



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE QUIXADÁ**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

**EMANUEL ANGELIM PEREIRA**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA REDE DE SENSORES SEM FIO**  
**LORA ® UTILIZANDO ENERGIA SOLAR**

**QUIXADÁ - CEARÁ**

**2019**

EMANUEL ANGELIM PEREIRA

IMPLEMENTAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA REDE DE SENSORES SEM FIO LORA  
® UTILIZANDO ENERGIA SOLAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Campus de Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Me. Francisco Helder  
Candido dos Santos Filho.

QUIXADÁ - CEARÁ

2019

EMANUEL ANGELIM PEREIRA

IMPLEMENTAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA REDE DE SENSORES SEM FIO LORA  
® UTILIZANDO ENERGIA SOLAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia de Compu-  
tação do Campus de Quixadá da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do grau de bacharel em Engenharia de  
Computação.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Francisco Helder Candido dos Santos  
Filho. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. André Ribeiro Braga  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas Stancanelli  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico esta monografia aos meus pais e avós,  
pilares da minha formação como ser humano.  
Palavras não são suficientes para demonstrar a  
minha gratidão por sua dedicação, apoio, amor  
e confiança em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe Edisônia, seus exemplos de vida, cuidado e carinho foi o que deu sentido para continuar crescendo na vida e superando todos os desafios.

Ao meu Pai Marcelino, seu enorme apoio, presença e positividade significou esperança, segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

Aos meus avós Carmelita, Maria e Mauro, que sempre sonharam em me ver formado e se preocuparam comigo apoiando e confiando em mim.

Aos meus irmãos, tios e primos, por me apoiarem e estarem próximo de mim.

Ao Prof. Francisco Helder Candido dos Santos Filho por me orientar no meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos professores, por me repassar o seu conhecimento técnico e experiências de vida, vocês foram essenciais nessa jornada.

Ao Prof. Alisson Barbosa de Souza por apoiar e sugerir o tema principal deste trabalho.

A minha prima Débora Ferreira, por estar sempre comigo e por revisar a ortografia do texto deste trabalho.

Ao Robert Cabral, pelo apoio durante toda execução do trabalho.

Ao meu amigo Túlio, por revisar todo o trabalho.

“O impossível existe até que alguém duvide dele  
e prove o contrário.”

(Albert Einstein)

## RESUMO

As Redes de Sensores sem Fio estão sendo utilizadas cada vez mais em diversos tipos de sistemas voltados para monitoramento. Entre os protocolos de comunicação utilizados por esses sistemas, o LoRa<sup>®</sup> vem ganhando destaque devido suportar transmissões em distâncias muito maiores que os demais, demandando pouca energia. Utilizar fontes de energias renováveis como energia solar, também tem sido uma tendência, com o intuito principal de não agredir o meio ambiente bem como tornar a aplicação do sistema mais barata a longo prazo. O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo para atuar em uma rede de sensores sem fio utilizando o protocolo LoRa<sup>®</sup>, assim como energia solar como fonte de alimentação do sistema. O dispositivo deverá dispor de alguns sensores de forma que o sistema seja voltado para aplicações no campo, tornando processos como agricultura mais eficientes. Entre os resultados há o detalhamento do processo de seleção de cada componente do dispositivo assim como o comportamento de cada sensor durante um período de 24 horas de leituras e transmissões. Além disso é apresentado as funcionalidades do dispositivo e as principais configurações dos periféricos e módulos do microcontrolador.

**Palavras-chave:** LoRa. Microcontrolador. Redes de Sensores sem Fio. Sensor.

## **ABSTRACT**

Wireless Sensor Networks are increasingly being used in various types of systems focused on monitoring. Among the communication protocols used by these systems, LoRa ® has gained prominence because it supports transmission over much longer distances than the others, requiring little energy. Use renewable energy sources as energy solar, has also been a trend, with the main purpose of not harming the environment as well as making the system application cheaper in the long run. The present thesis proposes the development of a device to operate in a wireless sensors network using LoRa ® protocol, as well as solar energy as a source of system power. The device should have some sensors in such a way that the system be focused on agriculture applications, improving the process. The results include a detailed process for selecting each device component as well as the behavior of each sensor over a 24 hours of reading and transmitting period. In addition, the device main features are shown as configurations of microcontroller peripherals and modules.

**Keywords:** LoRa. Microcontroller. Wireless Sensor Network. Sensor.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo genérico de um sensor . . . . .	23
Figura 2 – Modelos de sensores . . . . .	24
Figura 3 – Exemplo de rede Rede de Sensores sem Fio . . . . .	25
Figura 4 – Topologias de uma rede <i>Zigbee</i> . . . . .	27
Figura 5 – Modos de operação da rede Wi-Fi . . . . .	28
Figura 6 – Consumo dos transmissores <i>LoRa</i> ® SX1276 e Wi-Fi ESP-01 . . . . .	29
Figura 7 – Diagrama de bloco de um nó genérico de uma rede de sensores sem fio . . .	29
Figura 8 – Corrente de alimentação dos transmissores <i>LoRa</i> ® SX1276 e RN2903 . . .	36
Figura 9 – Esquemático do circuito de alimentação. . . . .	39
Figura 10 – Esquemático do circuito de sensoramento. . . . .	40
Figura 11 – Esquemático do circuito do microcontrolador, transmissor e led. . . . .	40
Figura 12 – Desenho da placa do protótipo. . . . .	41
Figura 13 – Versão final da placa do protótipo. . . . .	46
Figura 14 – Dispositivo em estado de operação. . . . .	47
Figura 15 – Níveis de Luminosidade . . . . .	50
Figura 16 – Níveis de Temperatura . . . . .	51
Figura 17 – Níveis de Umidade relativa do Ar . . . . .	52
Figura 18 – Níveis de Umidade do solo . . . . .	53
Figura 19 – Divisor de tensão com dois resistores de 10 $k\Omega$ . . . . .	53
Figura 20 – Níveis de Tensão de Alimentação . . . . .	54
Figura 21 – Níveis de luminosidade entre 08:00 e 15:00 . . . . .	55
Figura 22 – Níveis de tensão de alimentação entre 08:00 e 15:00 . . . . .	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Banda de frequência por região . . . . .	26
Tabela 2 – Modelos de sensor de Temperatura/Umidade . . . . .	36
Tabela 3 – Modelos de sensor de Luminosidade . . . . .	37

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Comparação entre os trabalhos relacionados e o proposto . . . . .	22
Quadro 2 – Aplicações de redes de sensores sem fio . . . . .	29
Quadro 3 – Requisitos do sistema . . . . .	31

## LISTA DE CÓDIGOS-FONTE

Código-fonte 1	– Função principal . . . . .	43
Código-fonte 2	– Função de inicialização do sistema . . . . .	43
Código-fonte 3	– Estrutura que contém os períodos configuráveis do temporizador . . .	44
Código-fonte 4	– Função executada periodicamente . . . . .	45
Código-fonte 5	– Função executada periodicamente . . . . .	48



## LISTA DE SÍMBOLOS

$km$	Distância
$km^2$	Área
$kHz$	Frequência
$MHz$	Frequência
$GHz$	Frequência
$dBm$	Potência
$V$	Tensão Elétrica
$mA$	Corrente elétrica
$\mu A$	Corrente elétrica
$k\Omega$	Resistência Elétrica
$MHz$	Frequência
$^{\circ}C$	Temperatura
$Lux$	Luminosidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS . . . . .</b>	<b>18</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral . . . . .</i>	<i>18</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos . . . . .</i>	<i>18</i>
<b>2</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Development of Plough-able RFID Sensor Network Systems for Precision Agriculture . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Design and implementation of WSN for precision agriculture in white cabbage crops . . . . .</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Monitoring device for culture substrate growth parameters for precision agriculture . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Análise comparativa . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>3.1</b>	<b>Sensores . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>3.2</b>	<b>Rede de sensores sem fio . . . . .</b>	<b>24</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Desafios em redes de sensores sem fio . . . . .</i>	<i>25</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Protocolos mais utilizados em redes de sensores sem fio . . . . .</i>	<i>26</i>
<i>3.2.2.1</i>	<i>LoRa® . . . . .</i>	<i>26</i>
<i>3.2.2.2</i>	<i>Zigbee . . . . .</i>	<i>26</i>
<i>3.2.2.3</i>	<i>Wi-Fi . . . . .</i>	<i>27</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Estrutura básica de um nó em uma rede de sensores sem fio . . . . .</i>	<i>28</i>
<b>3.3</b>	<b>Agricultura de Precisão . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Definir requisitos do sistema . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>Definir protocolo de comunicação que será suportado pelo sistema . . . . .</b>	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise dos componentes básicos de <i>hardware</i> do sistema . . . . .</b>	<b>32</b>
<i>4.3.1</i>	<i>Módulo de transmissão . . . . .</i>	<i>32</i>
<i>4.3.2</i>	<i>Módulo de sensoramento . . . . .</i>	<i>32</i>
<i>4.3.3</i>	<i>Módulo de processamento . . . . .</i>	<i>32</i>
<b>4.4</b>	<b>Projetar sistema eletrônico e sistema de alimentação . . . . .</b>	<b>33</b>

