi.

Figura 30 – Módulo HC-08.



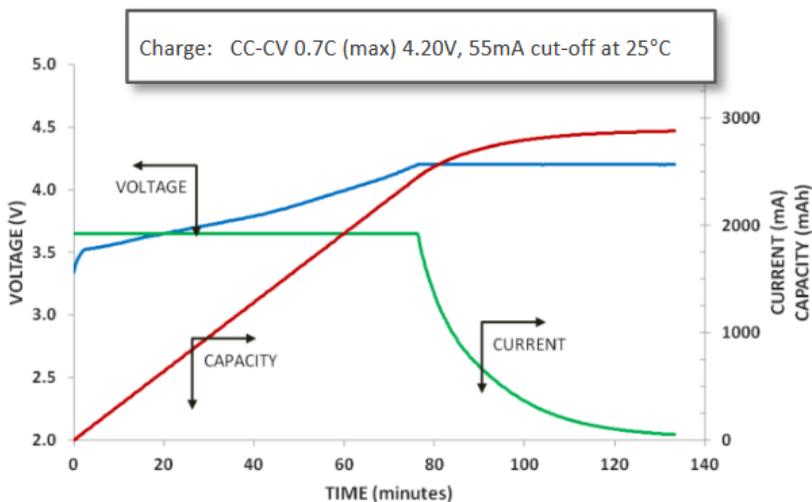
Fonte: retirado de [12]

3.1.3 O módulo carregador TP-4056

Para carregar uma célula de lítio polímero (Li-Po) um módulo carregador TP-4056 [21] foi empregado. O carregador é baseado em um circuito integrado de mesmo nome, responsável por cumprir os três estágios de carga característicos deste tipo de bateria.

Uma bateria do tipo Li-Po ou Li-Íon deve ser carregada com três estágios de carga. O primeiro estágio, chamado de pré-carga, consiste em carregamento por corrente constante de $0.1C$, ou seja, corrente igual a 10% da capacidade nominal da célula, este estágio acontece somente quando a célula se encontra abaixo de $2.7V$, o que deve ser evitado. O segundo estágio é o estágio de corrente constante, a corrente de carga neste estágio depende da célula utilizada, baterias de grande taxa de descarga podem ser carregadas com taxas muito grandes, 2 à $10C$, baterias destinadas a alta durabilidade são recarregadas com taxas entre 0.2 a $1C$. O terceiro estágio é chamado Estágio de Tensão Constante, acontece quando a célula atinge a tensão limite da tecnologia, $4.2V$. O fim do carregamento acontece quando a corrente de carga cai abaixo de $0.0002C$, onde ocorre o chamado *End-Of-Cycle*. A Figura 31 mostra os dois estágios usuais de carga, corrente constante e tensão constante, para uma célula de Lítio.

Figura 31 – Curva de carga característica de uma célula de Lítio.



Fonte: Retirado de [22].

3.1.4 Bateria Li-Po

Para alimentação do circuito uma bateria de íons de Lítio com eletrólito polimérico é empregada. Uma célula Li-Po possui tensão nominal de $3.7V$, mas quando completamente carregada chegam a $4.2V$,

e podem descarregar até o limite de 2.7V. Se ultrapassado o limite superior, a célula pode sofrer desde redução da vida útil, até uma dilatação ou explosão. Se ultrapassado o limite inferior, a célula pode sofrer uma redução da vida útil, podendo perder a capacidade de ser recarregada novamente, caso caia abaixo de 2.7V a célula necessita passar por um estágio de pré-carga até ultrapassar este limiar.

Figura 32 – Bateria utilizada.



Fonte: Retirado de [23]

A bateria em questão, Figura 32, é uma célula de 3.7V 260mAh 30C. Ou seja 962mWh ou 3463J, com corrente máxima de 30C, 30 vezes a capacidade nominal, 7.8 Amperes.

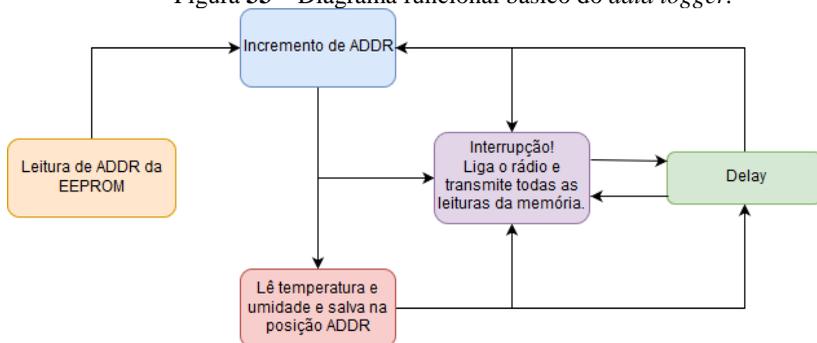
3.1.5 Diagrama de funcionamento.

O sistema foi pensado para funcionar ininterruptamente, mas tudo é gravado na memória EEPROM do ATmega328 para garantir a integridade dos dados. O programa inicia buscando o endereço de ultima escrita na memória, e a coloca em um registrador, a cada ciclo de leitura de temperatura e umidade, são colocados na memória os dados lidos e a última posição de escrita na memória.

Os botões atuam sobre os pinos 2 e 3 do micro controlador, e foram configurados como interrupção. Uma interrupção é capaz de interromper qualquer rotina dentro do programa principal e direcionar à uma tarefa

secundária. Nesse caso, quando o botão é pressionado pelo usuário, uma interrupção leva à uma sub-rotina que liga o rádio, espera um dispositivo móvel se conectar e autorizar o recebimento de dados. A transmissão do conteúdo da memória acontece de forma sequencial, com um par de temperatura e umidade por vez, separados pelo caractere não alfanumérico “#”. O diagrama funcional básico pode ser verificado na Figura 33.

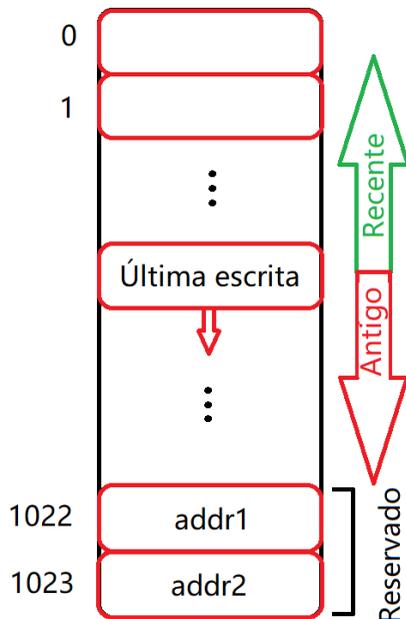
Figura 33 – Diagrama funcional básico do *data logger*.



Fonte: Autor 2018.

A memória EEPROM do ATmega328 possui 1kBytes, ou seja, 1024 palavras podem ser armazenadas. As posições de memória de número 1022 e 1023 são utilizados para armazenamento do ponteiro que indica a última escrita. Cada medida de temperatura ou umidade ocupa uma palavra, 1 Byte, então é possível armazenar 511 pares de temperatura e umidade.

Figura 34 – Organização da EEPROM.



Fonte: Autor 2018.

A Figura 34 mostra que o programa sobrepõe os valores antigos, uma vez que a lista é circular. Cabe ao usuário saber que periodicamente haverá sobreposição dos dados armazenados.