<b>4.5</b>	<b>Implementar as funcionalidades de acordo com os requisitos . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>4.6</b>	<b>Montar um protótipo . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>4.7</b>	<b>Definir os cenários de testes . . . . .</b>	<b>34</b>
<b>4.8</b>	<b>Analisar, validar e apresentar os resultados . . . . .</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Protocolo de comunicação . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>5.2</b>	<b>Seleção de componentes de <i>hardware</i> . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>5.2.1</b>	<b><i>Módulo de transmissão . . . . .</i></b>	<b>35</b>
<b>5.2.2</b>	<b><i>Módulo de sensoriamento . . . . .</i></b>	<b>35</b>
<b>5.2.2.1</b>	<i>Sensor de temperatura e umidade do ar . . . . .</i>	<i>36</i>
<b>5.2.2.2</b>	<i>Sensor de temperatura do solo . . . . .</i>	<i>36</i>
<b>5.2.2.3</b>	<i>Sensor de umidade do solo . . . . .</i>	<i>37</i>
<b>5.2.2.4</b>	<i>Sensor de luminosidade . . . . .</i>	<i>37</i>
<b>5.2.3</b>	<b><i>Módulo de processamento . . . . .</i></b>	<b>37</b>
<b>5.2.4</b>	<b><i>Módulo de alimentação . . . . .</i></b>	<b>38</b>
<b>5.3</b>	<b>Esquemático e desenho da placa . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>5.3.1</b>	<b><i>Configuração dos pinos do microcontrolador . . . . .</i></b>	<b>38</b>
<b>5.3.2</b>	<b><i>Módulo de alimentação . . . . .</i></b>	<b>39</b>
<b>5.3.3</b>	<b><i>Módulo de sensoriamento . . . . .</i></b>	<b>39</b>
<b>5.3.4</b>	<b><i>Microcontrolador, transmissor e led . . . . .</i></b>	<b>40</b>
<b>5.3.5</b>	<b><i>Desenho da placa . . . . .</i></b>	<b>40</b>
<b>5.4</b>	<b>Software do sistema . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>5.4.1</b>	<b><i>Ferramentas utilizadas . . . . .</i></b>	<b>41</b>
<b>5.4.1.1</b>	<i>MPLAB X IDE . . . . .</i>	<i>41</i>
<b>5.4.1.2</b>	<i>Circuito de debug PICKit 3 . . . . .</i>	<i>41</i>
<b>5.4.2</b>	<b><i>Configurações dos periféricos do microcontrolador . . . . .</i></b>	<b>42</b>
<b>5.4.3</b>	<b><i>Função principal . . . . .</i></b>	<b>43</b>
<b>5.4.4</b>	<b><i>Inicialização do sistema . . . . .</i></b>	<b>43</b>
<b>5.4.5</b>	<b><i>Rotina de interrupção . . . . .</i></b>	<b>45</b>
<b>5.4.6</b>	<b><i>Modo de alerta . . . . .</i></b>	<b>46</b>
<b>5.5</b>	<b>Protótipo . . . . .</b>	<b>46</b>
<b>5.6</b>	<b>Testes . . . . .</b>	<b>47</b>



5.6.1	<i>Transmissor LoRa® SX1276</i> . . . . .	48
5.6.2	<i>Luminosidade</i> . . . . .	50
5.6.3	<i>Temperatura</i> . . . . .	50
5.6.4	<i>Umidade</i> . . . . .	51
5.6.4.1	<i>Umidade do ar</i> . . . . .	51
5.6.4.2	<i>Umidade do solo</i> . . . . .	51
5.6.5	<i>Tensão de Alimentação</i> . . . . .	52
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	56
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	57
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	60
	<b>APÊNDICE A</b> – Esquemático do dispositivo . . . . .	60
	<b>APÊNDICE B</b> – Desenho da placa do dispositivo . . . . .	61

## 1 INTRODUÇÃO

Entre os maiores problemas e desafios enfrentados atualmente pela humanidade, incluem-se: a falta de água própria para consumo, mudanças drásticas no clima e produção de comida insuficiente, principalmente em regiões mais pobres (ILIE-ABLACHIM *et al.*, 2016). Na região Nordeste do Brasil muitos agricultores são bastantes limitados em relação ao período do ano em que podem realizar o plantio em médias e grandes proporções, pois além da taxa de precipitação ser muito baixa, toda essa precipitação ocorre durante um único e pequeno período do ano. Dessa forma, durante o período de seca, o agricultor não consegue exercer seu trabalho na lavoura pois a quantidade de água necessária para irrigar a plantação com os métodos tradicionais é insuficiente.

A prática da agricultura convencional, que utiliza métodos tradicionais, é bastante ineficiente, pois demanda uma elevada quantidade de recursos, incluindo água. A agricultura no Brasil é responsável pelo maior consumo de água, cerca de 72% do consumo total (ALVES, 2015). Contudo, a produção pode ser otimizada de forma muito significativa, ao adotar técnicas avançadas na agricultura. A aplicação da tecnologia no campo pode envolver conceitos que surgiram e estão evoluindo ao longo dos últimos anos: *Internet of Things* (IoT), *Wireless Sensor Network* (WSN) e *Precision Agriculture* (PA).

O conceito IoT se refere a ter diversos aparelhos conectados na Internet, sendo acessíveis ou controláveis a partir de qualquer lugar e dispositivo que possua conexão à Internet. Os sistemas WSN utilizam ondas de rádio para transmitir os pacotes coletados pelos dispositivos finais, que por sua vez, são formados basicamente de sensores, microcontrolador, transmissor e sistema de alimentação. E por fim, a PA consiste em utilizar tecnologia avançada para aumentar a quantidade e a qualidade da produção utilizando menos recursos naturais.

Visando a problemática apresentada, o presente trabalho propõe uma solução que utilizará os conceitos citados anteriormente: WSN, IoT e PA. O trabalho tem foco no desenvolvimento do projeto de um dispositivo que atuará como um nó em uma WSN. Este dispositivo deverá ser capaz de realizar medidas de fatores ambientais, que influenciam na atividade da agricultura. Além de processar os dados obtidos, o dispositivo final deverá suportar o envio das informações para uma base de dados, que poderá reunir as informações atualizadas de todos os nós conectados na rede. Com todos os dados reunidos e acessíveis, um sistema poderá acessar esses dados que interferem na plantação, como umidade, temperatura e radiação solar. A partir desses dados, sistemas de irrigação poderão controlar a quantidade de água em cada região do

campo de forma muito precisa, e em ambientes mais controláveis, poderá ajustar os níveis de luminosidade e umidade do ar de acordo com as necessidades do tipo de plantação.

Os trabalhos de Wang *et al.* (2014), Juan *et al.* (2017) e Ilie-Ablachim *et al.* (2016) apresentam soluções similares, contudo, a maioria é voltada para um tipo específico de local ou de plantação, pois possuem alguns tipos de limitações, tais como alcance de transmissão, alto consumo de energia, baixa autonomia e baixa disponibilidade. O dispositivo proposto neste trabalho deverá possuir alto nível de automatização e autonomia, de modo que seja possível a aplicação do mesmo modelo de dispositivo em redes de sensores sem fio situadas em diversos tipos de plantações e tipos de ambientes.

## **1.1 OBJETIVOS**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

Desenvolver um dispositivo para ser utilizado como um nó em uma WSN, de forma que este dispositivo seja capaz de operar em conjunto com outros sistemas em busca de tornar o processo da agricultura mais eficiente e econômico.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

- Utilizar um protocolo de comunicação que suporte um transmissor de longo alcance, baixo consumo de energia e fácil escalabilidade dentro da rede.
- Selecionar os componentes mais adequados ao projeto, levando em conta suas características individualmente.
- Implementar um sistema fotovoltaico para alimentar o dispositivo e recarregar a bateria.
- Aplicar técnicas de minimização de consumo de energia, em busca de obter alta durabilidade e disponibilidade.
- Montar um protótipo com todos os componentes do sistema, submetê-lo a testes e analisar os resultados obtidos.

## 2 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção serão apresentados três trabalhos relacionados, destacando seus pontos fortes e pontos negativos além das semelhanças e diferenças com o dispositivo proposto por este trabalho.