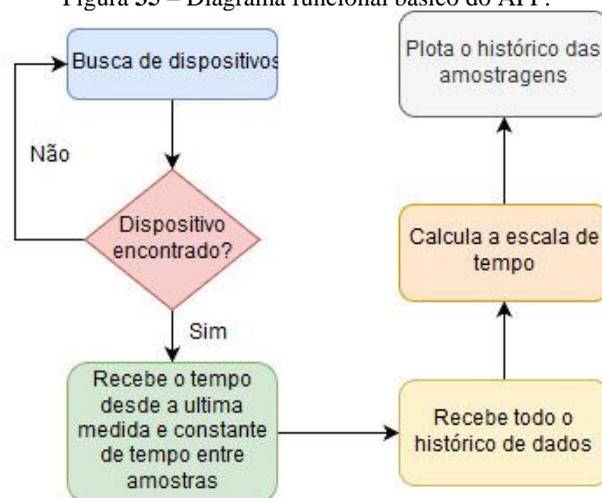
É importante salientar que os ciclos de leitura e escrita na memória EEPROM é limitado, o fabricante garante um mínimo de 100.000 ciclos [16]. Isso se deve ao desgaste dos semicondutores responsáveis por reter a informação, o fabricante ainda exige que a alimentação seja 0.3V maior que a tensão mínima de funcionamento do microcontrolador para perfeito funcionamento da memória EEPROM.

3.1.6 O aplicativo de monitoramento

O aplicativo foi desenvolvido em JavaScript, através da plataforma Apache Cordova [24] um *freeware* da Adobe Systems, que permite a criação de uma aplicação WEB para plataformas móveis, nesse caso compilado para IOS pelo Xcode, plataforma de desenvolvimento de aplicativos da Apple [25].

A aplicação, Figura 35, inicia buscando dispositivos Bluetooth dentro do alcance, Figura 36. Ao selecionar um dispositivo, uma confirmação de conexão aparece, a partir da confirmação, é enviado um código de permissão ao dispositivo, que por sua vez inicia a comunicação informando o tempo desde a última medida e a constante de tempo entre as amostragens, só então se inicia uma rotina de leitura da memória a partir do dado mais recente até o dado mais antigo. O app calcula a escala de tempo e plota os valores de temperatura e umidade sob o mesmo gráfico como pode ser visto na Figura 37.

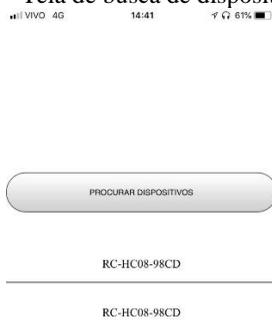
Figura 35 – Diagrama funcional básico do APP.



Fonte: Autor 2018.

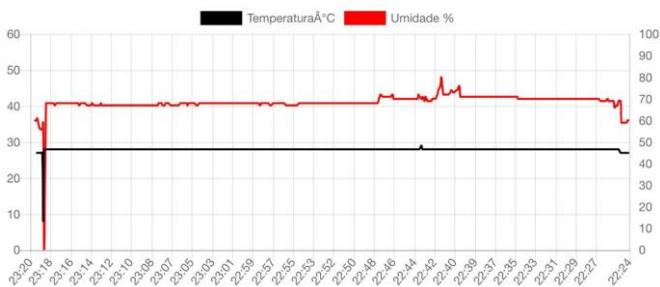
A Figura 36 mostra a tela inicial do aplicativo, onde é feita a busca e seleção dos dispositivos bluetooth disponíveis. Nesse caso, RC-HC08-98CD é a SSID padrão do modulo BLE.

Figura 36 – Tela de busca de dispositivos do aplicativo.



Fonte: Autor 2018.

Figura 37 – Gráfico gerado pelo APP.

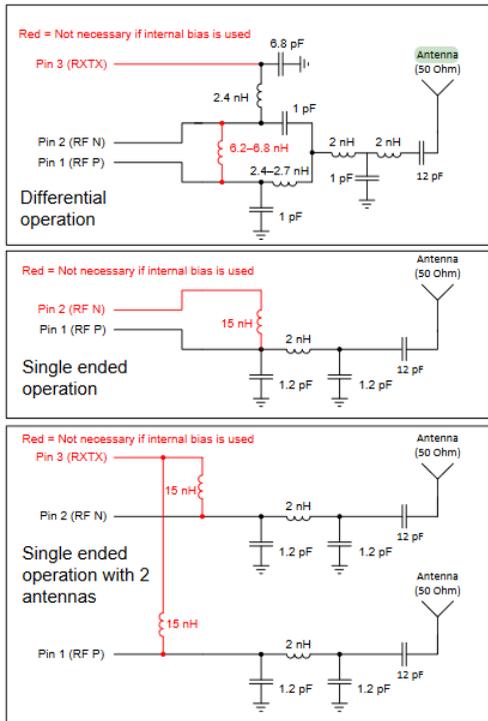


Fonte: Autor 2018.

3.2.2 Design da antena

O CC2650 pode trabalhar com três configurações diferentes de antena, chamadas no datasheet de *Diferencial operation*, *Single ended operation* e *Single ended with 2 antennas* como apresentado na Figura 39. As opções de implementação apresentam ao engenheiro de aplicação um trade-off entre desempenho, área em placa, e quantidade de componentes. Para este projeto foi implementado em placa a terceira opção, com duas antenas, que pode ser facilmente convertida na opção número 2, bastando-se não montar alguns componentes. A opção escolhida possui o pior compromisso com área de placa e número de componentes, mas permite que o microcontrolador tenha maior sensibilidade, uma vez que explora a diversidade espacial.

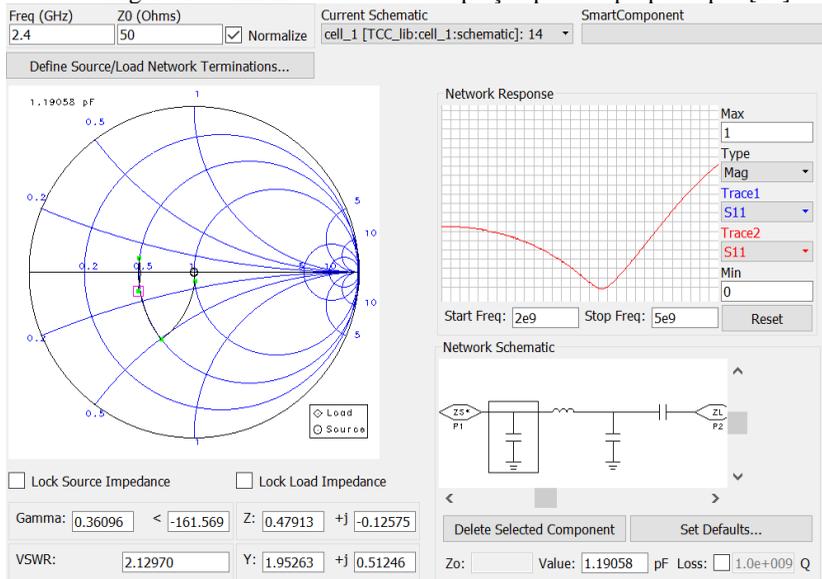
Figura 39 – Possíveis configurações do “RF front-end”.



Fonte: Retirado de [26].

O circuito auxiliar entre antena e o microcontrolador é dedicado ao casamento de impedâncias entre os mesmos. Não é explicitado no *datasheet* a impedância de entrada, mas, dado os circuitos de aplicação acima, com terminação em uma antena de impedância puramente real de 50 Ohm, supõe-se $Z_{IN}=0,479 +j0,125$ conforme calculado na Figura 39 com auxílio da ferramenta *Smith Chart Utility* do Keysigth ADS [27].