### 2.1 Development of Plough-able RFID Sensor Network Systems for Precision Agriculture

A ideia geral do trabalho desenvolvido por Wang *et al.* (2014) é implementar um dispositivo com sensores, microcontrolador, transmissor e antena. Sua proposta consiste em espalhar vários dispositivos em um campo, que devem ficar sob o solo, em uma profundidade adequada para realizar leituras de parâmetros e enviar os dados coletados para um instrumento leitor que se posicionará sobre o solo.

O diferencial desse dispositivo é o protocolo de comunicação: o *Radio Frequency Identification* (RFID). O sistema RFID passivo, que é o utilizado neste projeto, se destaca por não necessitar de alimentação contínua. Isso ocorre devido ao transmissor que se localiza no dispositivo final, que além de enviar dados para o leitor, alimenta o sistema através da corrente induzida pelo campo magnético gerado pelo leitor (TANIM, 2016). Dessa forma, para coletar informações de um determinado dispositivo, um equipamento leitor RFID deve ser posicionado sobre a região do solo que se encontra o dispositivo, logo, o sistema será alimentado pelo campo magnético do leitor, que por sua vez receberá os dados de leitura enviados pelo transmissor.

A grande vantagem desse sistema é o fato do seu módulo de alimentação não interferir na sua autonomia. Outra grande vantagem é o custo individual de cada dispositivo, pois o sistema RFID passivo é muito barato (LI *et al.*, 2018). Porém a necessidade de um leitor para realizar as medições torna o sistema mais dependente da ação humana e menos automatizado. Além disso, em plantações mais altas, o posicionamento do leitor seria um desafio, o que limita a aplicação do modelo em plantações baixas.

Apesar de ter um objetivo em comum com o projeto proposto neste trabalho, existem diversas diferenças entre os dois dispositivos. De uma forma geral, o modelo desenvolvido por Wang *et al.* (2014) é voltado para coletar informações somente do solo, enquanto o proposto neste trabalho será capaz de ler dados do solo e do ar. Outra grande diferença é o modo de transmissão de dados, em Wang *et al.* (2014) é necessária atuação humana, no trabalho proposto,

o processo é totalmente automatizado.

## **2.2 Design and implementation of WSN for precision agriculture in white cabbage crops**

No trabalho de Juan *et al.* (2017), foi implementado um dispositivo chamado *Smart-Node*, que possui três sensores que são responsáveis por coletar informações sobre luminosidade, temperatura do ar e umidade do solo. O objetivo principal do seu trabalho é enviar informações ambientais do local de uma plantação de repolho para um servidor localizado a uma distância de aproximadamente 2 km do local onde os dispositivos estão instalados.

O sistema de alimentação desse dispositivo merece destaque, pois utiliza uma bateria recarregável, e através de uma placa solar e um circuito de carregamento, essa bateria é recarregada utilizando energia renovável. Esse sistema gera economia, pois a bateria recarregável dura muito mais tempo que uma comum, gera autonomia devido a desnecessidade de remover as baterias para recarregar e não menos importante, minimiza o impacto ambiental já que evita o descarte excessivo de baterias.

Entretanto, Juan *et al.* (2017) optou por utilizar o protocolo de comunicação *Zigbee*, que transmite dados na frequência 2,4 GHz (PAN *et al.*, 2018), um dos motivos que torna o alcance de comunicação baixo. Além disso, o protocolo *Zigbee* utiliza o método de múltiplos saltos, dessa forma outros nós presentes na rede precisam rotear pacotes de outros nós próximos fisicamente (MEERA *et al.*, 2015), o que aumenta a complexidade da rede e causa dependências. Em outras palavras, caso um nó essencial no roteamento de pacotes fique indisponível, parte dos nós perderão a conexão com a rede, comprometendo todo o sistema. Outro impacto negativo causado pelo protocolo baseado em múltiplos saltos é o acréscimo do tempo ativo dos dispositivos, visto que terão de ficar ativos sempre que tiverem de enviar seus próprios dados ou rotear pacotes de outros nós, o que afeta diretamente o consumo de energia.

O objetivo final da pesquisa de Juan *et al.* (2017) possui grandes semelhanças com o objetivo final do trabalho proposto. Ambos tem intenção de otimizar o processo da agricultura através da coleta e envio de informações ambientais, além de utilizarem energia renovável como fonte de alimentação. Contudo, o dispositivo de Juan *et al.* (2017) é voltado para plantações rasteiras, como as de repolho, enquanto o dispositivo proposto poderá ser aplicado em diversos tipos de plantações. Além disso, o protocolo de comunicação do *SmartNode* limita bastante a distância entre os dispositivos da rede, portanto, a implementação de um sistema em um campo extenso utilizando esse modelo terá um alto custo, devido a quantidade de dispositivos necessária.

### 2.3 Monitoring device for culture substrate growth parameters for precision agriculture

No trabalho desenvolvido por Ilie-Ablachim *et al.* (2016) foi projetado um dispositivo nomeado *MoniSen*. O *MoniSen* é um modelo de dispositivo final que pode ser aplicado em uma rede de sensores sem fio de longo alcance, pois utiliza o protocolo de comunicação *LoRa*® que tem como características principais o longo alcance de transmissão e o baixo consumo de energia (DEVALAL; KARTHIKEYAN, 2018).

O dispositivo em si é composto por alguns sensores que são responsáveis por medir os seguintes parâmetros: luminosidade, temperatura do solo, temperatura do ar, umidade do solo e umidade do ar. Os modelos de sensores selecionados para o projeto não são os melhores, pois existem opções mais precisas, econômicas e com custo de aquisição similar. Além desses sensores, o *MoniSen* possui o transmissor *LoRa*® e um microcontrolador de baixo processamento e consumo. As baterias de lítio que o alimenta tem capacidade de 2400 mAh, dando uma autonomia de aproximadamente 6 meses.

O projeto desenvolvido por Ilie-Ablachim *et al.* (2016) é similar ao projeto proposto neste trabalho, pois ambos utilizam sensores para medir parâmetros do ar e do solo do ambiente, além de possuírem suporte a transmissão de longo alcance. As diferenças mais impactantes entre os dois modelos são a qualidade dos sensores e o sistema de alimentação, tendo em vista que o modelo proposto neste trabalho utiliza energia solar para recarregar a bateria. Uma grande vantagem de implementar um sistema de alimentação mais robusto é a capacidade de realizar leituras e envios dos dados com uma maior frequência, o que torna possível uma análise mais detalhada sobre o comportamento do ambiente.

## 2.4 Análise comparativa

No Quadro 1, há a comparação entre os dispositivos projetados nos trabalhos relacionados e o dispositivo projetado neste trabalho, mostrando as funcionalidades que cada um possui.

Quadro 1 – Comparação entre os trabalhos relacionados e o proposto

<i>Funcionalidade</i>	<i>Modelos de dispositivo</i>			
	2.1 Sistema RFID	2.3 MoniSen	2.2 SmartNode	Trabalho proposto
Suporte à comunicação de longo alcance	✗	✓	✗	✓
Autonomia elétrica ilimitada	✓	✗	✓	✓
Sistema fotovoltaico de alimentação	<i>Não se aplica</i>	✗	✓	✓
Ecologicamente sustentável	✓	✗	✓	✓
Sensor de umidade do ar	✗	✓	✓	✓
Sensor de temperatura do ar	✗	✓	✓	✓
Sensor de umidade do solo	✓	✓	✓	✓
Sensor de temperatura do solo	✓	✓	✓	✓
Sensor de luminosidade	✗	✓	✗	✓

Fonte: Elaborado pelo autor.

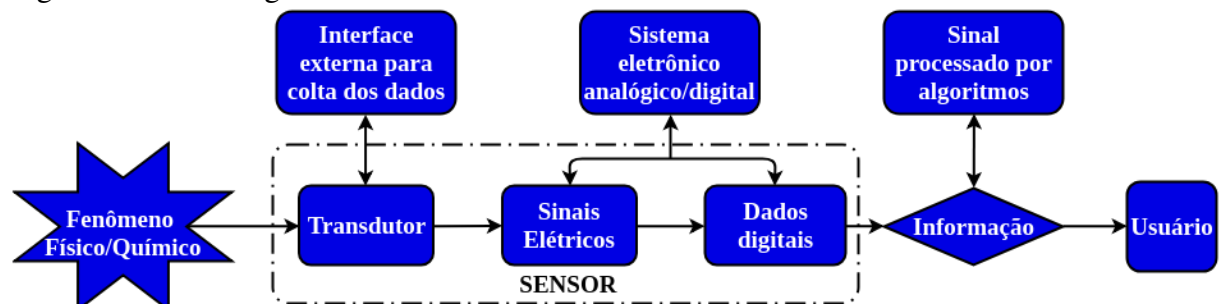
Como pode ser observado, o sistema proposto por Juan *et al.* (2017) é o que mais se aproxima do sistema proposto nesse trabalho, contudo não suporta comunicação de longo alcance, nem é capaz de medir os níveis de luminosidade do ambiente. O fato do dispositivo proposto suportar todas essas funcionalidades, o torna capaz de atuar em diferentes tipos de ambientes e plantações.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Sensores

Um sensor é um dispositivo capaz de responder a um estímulo físico ou químico e converter em outra grandeza física, em busca de obter medidas ou realizar monitoramento (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011). Os sensores possuem um componente denominado transdutor, que é responsável por converter o sinal proveniente da interação entre o sensor e o ambiente físico em um sinal elétrico analógico ou digital. A partir do sinal elétrico, um sistema pode realizar a leitura do sensor a fim de obter a informação fornecida pelo mesmo (BOARD *et al.*, 1997). A Figura 1 fornece uma visão geral da estrutura básica de um sensor genérico.