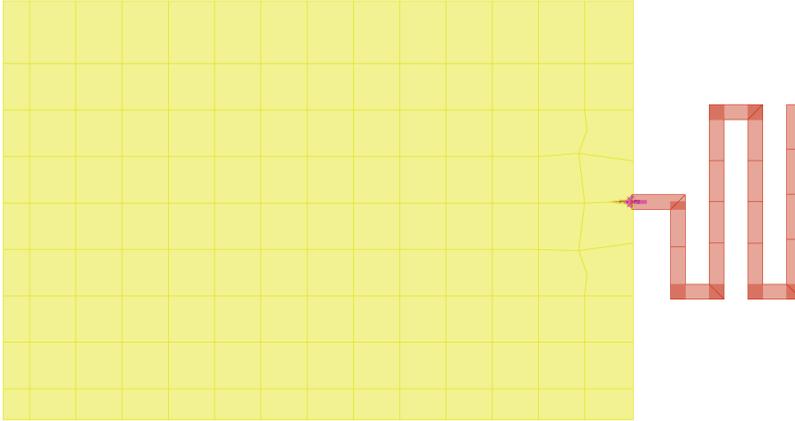
Figura 40 – Análise da rede de adaptação passiva proposta por [28].



Fonte: Autor 2018

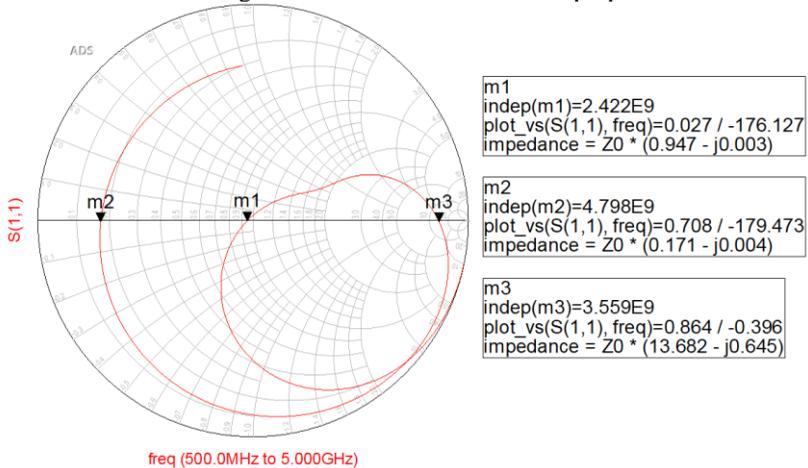
É necessária uma antena de com impedância puramente real de 50Ω em 2.4GHz. O projeto da antena, Figura 41, foi feito baseado na antena de micro fita conhecida como *Bow Shaped Antenna*, semelhante a que está presente no módulo BLE HC-08.

Figura 41 – Layout da antena *Bow Shaped* proposta.



Fonte: Autor 2018.

Figura 42 – Smith Chart da antena proposta.

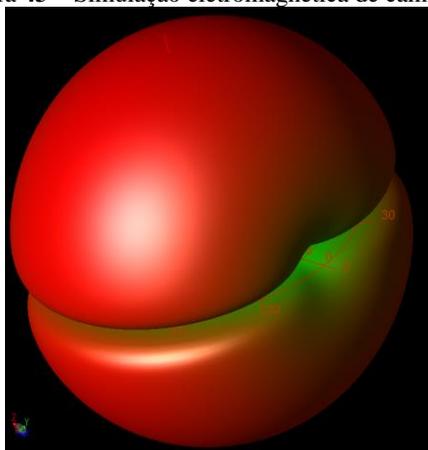


Fonte: Autor 2018.

A Smith Chart da Figura 42 demonstra a impedância característica da antena entre 500MHz e 5GHz através das perdas de retorno $S(1,1)$, nota-se que a curva é bem ampla, e sem bicos, isso mostra que a antena pouco varia sua impedância de entrada frente à variação da frequência. Uma outra característica interessante da antena é que a espiral do parâmetro S_{11} abre-se com o aumento da frequência, característico de antenas com poucas perdas [28].

A impedância normalizada obtida em 2.4GHz é $Z_{IN}=(0.947+j0.003)$, ou seja real e muito próxima de 50 Ohms, já que o ábaco está normalizado para esta impedância.

Figura 43 – Simulação eletromagnética de campos distantes.



Fonte: Autor 2018.

Da simulação eletromagnética de campos distantes mostrado na Figura 43 é possível verificar que a antena possui pouca diretividade, o diagrama de radiação é semelhante ao de uma antena omnidirecional, exceto pelo fato de haver uma redução do campo coplanar à PCB. A baixa diretividade é bem-vinda neste caso, já que o sistema opera em posições adversas e está sujeito a recepção de sinal degradado por multipercursos.

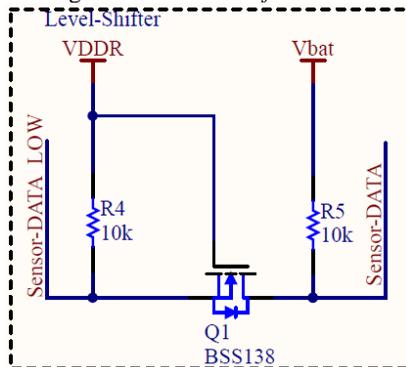
As simulações eletromagnéticas de radiação foram realizadas com o auxílio das ferramentas de layout e simulação eletromagnética do Keysigh ADS.

3.2.3 Sensoriamento

Novamente foi empregado o sensor DHT11 devido ao comportamento satisfatório verificado nos testes com o protótipo. Entretanto, o sensor não pode ser lido diretamente pelo microcontrolador, pois sua saída é serial TTL com níveis 0 e Vcc, e o microcontrolador, por possuir um conversor DC/DC interno, mantém sua tensão 1,7 V até que seja necessário ligar o rádio BLE, quando ajusta para a tensão limite 3.8V.

Para que sensor e microcontrolador possam comunicar-se em qualquer situação, foi empregado um *level-shifter* [29], Figura 44, que faz a conversão do nível lógico do sensor, dependente da tensão da bateria, para o nível lógico variável do microcontrolador.

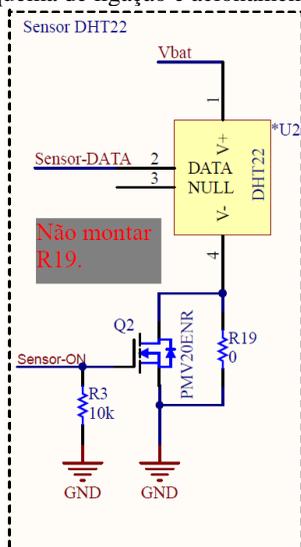
Figura 44 – *Level Shifter* com BSS138.



Fonte: Autor 2018, baseado em [29].

No protótipo, o ATmega possui tensão e corrente máxima nas portas compatíveis com os níveis lógicos e de alimentação dos sensores, o que não acontece no CC2650 além da disponibilidade de portas. A Figura 45 mostra que foi empregado um transistor N-MOS de baixo R_{DSon} [30] para interromper a alimentação do sensor em períodos de inatividade.

Figura 45 – Esquema de ligação e acionamento do sensor DHT11/22.

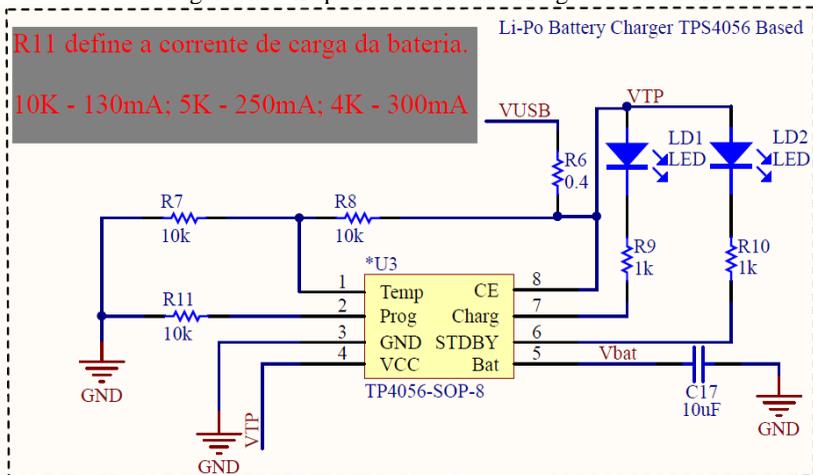


Fonte: Autor 2018.

3.2.4 Carregador de bateria Li-Po

O carregador de bateria implementado, Figura 46, é semelhante ao módulo carregador utilizado no protótipo. O controlador de carga utilizado, TP4056 [31], nesta aplicação está configurado para corrente máxima de 130mA no seu estágio de corrente constante, o que permite o uso de qualquer bateria recarregável de Li-Ion ou Li-Po disponível no mercado sem risco de comprometimento à vida útil da célula.

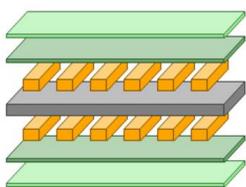
Figura 46 – Esquema elétrico do carregador de bateria.



Ao inserir o cabo na porta USB o LED LD1 se acende, indicando o início da carga, LD 2 se acende quando a carga está concluída, nesse mesmo instante LD1 se apaga.

3.2.5 Desenvolvimento da PCB

A composição e dimensões das camadas da PCB é chamada de *Stack-up*. O projeto foi feito a partir de uma placa de dupla face com as dimensões e materiais mais baratos disponíveis nos fabricantes chineses [32]. A Figura 47 mostra a composição e espessura de todas as camadas, entretanto, não informa o acabamento superficial das ilhas e *pads*. Para tal, foi escolhido o acabamento *Hot-Air* por ser bastante comum e barato.

Figura 47 – *Stack-up* da PCB.


Layer Name	Type	Material	Thickness (mm)	Dielectric Material	Dielectric Constant	Orientation
Top Overlay	Overlay					
Top Solder	Solder Mask/Co...	Surface Mater	0.01016	Solder Resist	3.5	
Top Layer	Signal	Copper	0.03556			Top
Dielectric 1	Dielectric	None	0.32004	FR-4	4.8	
Bottom Layer	Signal	Copper	0.03556			Bottom
Bottom Solder	Solder Mask/Co...	Surface Mater	0.01016	Solder Resist	3.5	
Bottom Overlay	Overlay					

Fonte: Autor 2018.

O layout final da placa é mostrado nas Figuras 48 e 49 e possui dimensões 59 x 38 mm. É possível notar no canto superior esquerdo a presença de dois furos oblongos no componente U2, implementados para otimizar a passagem do ar através do sensor.

Outro detalhe é o posicionamento das antenas A1 e A2, explorando tanto diversidade de polarização quanto espacial. O plano de terra visto na simulação das antenas é compartilhado entre as antenas, e está presente como um plano de terra no *Top* e no *Bottom Layer*.

O barramento de comunicação entre memória e o microcontrolador tem dimensões equalizadas para que os sinais sofram o mesmo atraso lógico, o mesmo foi feito com o conector CN1 (JTAG interface) dedicado a gravação e debug do *hardware*. É comum que se deixe um espaçamento igual ou maior que a soma da largura das trilhas utilizadas em um barramento para evitar *crossalking* [33], em baixas frequências, como é o caso, é apenas uma boa prática de projeto.

Figura 48 – Preview da PCB desenvolvida em Altium [34].

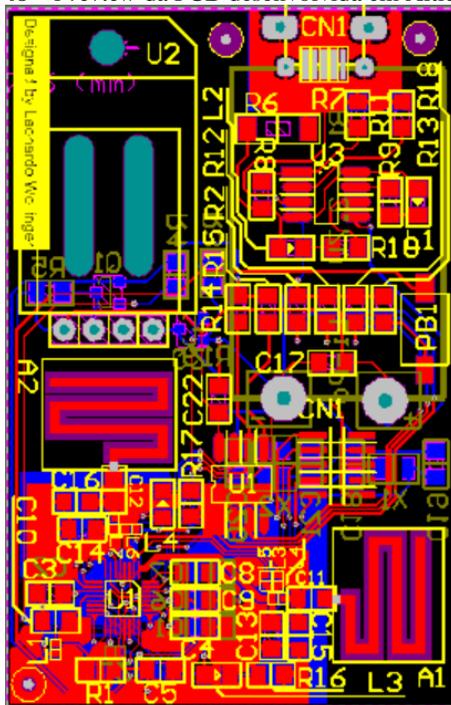
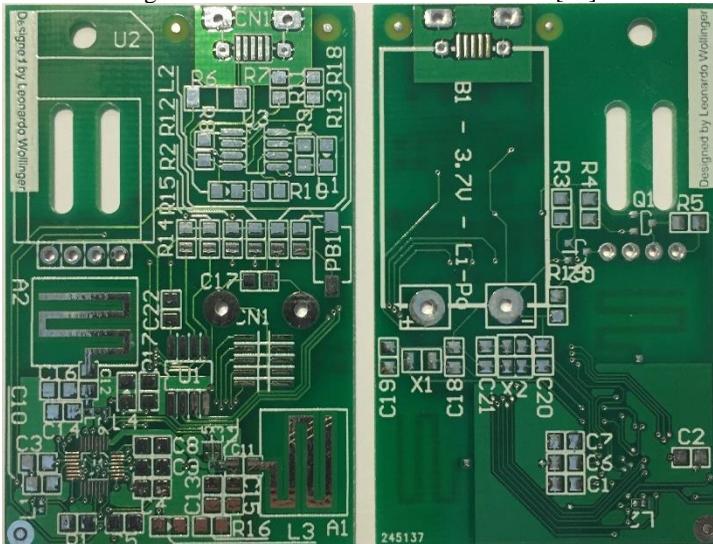


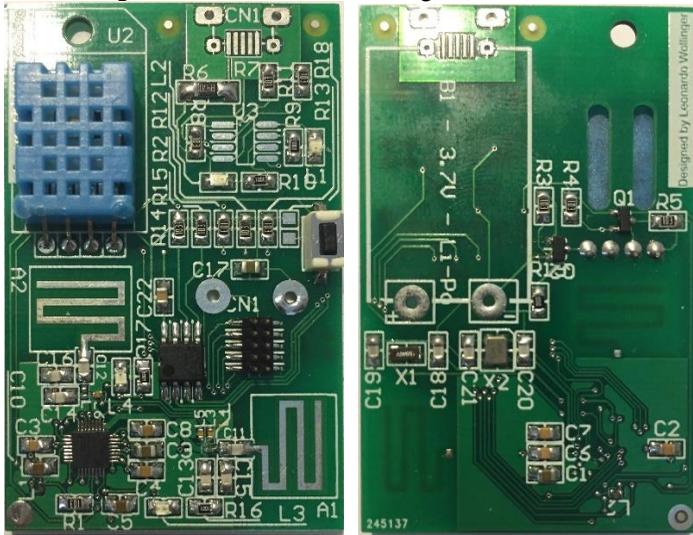
Figura 49 –PCB nua fabricada na AllPCB [19].



Fonte: Autor 2018.