Figura 1 – Modelo genérico de um sensor



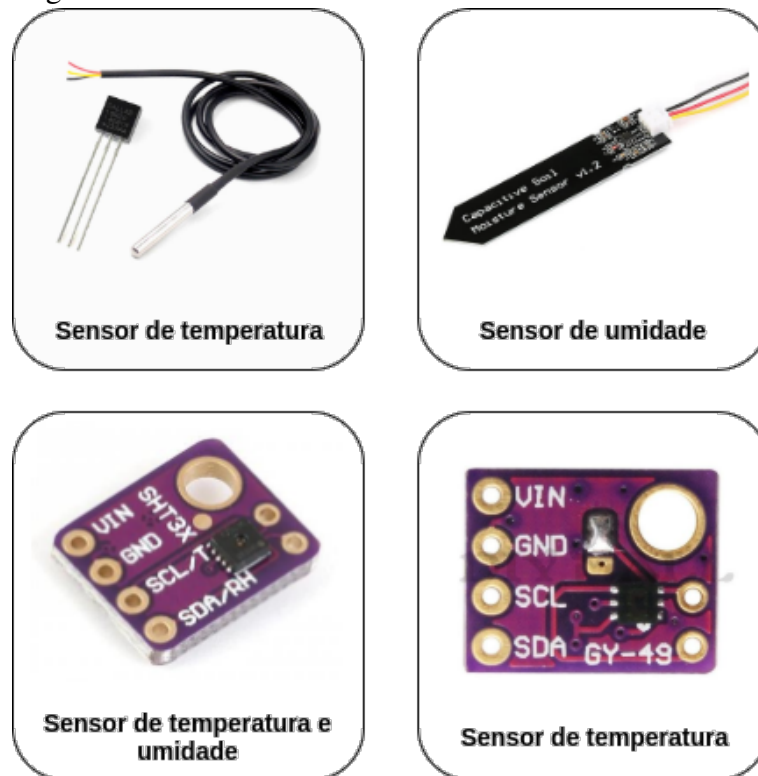
Fonte: Adaptado de Board *et al.* (1997)

Os sensores são bastante utilizados na indústria, e tem uma grande contribuição nos recentes avanços tecnológicos, pois os sistemas de carros, aviões, satélites, computadores, e até mesmo de aparelhos mais simples como condicionador de ar, possuem sistemas de controle. Os sensores são componentes cruciais para o funcionamento desse tipo de sistema, visto que a atuação e comportamento do sistema depende do estado do ambiente, que é obtido a partir da leitura dos seus sensores. A Figura 2 mostra alguns modelos de sensores comumente utilizados em projetos de sistemas de controle e monitoramento.

Alguns fatores ambientais interferem diretamente no desenvolvimento da plantação, tais como temperatura, umidade e luminosidade. Em busca de realizar medições automatizadas desses fatores, o dispositivo proposto neste trabalho terá alguns sensores como componentes cruciais.



Figura 2 – Modelos de sensores



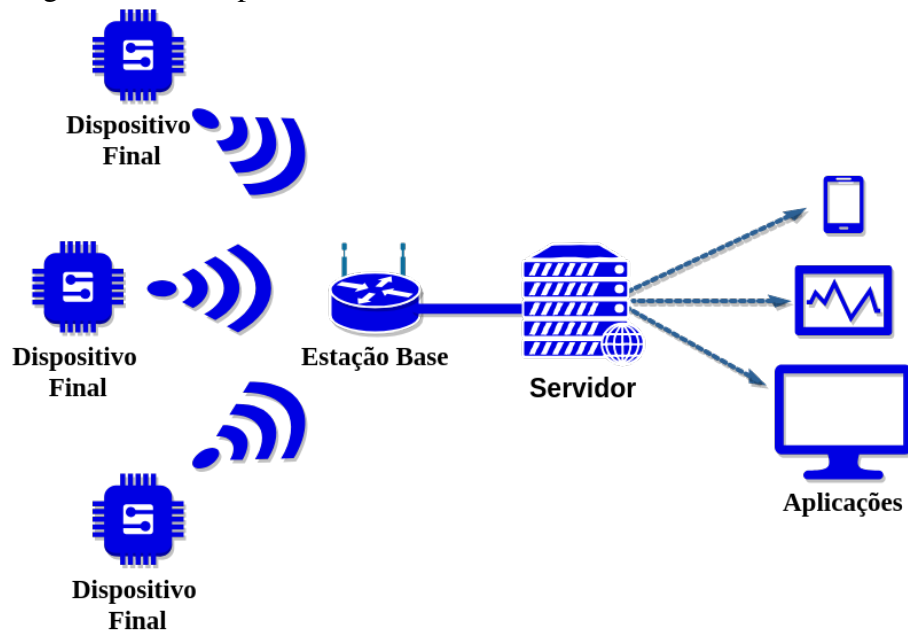
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Rede de sensores sem fio

Diferentemente de uma rede cabeada, as redes sem fio proporcionam uma grande mobilidade dos dispositivos nela conectados. Ao invés de se propagar através de sinais elétricos em cabos, os dados trocados entre dispositivos dentro da rede, se propagam por meio de ondas de rádio. O uso de uma rede sem fio permite evitar meios dispendiosos de instalar cabos para conectar dispositivos em diferentes locais (TIWARI *et al.*, 2015).

De acordo com a autora Forster (2016) um sistema WSN é um termo que especifica um conjunto de computadores com o objetivo principal de medir alguma propriedade física do ambiente como temperatura, umidade ou vibração. Um sistema WSN é composto por vários dispositivos com sensores acoplados, que realizam a função de um nó na rede, além disso, esses dispositivos são conectados em uma rede através de tecnologias de comunicação sem fio. Tipicamente, há um dispositivo especial na rede, que é chamado de estação base, o qual conecta a rede de sensores ao mundo exterior.

Figura 3 – Exemplo de rede Rede de Sensores sem Fio



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3 dá uma visão geral da estrutura básica de uma rede WSN. Como pode ser observado, cada dispositivo final é capaz de enviar e receber da estação base, utilizando um protocolo de comunicação sem fio. A estação base encaminha esses dados para um servidor, que disponibiliza os dados para os usuários, através de aplicações.

### 3.2.1 Desafios em redes de sensores sem fio

O autor Tiwari *et al.* (2015) lista alguns desafios relacionados ao desenvolvimento de WSN.

1. **Segurança:** Os pacotes trocados entre os nós da rede podem ser interceptados, já que são transmitidos através de ondas de rádio.
2. **Localização:** A localização geográfica dos nós além de afetar o consumo de energia, interfere na arquitetura de rede de protocolos de roteamento indireto.
3. **Consumo de energia e autonomia:** Em diversos sistemas de WSN os nós são posicionados em áreas de difícil acesso, dessa forma a necessidade de trocas frequentes de bateria pode não ser viável, logo o consumo do dispositivo deve se minimizado ao máximo.

### 3.2.2 Protocolos mais utilizados em redes de sensores sem fio

#### 3.2.2.1 LoRa<sup>®</sup>

Segundo o trabalho de Devalal e Karthikeyan (2018), o protocolo *LoRa*<sup>®</sup> é voltado para sistemas que utilizam baterias e precisam transmitir pequena quantidade de dados em intervalos curtos e em longas distâncias. Os transmissores *LoRa*<sup>®</sup> utilizam faixas de frequências que podem variar de acordo com a região. A Tabela 1 especifica as faixas de frequências utilizadas em diferentes regiões do globo terrestre.

Tabela 1 – Banda de frequência por região

Região	Banda
Europa	868 e 433 MHz
América do norte e Brasil	915 MHz
Ásia	430 MHz

Fonte: Adaptado de LoRa Alliance Technical Committee (2017)

A arquitetura da rede *LoRa*<sup>®</sup> é baseada na topologia estrela, na qual um dispositivo central, o roteador recebe e envia dados para os dispositivos finais da rede. O roteador deve ser conectado à Internet através de Wi-Fi, Ethernet, rede de celular ou satélite, visando enviar os dados recebidos dos dispositivos finais para uma base de dados. Em uma rede *LoRa*<sup>®</sup> pode existir mais de um roteador, caso apenas um não seja suficiente para cobrir uma determinada área. Esses dispositivos possuem um alcance muito grande, os mais robustos conseguem cobrir uma área de até 100  $km^2$  (DEVALAL; KARTHIKEYAN, 2018).