A montagem foi realizada de forma manual, Figura 50, com auxílio de fluxo de solda, estação de solda de temperatura ajustável e soprador térmico, entretanto, o projeto mecânico da placa conta com seqüência de montagem em *pick-and-place*, modelos 3D dos componentes e pontos fiduciais para orientação em linha de montagem. Os únicos componentes que não podem ser montados em *pick-and-place* e soldados no forno de refusão são o conector micro USB a bateria e o sensor DHT11/22, ambos necessitam de solda PTH por serem componentes *through-hole*, os dois últimos não suportam o perfil térmico aplicado no forno, que faz um aquecimento gradual até atingir 235 à 240°C, onde acontece a fusão da pasta de solda.

Figura 50 – Resultado da montagem do *hardware*.



Fonte: Autor 2018.

3.2.6 *Bill of Materials* (BOM)

Todo projeto realizado, quando entregue, deve consistir de cinco partes: os esquemáticos elétricos, o layout da PCB, as bibliotecas com os *footprints* dos componentes, os arquivos GERBER utilizados para fabricação e montagem e a BOM.

A BOM, disponível na tabela 2, é uma lista de materiais com as informações como identificação do componente na PCB, o tipo de componente, o *footprint*, e o *Part-Number* (PN) que é o identificador exclusivo do componente.

Tabela 2 – BOM da PCB contendo quantidade, *Part Number* e descrição.

Designator	Comment	Footprint	Valor	LibRef	PN	Quantity
CN1	USB	USB Micro		USB	629105150521	1
U3	TP4056-Battery ch	SOP-8		TP4056-SOP-8	TP4056	1
U1	Texas-BLE-Cortex	CC2650 - RSM		CC2650	CC2650F128RSM	1
R6	Resistor	RES 3216	0.4	Resistor	LRC-LR1206LF-01-R400-F	1
R9, R10, R16, R17	Resistor	RES 0805	1k, 1k, 1k,	Resistor	ERJ-6E NF1001V	4
R1, R2, R3, R4, R5, R7, R8, R11,	Resistor	RES 0805	10k, 10k,	Resistor	FR1220P-103-D	12
R18	Resistor	RES 0805	270	Resistor	ESR10E2PJ271	1
R19	Resistor	RES 0805	0	Resistor	CRCW0805000020EBC	1
PB1	Push Button SMD	Push Botton SMD		Push Button SMD	ATS2D1G NC LFS	1
Q2	PMV20ENR	TO-236AB-3		PMV20ENR	PMV20ENR	1
LD1, LD2, LD3, LD4	LED	Led 0805		LED	150080RS75000	4
CN1	JTAG interface	BB02-BS101-KA8-t		JTAG interface	M50-3600542	1
L4, L7	Ind	ind 0402	2nH	RF indutor	LQG15H-S2N0S02D	2
L3, L5, L6	Ind	ind 0402	15nH	RF indutor	HL02150GTTR	3
L1, L2	Ind	ind 0402	10uH	Ind	LQW15DN100M00D	2
U2	DHT22	DHT-11-22		DHT22	385	1
X1	Cristal 32kHz - SM	Cristal 32kHz - SM		Cristal 32kHz - SM	FC-135 32.7680KA-AG0	1
X2	Cristal 24MHz - SN	Cristal 24MHz - SN		Cristal 24MHz - S	TSX-3225 24.0000MF15X-	1
C11, C12, C18, C19, C20, C21	Cap	Cap 0805	12pF, 12p	Cap	CBP08C120J1GAC	6
C3, C6, C22	Cap	Cap 0805	10nF, 10n	Cap	VJ0805Y103KXQCWIBC	3
C1, C9, C17	Cap	Cap 0805	10uF, 10u	Cap	LMK212BJ106KG-T	3
C2, C4, C7, C8	Cap	Cap 0805	100nF, 10	Cap	C0805C104M5RACTU	4
C13, C14, C15, C16	Cap	Cap 0805	1.2pF, 1.2	Cap	GQM2195C2E1R2WB12D	4
C5, C10	Cap	Cap 0805	1uF, 1uF	Cap	710-895012207051	2
Q1	BSS138	SOT23		BSS138	BSS138	1
U1	EEPROM - 512Kbi	BR24G512-3A		BR24G512-3A	BR24G512F-3AGTE2	1
B1	Battery Li-Po 3.7V	Battery 150mAh		Battery	MIKROE-2759	1

Fonte: Autor 2018.

A fabricação de 5 unidades da placa de circuito impresso na AIIPCB [19] custou US\$17,00, o frete através da DHL custou R\$20,65, entretanto, com a cobrança de imposto de importação ao custo de R\$37,81, ICMS à R\$20,65 e uma taxa de serviços administrativos de R\$65,30 a placa saiu a um custo de R\$212,41.

Já a compra de componentes suficientes para montagem de duas placas através da ARROW [35] não foi taxada e saiu US\$50,00, limite máximo para frete grátis internacional.

Todo o material comprado custou R\$412,41, cada placa montada a um custo total de R\$142,48. Por experiência própria, uma tiragem protótipo em pequena escala tem um valor cerca de 6 vezes maior que uma tiragem de 250 peças montadas no Brasil, nesse caso, uma montagem em série poderia fazer o custo cair a algo em torno de R\$23,74.

3.2.7 Autonomia de operação

Um aspecto importante para esse tipo de aplicação é a autonomia de operação em campo. Neste caso, existem apenas dois fatores limitantes, a autonomia da bateria e a memória para armazenar os dados coletados. É recomendado que a célula Li-Po não se descarregue abaixo de 2,7V afim de evitar danos a célula, a capacidade dessas baterias é calculada considerando que a carga máxima se dá quando a tensão é de 4,2V e mínima de 2,7V. O sensor deixa de funcionar com 3,3V, então a capacidade útil da bateria nessa aplicação são os primeiros 60%, durante os 40% restantes, o micro controlador pode permanecer em modo de *Shutdown*, onde não há qualquer atividade até que uma interrupção aconteça, ou seja, até que o botão de comunicação seja pressionado.

O microcontrolador possui um modo chamado *Standby*, onde o RTC, a CPU e a memória RAM se mantem ativos, neste estado o dispositivo se mantém entre as amostragens de temperatura e umidade, ou seja, a maior parte do período de funcionamento. Nesse estágio 2,7uA é drenado da alimentação se alimentado com 3V, representando um consumo de $E = 29,1\text{mJ/h}$.

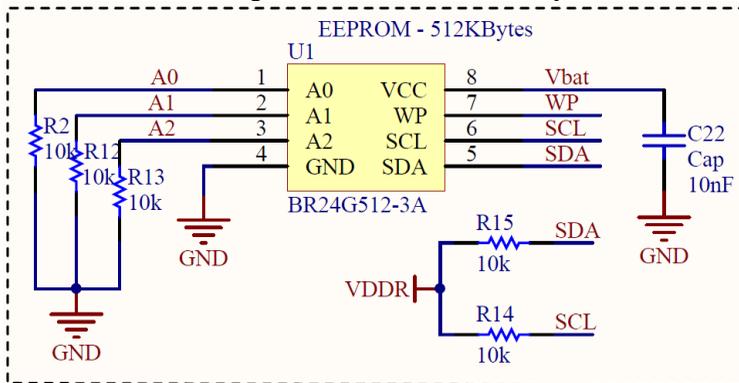
A aquisição de dados exige um período de 2 segundos para acionamento e amostragem do sensor, uma margem de 1 segundo é dada por segurança, sob dreno de 1mA a 3V, representa um consumo médio de $E = 19,8\text{mJ/h}$, considerando duas amostragens por hora.

O maior consumo de corrente do sistema é durante a comunicação BLE, onde há dreno de 9,1mA durante a transmissão e 6,1mA durante a recepção, entretanto durante curtos períodos. Considerando uma transmissão por dia, com 1 minuto de recepção de dados e transmissão de 5 minutos, o consumo médio de energia é $E = 2,58\text{mJ/h}$.

O consumo médio total é de 51,48mJ/h, utilizando a bateria sugerida na lista de materiais, MKROE-2759, de 150mAh, a autonomia limite é de 23.286 horas, 970 dias. Esta análise não considera as perdas internas da bateria e o envelhecimento da célula ao longo do tempo, que podem degradar consideravelmente a autonomia calculada.

A autonomia em campo também pode ser vista com relação à perda de dados, o microcontrolador tem 120kBytes de memória flash disponíveis para uso, além de 512kBytes de uma memória EEPROM instalada, Figura 51. Cada amostragem ocupa 2 bytes, então é possível fazer 316.000 amostragens. Fazendo duas amostragens por hora são 158.000 horas, 6.583 dias.

Figura 51 –EEPROM de 512kBytes.



Fonte: Autor 2018.

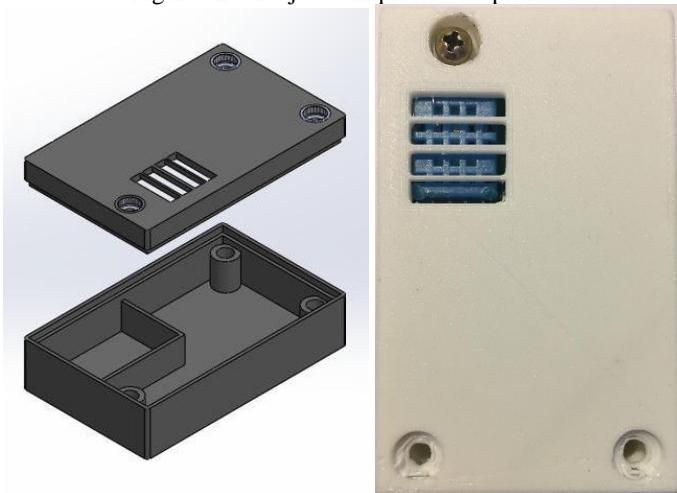
3.2.8 Aspectos Mecânicos

O sistema de monitoramento proposto estará sujeito a situações de estresse mecânico e térmico, podendo estar no interior ou preso à uma saca de armazenamento, que geralmente são empilhadas uma sobre a outra.

Para o encapsulamento foi feito o projeto de um case, em SolidWorks [36], que possui dimensões suficientes para suportar o esmagamento ao qual o sistema poderá ser submetido, sem causar torção da PCB. A placa é presa ao case apenas por um furo de fixação, os pontos de apoio no interior permitem que a torção residual da carcaça plástica não seja transferida à PCB.

O case da Figura 52 é composto de duas peças e possui paredes de 2,5 mm, encaixe casado entre os componentes e pontos de sustentação, que reduzem a necessidade de uma parede mais grossa, uma vez que conferem rigidez mecânica. As carcaças plásticas, foram impressas em PLA (poliácido láctico) por impressora 3D, o material possui resistência a tração de 49,5 Mpa [37]. As partes são unidas por um parafuso Philips M2, que também fixa a placa em seu interior.

Figura 52 – Projeto e impressão do primeiro case.



Fonte: Autor 2018.

O valor do case impresso em 3D foi de R\$50,00 por impressão, custando ao total R\$200,00 considerando as impressões que não saíram como esperado. Em uma situação de larga escala, o case poderia ser injetado em ABS ao custo de menos de R\$1,00 por unidade, entretanto é necessária a fabricação da ferramentaria para injeção ao custo de cerca de R\$20.000,00. Um molde de injeção em ABS fabricado em aço inoxidável é capaz de injetar em torno de 100.000 peças.

4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do projeto foi bem-sucedido na grande maioria dos aspectos propostos. A escolha do padrão de comunicação e testes de desempenho em campo mostraram-se um bom estudo de propagação em larga escala. O protótipo e aplicativo mostraram um funcionamento geral satisfatório, e ajudaram na compreensão de alguns conceitos básicos antes do desenvolvimento de algo mais profissional. Entretanto, a ideia inicial do aplicativo era disponibilizar os dados coletados em uma página na WEB, o que não foi possível. As informações são restritas ao *smartphone* apenas. Assim o *data logger* desenvolvido deixa de ser classificado como um dispositivo de IoT, onde este seria nó, e o celular o *gateway* de conexão com a WEB.

O desenvolvimento da proposta definitiva de *hardware* também foi um bom exercício de projeto e desenvolvimento de produto. Infelizmente, por falta de tempo, não foi possível desenvolver o firmware, somente uma verificação simples do funcionamento da MCU através de comunicação JTAG com um módulo LAUNCHXL-CC1350, que compartilha da mesma arquitetura.

A versão final do dispositivo ficou bastante versátil em termos de conectividade, já que existe a possibilidade de utilização de da pilha de protocolos do padrão IEEE802.15.4, que, além do maior alcance, permite diversas topologias de rede, e, portanto, as mais variadas aplicações.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Agropecuária puxa o PIB de 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/noticias/agropecuaria-puxa-o-pib-de-2017>> Acesso em: dezembro de 2018.
- [2] BRASIL. **EMBRAPA**. Soja em números (Safrá 2017/2018). Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>> Acesso em: dezembro de 2018.
- [3] STALBRAND, F. **M2M/IoT Applications in the Agricultural Industry**. Disponível em: <<http://www.berginsight.com/ReportPDF/ProductSheet/bi-agriculture-ps.pdf>> Acesso em: outubro de 2018
- [4] LANDAU, E.C.; MAGALHÃES, P.C.; GUIMARÃES, D.P. Germinação do milho por descontrole de temperatura e umidade. **Embrapa Milho e Sorgo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 201?.
- [5] SILVA, B. A., ROSA, R., SILVA, J. R., SAVI, G. D., & SCUSSELLI, V. M. (2017). Natural occurrence of fumonisins and characteristics of pamonhas sweet type from Southern Brazil. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 10(3), 222-227.
- [6] EVANS, D. **The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything**. Disponível em <https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf> Acesso em: novembro de 2018
- [7] LINKLABS. **LPWANs**. Disponível em: <<http://info.link-labs.com/hubfs/LPWAN-Brochure-Interactive.pdf>> Acesso em: dezembro de 2018
- [8] SIEKKINEN, M., HIIENKARI, M., NURMINEN, J. K., & NIEMINEN, J. How low energy is bluetooth low energy? comparative measurements with zigbee/802.15. 4. In: **Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2012 IEEE**. IEEE, 2012. p. 232-237.

- [9] TELECO. **Espectro de frequência ISM**. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswifi1/pagina_5.asp> Acesso em: outubro de 2018.
- [10] BLUETOOTH. **Especificação do Bluetooth Low Energy**. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/radio-versions>> Acesso em: novembro de 2018.
- [11] CHEUN, KYUNGWHOON; CHOI, KWONHUE. Performance of FHSS multiple-access networks using MFSK modulation. **IEEE Transactions on Communications**, v. 44, n. 11, p. 1514-1526, 1996.
- [12] HC-08 BLUETOOTH UART COMMUNICATION MODULE V2.0. **User Manual**. Disponível em: <http://www.wavesen.com/mysys/db_picture/news3/2015121885146101.pdf> Acesso em: outubro de 2018.
- [13] DURGIN, Gregory D.; RAPPAPORT, Theodore S.; DE WOLF, David A. New analytical models and probability density functions for fading in wireless communications. **IEEE Transactions on Communications**, v. 50, n. 6, p. 1005-1015, 2002.
- [14] YACoub, Michel Daoud; BAUTISTA, JE Vargas; DE REZENDE GUEDES, L. Guerra. On higher order statistics of the Nakagami-m distribution. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 48, n. 3, p. 790-794, 1999.
- [15] GOMES, R. D., QUEIROZ, D. V., FONSECA, I. E., & ALENCAR, M. S. Modelo para simulação realista de redes de sensores sem fio industriais. **XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, p. 1-5, 2015.
- [16] ATMEL. **Datasheet do microcontrolador ATmega328**. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-42735-8-bit-avr-microcontroller-atmega328-328p_datasheet.pdf> Acesso em: outubro de 2018.
- [17] AOSONG ELECTRONICS. **Datasheet do sensor DHT22**. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>> Acesso em: outubro de 2018.