Region	Frequency
Europe	868/433 MHz
America	915 MHz
Asia	430 MHz

### 3.2.2.2 Zigbee

O protocolo *Zigbee* é voltado para aplicações de curto e médio alcance que variam entre 10 e 100 metros de distância (FARAHANI, 2009). Os dispositivos que compõe uma rede *Zigbee* são os dispositivos finais, os roteadores e o coordenador de rede. De acordo com a organização desses dispositivos na rede, o protocolo pode assumir três tipos diferentes de topologias, que podem ser observadas na Figura 4.

- **Estrela**

Na topologia estrela, o coordenador pode se comunicar com qualquer outro dispositivo conectado na rede.

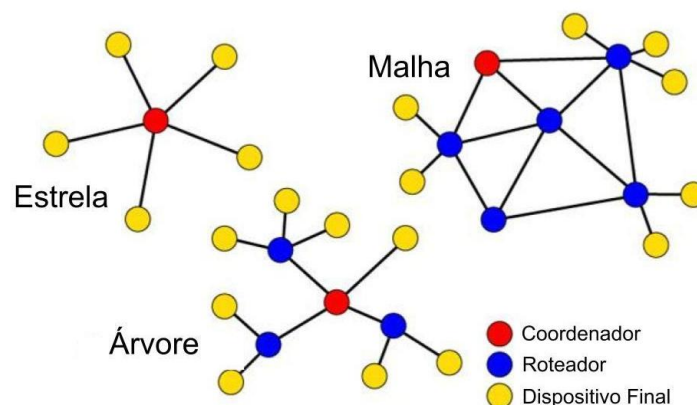
- **Malha**

Na topologia malha, um dispositivo pode se comunicar com qualquer outro na rede, desde que a distância entre os dois seja suficientemente pequena a ponto de permitir troca de mensagens. Essa configuração permite que existam múltiplos caminhos ligando um dispositivo aos outros na rede.

- **Árvore**

Essa topologia se assemelha à topologia malha, entretanto nesse modo de operação os dispositivos finais não realizam roteamento de pacotes, apenas o roteadores e o coordenador assumem esse papel.

Figura 4 – Topologias de uma rede *Zigbee*



Fonte: Adaptado de Pathak *et al.* (2015)

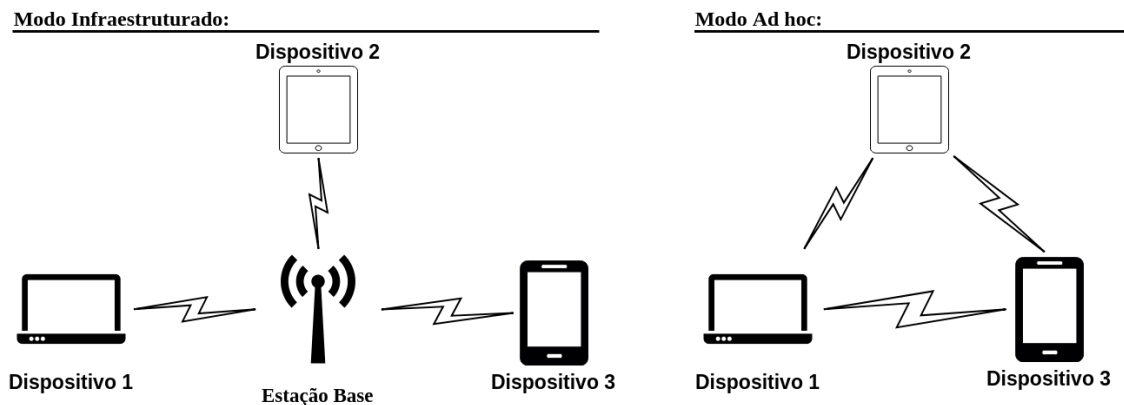
As aplicações mais comuns que utilizam o *Zigbee* como protocolo de transmissão são em automação residencial e comercial, controle industrial, monitoramento de parâmetros relacionados à saúde pessoal, entre outras (TOMAR, 2011).

### 3.2.2.3 Wi-Fi

O protocolo IEEE 802.11, popularmente conhecido como Wi-Fi também pode ser aplicado em WSN. Contudo, este protocolo não foi desenvolvido especificamente para este fim, logo pode ser inviável utilizá-lo, dependendo dos requisitos do sistema.

Este protocolo possui dois modos de operação: infraestruturado e *ad hoc*, como pode ser observado na Figura 5. O modo infraestruturado consiste em uma topologia estrela, na qual um dispositivo central se conecta com todos os outros dispositivos, já no modo *ad hoc*, os dispositivos se comunicam diretamente entre si, com diferentes possibilidades de roteamento das mensagens enviadas (ANASTASI *et al.*, 2003).

Figura 5 – Modos de operação da rede Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo autor.

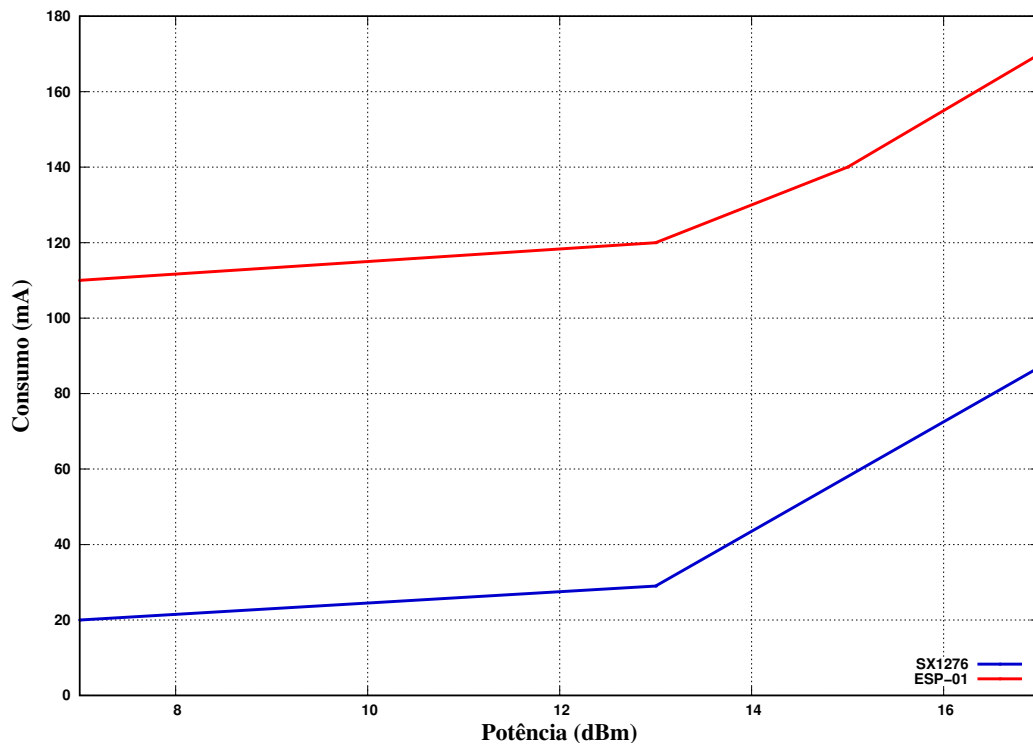
O grande desafio de utilizar Wi-Fi em redes de sensores é o consumo de energia do transmissor. Um transmissor Wi-Fi muito comum em projetos, o ESP-01 (AI-THINKER, 2015), possui um consumo muito maior, se comparado com um transmissor *LoRa*® SX1276 (SEMTECH, 2015), como pode ser observado no gráfico da Figura 6.

### 3.2.3 Estrutura básica de um nó em uma rede de sensores sem fio

Cada nó de uma WSN é composto basicamente por microcontrolador, sensores, bateria e transmissor, como demonstra a Figura 7. Com a possibilidade de aplicar sistemas de WSN em grandes áreas para monitoramento, cada nó deve ser barato. Em busca de tornar esses dispositivos baratos, os recursos presentes em cada dispositivo são altamente limitados, em relação a processamento, energia e componentes de *hardware* (FORSTER, 2016).