[18] DHT11 HUMIDITY & TEMPERATURE SENSOR. **User Manual**. Disponível em: <<https://www.mouser.com/ds/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>> Acesso em: outubro de 2018.

[19] UFPR. **Definição de umidade relativa (RH)**. Disponível em: <<https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap5/cap5-3-3.html>> Acesso em: novembro de 2018.

[20] BRASIL. **Agência Nacional de Telecomunicações**. Resolução nº - 506, de 1º - de julho de 2008. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/23-2008/104-resolucao-506>> Acesso em: outubro de 2018.

[21] MECHATRONICX CENTRAL. **Modulo carregador de baterias de Lítio TP4056**. Disponível em: <<http://radiolux.com.ua/files/pdf/TP4056-manual.pdf>> Acesso em: novembro de 2018.

[22] PANASONIC. **Datasheet da bateria NCR18650**. Disponível em: <<https://engineering.tamu.edu/media/4247819/ds-battery-panasonic-18650ncr.pdf>> Acesso em: outubro de 2018.

[23] EACHINE. **Bateria 3,7V 260mAh**. Disponível em: <https://www.banggood.com/pt/Upgrade-Eachine-H8-Mini-H8-3D-Battery-3_7V-260mAh-RC-Quadcopter-Spare-Parts-p-987818.html?gmcCountry=BR¤cy=BRL&createTmp=1&utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_union&utm_content=2zou&utm_campaign=ssc-br-all&gclid=Cj0KCQiAxZPgBRCmARIsAOrTHSae1WbICoW8nv_yA1zZe3d9XX_32h-TSTWavR9olFiOaMpX1to6-QaAuGmEALw_wcB&cur_warehouse=CN> Acesso em: novembro de 2018.

[24] ADOBE SYSTEMS. **Apache Cordova**. Disponível em <<https://cordova.apache.org/>> Acesso em: novembro de 2018

[25] APPLE INC. **Xcode Apple**. Disponível em <<https://developer.apple.com/xcode/>> Acesso em: agosto de 2018

[26] TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet do microcontrolador CC2650**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2650.pdf>> Acesso em: novembro de 2018.

[27] KEYSIGHT TECHNOLOGYS. Advanced design system (ADS). Disponível em: <<https://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads?cc=BR&lc=por>> Acesso em: agosto de 2018

[28] GONZALEZ, GUILLERMO. **Microwave Transistor Amplifiers - Analysis and Design**, 2nd ed, Prentice Hall, 1997

[29] NEXPERIA. **Application note “Level Shifting techniques in I²C-Bus Design”**. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN10441.pdf>> Acesso em: novembro de 2018.

[30] NEXPERIA. MOSFET de baixo RDSon – **User Manual**. Disponível em: <<https://assets.nxp.com/documents/data-sheet/PMV20EN.pdf>> Acesso em: novembro de 2018.

[31] NANJING TOP POWER ASIC CORP. **Controlador de carga de baterias de Lítio TP4056**. Disponível em: <<https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>> Acesso em: novembro de 2018.

[32] ALLPCB. **Fabricante de placas de circuito impresso sediada em Hangzhou-China**. Disponível em: <<https://www.allpcb.com/>> Acesso em: novembro de 2018.

[33] ANISH, D.; KUMAR, G. KRANTHI; JAGDALE, ROHITA. Minimization of crosstalk in high speed PCB. In: **Proceedings of the 12th international conference on Networking, VLSI and signal processing**. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2010. p. 104-107.

[34] ALTIUM DESIGNER FREE TRIAL. **Altium 14.1.5**. Disponível em <<https://www.altium.com/>> Acesso em setembro de 2018

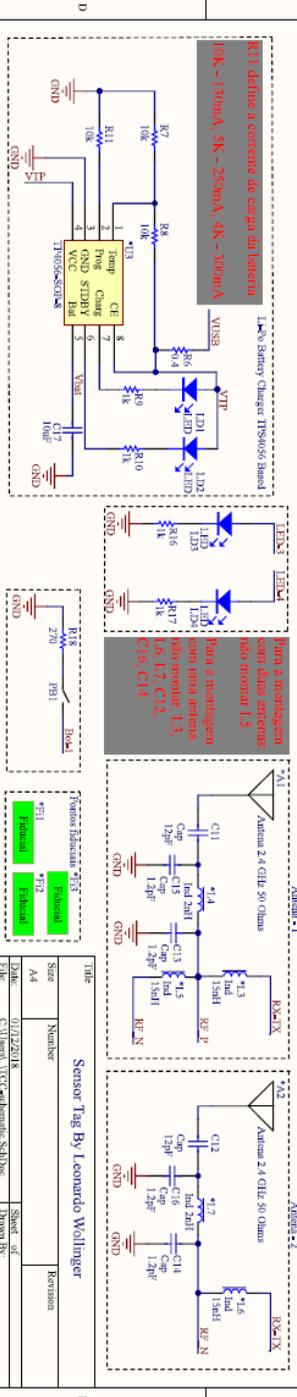
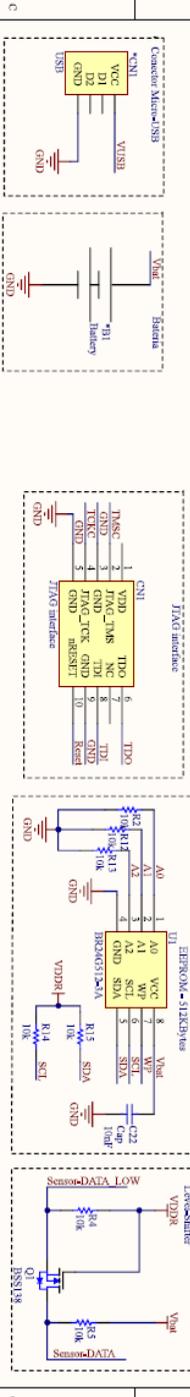
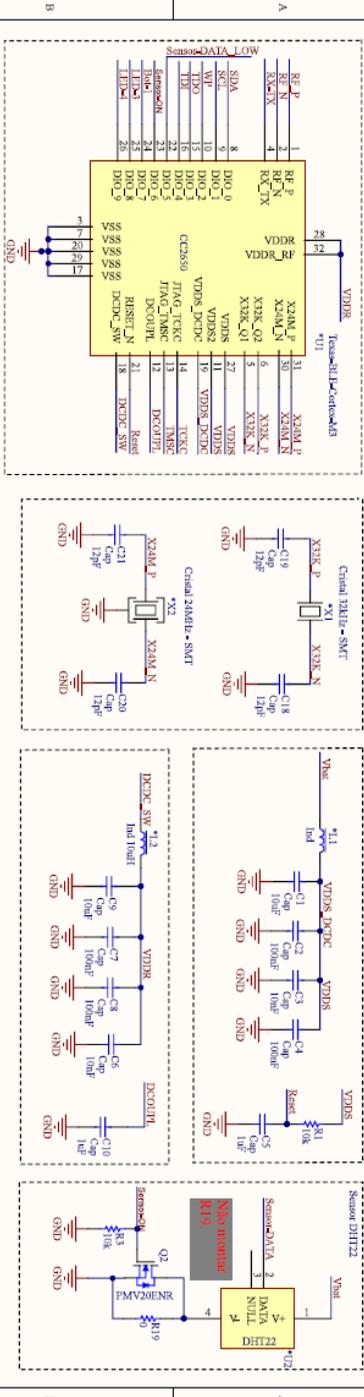
[35] ARROW. **Eletronic Components**. Disponível em: <<https://www.arrow.com/>> Acesso em: setembro de 2018

[36] DASSAULT SYSTEMES. Solid Works 2018. Disponível em: <https://www.solidworks.com/pt-br?utm_source=facebook&utm_medium=postlink&utm_campaign=lancamento2019&utm_content=carrossel2> Acesso em: outubro de 2018

[37] ULTIMAKER. **Ficha técnica do PLA utilizado na impressão 3D.** Disponível em: <<https://ultimaker.com/download/67603/TDS%20PLA%20v3.011-por-PT.pdf>> Acesso em: novembro de 2018.

APÊNDICE A – Esquemático completo do *hardware* definitivo

A imagem a seguir mostra o conteúdo final desenvolvido no arquivo de desenvolvimento de esquemáticos no software de desenvolvimento de PCB Altium 14.1.5[33].



Title			
Sensor Tag By Leonardo Wollinger			
Size	Number	Sheet 17	Revision
A4		01/10/2016	
Author	CC-BY-NC-ND	License	BY-NC-ND

Fusíveis Habituais *F15	
F11	Fusível
F12	Fusível

Nota 3: Resistorização sem classe anterior. Não usar resistorização de 100 Ohms (R15, R17, C15, C16).

Nota 4: Resistorização sem classe anterior. Não usar resistorização de 100 Ohms (R15, R17, C15, C16).

Nota 5: Resistorização sem classe anterior. Não usar resistorização de 100 Ohms (R15, R17, C15, C16).

Nota 6: Resistorização sem classe anterior. Não usar resistorização de 100 Ohms (R15, R17, C15, C16).

Nota 7: Resistorização sem classe anterior. Não usar resistorização de 100 Ohms (R15, R17, C15, C16).

APÊNDICE B – Código utilizado no protótipo.

O programa apresentado a seguir é o resultado final do código desenvolvido para o protótipo baseado em arquitetura Atmel.

```
#include <dht.h> // Lib do sensor de temperatura e umidade.
#include <EEPROM.h> //Lib para usar a eeprom.

int addr1 = EEPROM.read(1022); //MSB do endereço de escrita da memoria
int addr2 = EEPROM.read(1023); //LSB do endereço de escrita da memoria
int addr = (addr1 << 8) + addr2; // endereço de escrita na memória começa em "(addr1 * 256) + addr2".
int interrupcao = 1; //interupção no pino zero
volatile int numInterruapt = 1;
volatile bool RadION = 0;
volatile int ReadList = 0;
int readTH;
int count = 0;

dht DHT; // Cria um objeto da classe dht
uint32_t timer = 0;

void funcaoInterrupcao() //Função interrupção
{
  RadION = 1; //Seta uma flag a ser tratada na função principal
}

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Inicializa serial com taxa de transmissão de 9600 bauds
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT); // Led Builtin
  pinMode(A1, OUTPUT); // Pino utilizado para alimentar o sensor DHT
  pinMode(4, OUTPUT); // Pino utilizado para alimentar o radio BLE
  pinMode(5, OUTPUT); // Pino utilizado para alimentar o radio BLE
  pinMode(6, OUTPUT); // Pino utilizado para alimentar o radio BLE
  pinMode(7, OUTPUT); // Pino utilizado para alimentar o radio BLE
  //pinMode(interruptbutton, INPUT_PULLUP); // Pino utilizado para Botão 1
  //pinMode(BOT2, INPUT_PULLUP); // Pino utilizado para Botão 2
  attachInterrupt(interrupcao, funcaoInterrupcao, FALLING); //Configurando a interrupção,
}

void loop()
{
  if(RadION)
  {
    digitalWrite(4, HIGH); //Alimenta o radio BLE.
    digitalWrite(5, HIGH); //Alimenta o radio BLE.
    digitalWrite(6, HIGH); //Alimenta o radio BLE.
    digitalWrite(7, HIGH); //Alimenta o radio BLE.
    delay (50000);

    if (Serial.available() >0)
    {
      /* input= Serial.read();
      Serial.print(EEPROM.read(0) * 256 + EEPROM.read(1)); //Verificação do valor ADDR, memoria do proximo dado gravado.
      Serial.println("Medidas de temperatura e umidade");
      //Exibe na serial o valor de umidade
      Serial.print("Umidade:");
      Serial.print(DHT.humidity);
      Serial.println(" %");

      //Exibe na serial o valor da temperatura
      Serial.print("Temperatura:");
      Serial.print(DHT.temperature);
      Serial.println(" °C");
      */
      timer = millis(); // Atualiza a referência
      Serial.print(timer); //Tempo desde a ultima medida.
      Serial.println(" - Tempo desde a ultima medida");
      readTH = addr - 1; //addr - 1 é o dado mais recente de temperatura
      Serial.print(readTH); //Verificação do valor ADDR do ultimo dado gravado.
      Serial.println(" Posição da ultima escrita"); //Medida atribuida ao horario atual - timer.
    }
  }
}
```

```

for (int i=0; i <= 1020; i++) //laço de leitura da memoria, memoria utilizada de 0 à 1022
{
  String val = String(EEPROM.read(readTH - count)) + "#" + String(EEPROM.read(readTH - count + 1));
  Serial.println(val);

  count += 2;

  if (addr = 0) // Teste de limite de memoria.
  {
    count = addr - 1020;
  }
  delay(100);
}

digitalWrite(4, LOW); //Desliga o radio ao fim do laço de interrupção
digitalWrite(5, LOW); //Desliga o radio ao fim do laço de interrupção
digitalWrite(6, LOW); //Desliga o radio ao fim do laço de interrupção
digitalWrite(7, LOW); //Desliga o radio ao fim do laço de interrupção
noInterrupts();
RadiON = 0;
interrupts();
}

if(millis() - timer>= 5000) // Executa se tiver passado 5000 ms
{
  digitalWrite(A1, HIGH); //Alimenta o sensor.
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); //Led segue o sensor.
  delay(2000); //Sensor so mede depois de 2 segundos ligado.
  DHT.read11(A0); //chama método de leitura da classe dht, com o pino de transmissão de dados ligado no pino A0
  noInterrupts(); //interrompe as interrupções aqui para para garantir uma estrutura de dados consistente.
  EEPROM.write(addr, DHT.humidity); //Armazena o valor de umidade na posicao addr
  addr = addr + 1; //Incrementa a posição na memoria
  EEPROM.write(addr, DHT.temperature); //Armazena o valor de umidade na posicao addr
  addr = addr + 1; //Incrementa a posição na memoria
  interrupts();

  digitalWrite(A1, LOW); //Desliga o sensor ao fim do ciclo de medição
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); //Desliga o sensor ao fim do ciclo de medição

  if (addr >= 1022) // Teste de limite de memoria.
  {
    addr = 0;
  }
  noInterrupts(); // interrompe as interrupções aqui para para garantir uma estrutura de dados consistente.
  EEPROM.write(1022, addr/256); //coloca MSB de addr na posição 0 da EEPROM
  EEPROM.write(1023, addr%256); //coloca MSB de addr na posição 1 da EEPROM
  interrupts();
  timer = millis(); // Atualiza a referência
}
}

```