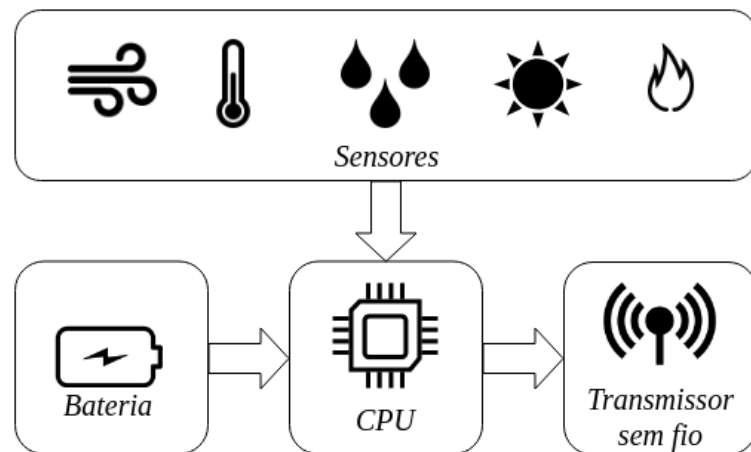
O propósito principal deste trabalho é desenvolver um modelo de nó voltado para

Figura 6 – Consumo dos transmissores *LoRa*® SX1276 e Wi-Fi ESP-01



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 – Diagrama de bloco de um nó genérico de uma rede de sensores sem fio



Fonte: Elaborado pelo autor.

monitoramento no setor da agricultura, em busca de torná-la mais eficiente e econômica.

Quadro 2 – Aplicações de redes de sensores sem fio

Área	Aplicação
Industrial	Monitoramento e controle de equipamentos
Aeroportos	Sistema de etiquetas inteligente em malas
Comercial	Gerência de estoque e <i>check out</i>
Situações emergenciais	Detectores de incêndio e vazamento de gás
Militar	Detecção de movimentação inimiga

Fonte: Adaptado de García-Hernández *et al.* (2007)

O Quadro 2 mostra algumas das diversas outras aplicações de sistemas WSN.

### 3.3 Agricultura de Precisão

De acordo com o autor Davis *et al.* (1998), a PA combina as novas tecnologias da era da informação com a agricultura industrializada. Um sistema baseado em PA visa descobrir as necessidades reais de insumo em pequenas áreas dentro de um campo agrícola, de modo que a aplicação desses recursos não seja excedente ou insuficiente, mas seja suficiente para o desenvolvimento da plantação. Esse propósito não é novo, entretanto as tecnologias recentes permitem o avanço na pesquisa e desenvolvimento de sistemas nessa área.

O fator chave para a PA ser mais eficiente que a agricultura tradicional é a informação. A forma com que a informação é coletada é essencial para a eficiência dos sistemas de PA, pois nesses sistemas, o campo agrícola é dividido em pequenas áreas, visto que cada área pode ter necessidades diferentes de insumo, de acordo com o relevo, tipo de solo, tempo de exposição ao sol, temperatura e umidade. Em um terreno muito grande, essa necessidade de divisão em pequenas áreas fica mais visível, pois as características ambientais podem variar muito entre regiões situadas a algumas centenas de metros entre si (DAVIS *et al.*, 1998).

Baseado nas condições ambientais de pequenas áreas divididas dentro do campo agrícola, a aplicação de insumos pode ser precisamente controlada em cada uma dessas áreas de forma independente, o que gera uma série de benefícios. Entre esses benefícios, destaca-se a minimização do impacto ambiental, já que a agricultura é responsável por grande consumo de água, e em diversos lugares do mundo é enfrentado escassez de água (PEREIRA *et al.*, 2002). Além da vantagem ambiental, há também a vantagem econômica, pois os produtores podem produzir mais, com menos recursos naturais, além da maximização da qualidade dos frutos, nas uvas por exemplo, a quantidade de radiação solar que a planta recebe, é um fator crucial para determinar a quantidade de açúcar presente no fruto (DÍAZ *et al.*, 2011).

## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O primeiro passo para dar início a execução do projeto é definir os requisitos do sistema. Após isso será possível selecionar componentes e projetar o *software* baseado nos requisitos definidos.

### 4.1 Definir requisitos do sistema

Quadro 3 – Requisitos do sistema

Requisitos não funcionais	Baixo custo
	Eficiente energeticamente
	Utilizar energia renovável
	Alta disponibilidade
	Alta autonomia
	Escalável
	Automatizado
	Sensores capaz de realizar leituras com no mínimo 95% de acurácia
	Ser capaz de detectar faixas de temperatura, luminosidade e umidade dentro dos padrões para o ambiente de cultivo
Requisitos Funcionais	Permanecer em estado ativo somente enquanto necessário
	Transmitir os dados dos sensores e nível de tensão de alimentação periodicamente
	Suportar personalização do período de leitura e transmissão de dados
	Validar todos os dados obtidos antes de enviar para o roteador
	Desativar todos os periféricos do microcontrolador que não serão utilizados
	Quando ligado iniciar o modo de operação logo após configurar todos os periféricos
	Ser capaz de operar utilizando somente energia solar, somente bateria ou ambos
	Informar o estado do dispositivo através de um LED
	Possuir interruptores para ligar o sistema e para desativar a bateria de forma independente

Fonte: Elaborado pelo autor.



## **4.2 Definir protocolo de comunicação que será suportado pelo sistema**

Em qualquer sistema baseado em WSN é necessário utilizar um protocolo de transmissão de dados para os dispositivos finais enviarem dados coletados ou receberem comandos através de troca de mensagens. Dessa forma, a escolha do protocolo suportado pelo dispositivo proposto neste trabalho deve se basear na complexidade da rede, no consumo e no alcance de comunicação.

## **4.3 Análise dos componentes básicos de *hardware* do sistema**

Os componentes básicos para o sistema funcionar são os elementos que compõem os módulos de transmissão, sensoriamento e processamento.

### **4.3.1 *Módulo de transmissão***

Após definir o protocolo de comunicação, será possível escolher o melhor transmissor, levando em conta a distância máxima de transmissão, frequências suportadas e seu consumo no modo de transmissão e no modo de economia de energia.

### **4.3.2 *Módulo de sensoriamento***

Existem diversos tipos de sensores com o propósito de medir o mesmo fenômeno físico ou químico. Esses sensores se diferenciam basicamente pelo grau de acurácia de leitura do dado, consumo e interface de comunicação. Dessa forma se faz necessária a escolha de sensores que sejam efetivos para a aplicação, considerando o custo/benefício e o consumo elétrico de cada sensor individualmente.

### **4.3.3 *Módulo de processamento***

Após ter definido todos os componentes que serão controlados pelo sistema, é possível definir qual o melhor microcontrolador para o sistema, levando em consideração os recursos disponíveis, como quantidade de canais para comunicação, protocolos suportados, memória flash, memória de programa e o consumo no modo de operação assim como no modo de economia de energia.

#### 4.4 Projetar sistema eletrônico e sistema de alimentação

Nesta etapa todos os componentes de *Hardware* já estarão definidos, dessa forma as características elétricas de cada componente poderão ser analisadas através da documentação disponibilizada pelo seu fabricante.

Em seguida o sistema eletrônico deverá ser projetado, incluindo o módulo de alimentação que terá de ser composto por bateria recarregável e sistema de alimentação fotovoltaica, para recarregar a bateria.

#### 4.5 Implementar as funcionalidades de acordo com os requisitos

Este será o estágio da codificação de cada funcionalidade e *drivers* do sistema. Os *drivers* serão responsáveis pela interface de comunicação com os sensores e com o módulo de transmissão.

Entre as funcionalidades podemos listar:

- Leitura dos dados dos sensores;
- Transmissão dos dados;
- Configuração dos intervalos entre leituras e transmissões de dados;
- Configuração do modo de baixo consumo;
- Detecção de falhas nos sensores através da análise de consistência dos dados;
- Detecção de tensão de alimentação em nível baixo;
- Sistema de alerta em caso de falhas.

#### 4.6 Montar um protótipo

Nesta etapa será criado um protótipo do sistema que incluirá todos os componentes de *hardware* que por sua vez serão testados individualmente em condições ambientais variadas artificialmente. Após isso será realizado o teste de integração com todos os componentes.

O protótipo será importante para analisar o comportamento dos sensores e realizar ajustes nas rotinas de leitura e processamento de seus dados.

#### **4.7 Definir os cenários de testes**

Entre os testes devem estar incluídos a análise do comportamento de todos os sensores em diferentes condições climáticas assim como a análise do comportamento do sistema de alimentação.

#### **4.8 Analisar, validar e apresentar os resultados**

Os resultados obtidos serão analisados e comparados a fim de verificar sua consistência e relações entre si. A tensão de alimentação por exemplo deverá estar diretamente relacionada com o nível de luminosidade.

## 5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na execução deste trabalho.

### 5.1 Protocolo de comunicação

O protocolo *LoRa*® se mostra como mais adequado para o projeto, pois como foi falado na seção 3, esse protocolo possui alto alcance de comunicação, baixo consumo e uma arquitetura de rede simples, que facilita a escalabilidade do sistema.

### 5.2 Seleção de componentes de *hardware*

Com o objetivo de selecionar os componentes eletrônicos mais adequados para atender os requisitos do projeto, foi separado alguns modelos viáveis de componentes. Para cada tipo de componente foi elaborado uma tabela ou um gráfico, com as especificações de cada modelo, para fins de comparação.

#### 5.2.1 Módulo de transmissão

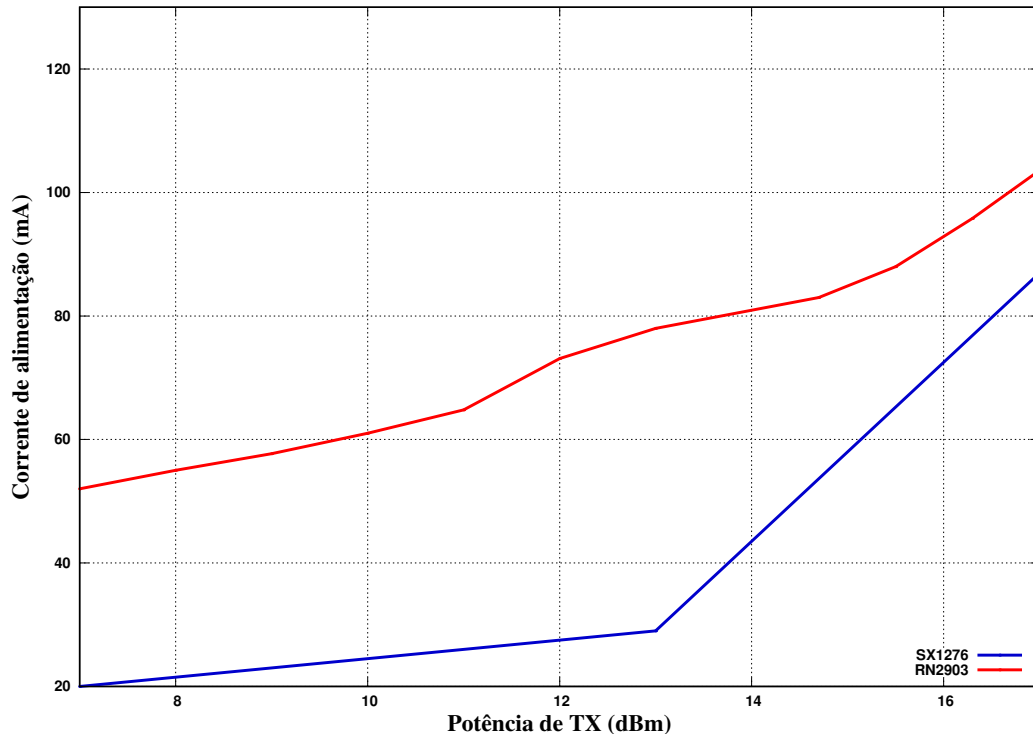
O módulo de transmissão é composto basicamente pelo transmissor *LoRa*® e uma antena que suporte a frequência 915 MHz que é a frequência utilizada no Brasil, como mostra a Tabela 1.

Como pode ser observado no gráfico Figura 8, o transmissor SX1276 em relação ao RN2903, além de possuir maior potência de transmissão, possui uma necessidade significativamente menor de corrente, principalmente em potências de transmissão mais baixas. Além do consumo no modo de transmissão, no modo ocioso o SX1276 necessita de uma corrente muito baixa, apenas  $1,5 \mu\text{A}$  (SEMTECH, 2015) enquanto que o RN2903 precisa de 2,8 mA (LoRa Alliance Technical Committee, 2017).

#### 5.2.2 Módulo de sensoramento

Os dispositivos de hardware que compõem este módulo são os sensores de temperatura, umidade e luminosidade.

Figura 8 – Corrente de alimentação dos transmissores *LoRa*® SX1276 e RN2903



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.2.2.1 Sensor de temperatura e umidade do ar

Como pode ser observado na Tabela 2 os modelos se diferenciam basicamente pela precisão de leitura, consumo e tempo de resposta. O sensor SHT30 se mostra como melhor opção, pois além de ter o menor consumo, possui o menor tempo de resposta e sua precisão de leitura dos dados estão dentro dos requisitos para o projeto.

Tabela 2 – Modelos de sensor de Temperatura/Umidade

Sensor	Acurácia (umidade / temperatura)	Corrente de alimentação (leitura / ocioso)	Tempo de resposta
SHT10	4,5% / $\pm 0,5$ °C	550 - 1000 $\mu$ A / 0,3 - 1,5 $\mu$ A	8 - 30 s
SHT21	2% / $\pm 0,3$ °C	300 - 330 $\mu$ A / 0,15 - 0,4 $\mu$ A	8 - 30 s
SHT25	1,8% / $\pm 0,2$ °C	300 - 330 $\mu$ A / 0,15 - 0,4 $\mu$ A	8 - 30 s
SHT30	3% / $\pm 0,3$ °C	220 - 300 $\mu$ A / 0,2 - 2 $\mu$ A	2 - 8 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.2.2.2 Sensor de temperatura do solo

O sensor de temperatura DS18B20 foi selecionado para medir temperaturas do solo. Uma grande vantagem de utilizar esse sensor é o seu encapsulamento do tipo TO-92, que facilita sua fixação em um tubo de aço pequeno, de forma que se torne resistente à água e umidade. Isso

é necessário pois esse sensor em particular deverá ser introduzido no solo, logo será exposto diretamente à água.

#### 5.2.2.3 *Sensor de umidade do solo*

O sensor responsável por realizar leituras relacionada ao nível de umidade presente no solo é um sensor capacitivo. Assim como o sensor de temperatura do solo, este deverá ser introduzido no solo, por esse motivo deve ser resistente à água.

#### 5.2.2.4 *Sensor de luminosidade*

Como podemos notar na Tabela 3 o sensor MAX44099 se mostra como a melhor opção para o projeto pois além de possuir o menor consumo das três opções selecionadas para análise, ele é capaz de medir níveis de luminosidades de até 188,006 Lux.

Tabela 3 – Modelos de sensor de Luminosidade

Sensor	Faixa de medição	Corrente de alimentação (leitura)	Corrente de alimentação (ocioso)
TSL2561	0,1 - 40000 Lux	0,24 - 0,6 mA	3,2 - 15 $\mu$ A
BH1750FVI	1 - 65536 Lux	120 - 190 $\mu$ A	0,01 - 1 $\mu$ A
MAX44099	0,045 - 188006 Lux	1,6 $\mu$ A	0,65 - 1,2 $\mu$ A

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.3 *Módulo de processamento*

A família de microcontroladores PIC16F18446 (INC, 2017) da fabricante *Microchip Technology* é voltada para aplicações similares a do trabalho proposto. Os dispositivos pertencentes a essa família se destacam por possuir alguns modos de operação de baixo consumo, conversores analógicos de alta precisão e suportar protocolos de comunicação como SPI,  $I^2C$  e UART.

Os diferenciais que fazem com que o microcontrolador PIC16F18426 se mostre como melhor opção para o projeto são os seguintes (INC, 2017):

- 2 canais para comunicação SPI e  $I^2C$ ;
- Conversor analógico-digital de 12 bits;
- Temporizadores de até 24 bits;
- Tensão de referência fixa;
- Oscilador interno de até 32 MHz;

- Pinos multiplexados com funções personalizáveis;
- Encapsulamento do tipo *PDIP* disponível.
- Opera na faixa de 2,3 até 5,5 V;
- Corrente de alimentação de 32 uA para cada 1 MHz do oscilador, para tensão de alimentação 1,8 V. Exemplo: Oscilador configurado em 8 MHz resulta em uma corrente de alimentação de 256 uA.

#### 5.2.4 Módulo de alimentação

O sistema de alimentação é composto pelos seguintes componentes: bateria, circuito carregador, painel solar e regulador de tensão.

- **Bateria** – O modelo NCR18650B foi escolhido por ser recarregável, possuir uma larga capacidade de 3350 mAh, e ser capaz de suprir o sistema com a corrente necessária para alimentar todos os componentes (PANASONIC, 2012).
- **Circuito carregador** – O carregador TP4056 é um componente capaz de carregar baterias de lítio a partir de uma fonte de tensão de até 8 Volts.
- **Placa solar** – O modelo de placa solar adotado fornece uma tensão de até 5,8 Volts, dependendo da intensidade solar a qual está sendo exposta. Esta placa solar juntamente com o circuito carregador TP4056 será capaz de alimentar o sistema e recarregar a bateria quando houver luz do sol sobre a placa.
- **Regulador de tensão** – O intuito de utilizar o regulador de tensão LM2596 (Texas Instruments, 2016) é garantir que a tensão de alimentação fornecida pelo circuito não irá ultrapassar a tensão de operação dos componentes, o que poderia danificá-los.

### 5.3 Esquemático e desenho da placa

Para desenho e implementação do circuito e da placa, foi utilizado o software EAGLE juntamente com bibliotecas disponibilizadas na internet. O esquemático completo e o desenho da placa se encontram nos apêndices A e B respectivamente.

#### 5.3.1 Configuração dos pinos do microcontrolador

Uma das vantagens de utilizar o PIC16F18426 é que ele suporta a personalização dos seus pinos, ou seja, há a possibilidade de escolher quais pinos do microcontrolador cada

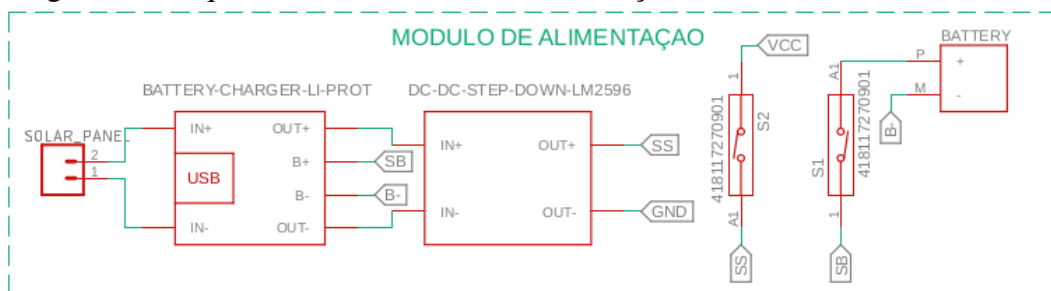
periférico irá utilizar, o que facilitou bastante na hora do roteamento e desenho da placa.

### 5.3.2 Módulo de alimentação

Este módulo possui um conector que funciona como entrada para os cabos do painel solar, além disso, dispõe de um regulador de tensão que é responsável por converter a tensão provinda da bateria ou do painel solar em uma tensão menor. Isso se faz necessário devido 3,3 Volts ser a tensão que os sensores e o transmissor operam, enquanto que os níveis de tensão fornecidos pela bateria ou painel solar podem chegar em até 5,8 Volts, dependendo da intensidade do sol que o painel solar é exposto.

Existem dois interruptores para ativar ou desativar a bateria e o sistema de alimentação como um todo, como pode ser observado na Figura 9, que se trata do esquemático do circuito responsável pela alimentação do sistema.

Figura 9 – Esquemático do circuito de alimentação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

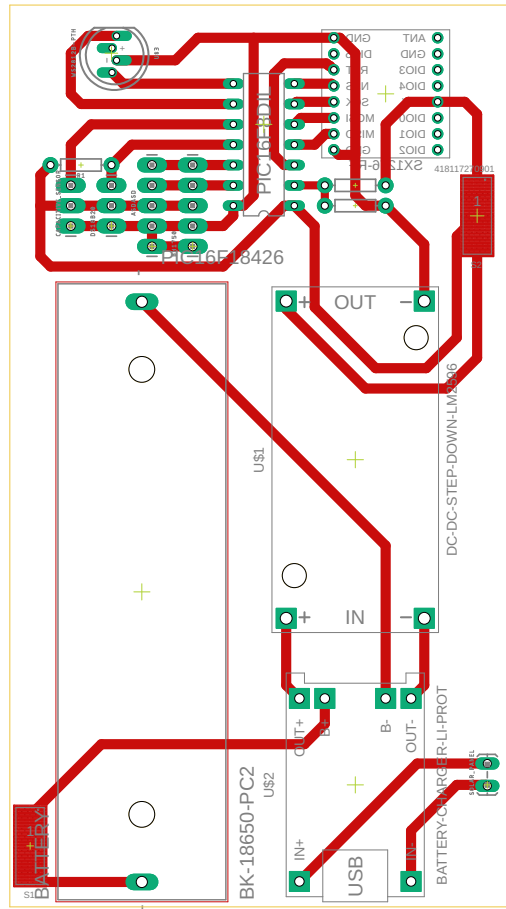
### 5.3.3 Módulo de sensoriamento

O Circuito do módulo responsável por coletar os dados é composto basicamente pelos seus quatro sensores. O sensor DS18B20 em particular necessita de um resistor para formar um divisor de tensão entre um dos seus pinos e o pino de alimentação (INTEGRATED, 2017). É importante destacar que os sensores SHT30 e MAX44009 compartilham os mesmos pinos, já que utilizam o mesmo protocolo de comunicação ( $I_2C$ ), que permite esse tipo de configuração mostrada na Figura 10.





Figura 12 – Desenho da placa do protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.4.1 Ferramentas utilizadas

#### 5.4.1.1 MPLAB X IDE

A IDE de programação MPLAB é disponibilizada pela fabricante do microcontrolador e foi utilizada para escrever todo o software pois além de possuir diversas ferramentas que auxiliam no processo de codificação, possui integração com o circuito de *debug* PICKit3 (Microchip Technology Inc., 2012).

#### 5.4.1.2 Circuito de debug PICkit 3

O PICkit 3 é uma ferramenta produzida pela mesma fabricante do microcontrolador do projeto (PIC16F18426). Entre suas principais funcionalidades inclui-se o processo de gravação do software na memória de programa do microcontrolador, o que faz desse circuito um componente essencial durante todos os processos que envolvem escrita ou

alteração no software (MICROCHIP, 2013).

#### 5.4.2 Configurações dos periféricos do microcontrolador

Cada periférico listado abaixo teve seu *driver* implementado e configurado pelo autor, se baseando na documentação disponibilizada pelo fabricante.

1. Oscilador interno – Configurado na sua frequência máxima de 32 MHz, gerando o *clock* principal do sistema. Todos os periféricos foram configurados para obter seu respectivo *clock* a partir do sinal gerado por este oscilador.
2. Conversor analógico-digital – Este módulo realiza as leituras do sensor capacitivo e da tensão de alimentação. Foi configurado para utilizar uma precisão de 12 bits, frequência de 800 kHz e utilizar a tensão de referência provinda do módulo de tensão de referência fixa.
3. Referência fixa de tensão – Configurado para fornecer uma tensão de referência de 2,048 Volts para o módulo ADC.
4. OneWire – Protocolo de comunicação implementado manualmente utilizando *General Purpose Input/Output* (GPIO), pois o microcontrolador não dispõe de um circuito ou módulo exclusivo para este protocolo.
5. SPI – Este módulo é responsável pela comunicação entre o microcontrolador e o transmissor *LoRa* ® Configurado na frequência 4 MHz utilizando um GPIO como *slave select*.
6.  $I_2C$  – Este periférico é utilizado na comunicação do microcontrolador com os sensores SHT30 e MAX4409. Foi configurado para executar na frequência 400 kHz com 9600 de *Baud Rate*.
7. Interrupções – Responsável por despertar o núcleo de processamento quando alguma execução for necessária.
8. Temporizadores – Um dos temporizadores foi configurado para gerar uma interrupção periodicamente, a fim de despertar o sistema e realizar leituras e transmissão dos dados. O período de cada ciclo pode ser configurado entre 5 e 80 minutos, para tempo mínimo e máximo respectivamente. Outro temporizador é responsável por acordar o sistema para fazê-lo ligar e desligar o LED de estado.
9. Gerenciador de pinos – Foi configurado de modo a facilitar o desenho e roteamento das trilhas na placa.

10. Desativador de periféricos – Foi utilizado para desativar todos os módulos e periféricos não utilizados, em busca de economizar energia.

#### 5.4.3 *Função principal*

A função *main* é encarregada de inicializar todo o sistema e colocá-lo em modo de economia de energia logo após executar qualquer rotina de interrupção, como podemos observar no Código-fonte 1. Dessa forma na grande parte do tempo o sistema está em modo de economia de energia, logo, o consumo é minimizado bastante, pois quando os componentes são postos em modo de economia de energia o consumo cai drasticamente, o microcontrolador por exemplo precisa de uma corrente de apenas 50 nA neste modo.

Código-fonte 1 – Função principal

```
1 void main(){
2     SYSTEM_Initialize();
3     while(1){
4         SLEEP();
5     }
6 }
```

#### 5.4.4 *Inicialização do sistema*

A rotina de *software* do Código-fonte 2 responsável por inicializar o sistema tem como objetivo configurar todos os componentes presentes na placa, de forma que seja possível a utilização desses sempre que solicitado a cada período.

Código-fonte 2 – Função de inicialização do sistema

```
1 void SYSTEM_Initialize(){
2     OSCILLATOR_Initialize();
```

```

3     SLEEP_Inicialize();
4     PIN_MANAGER_Initialize();
5     TMR0_Initialize(T5_MINUTES);
6     TMR2_Initialize();
7     INTERRUPT_GlobalInterruptEnable();
8     INTERRUPT_PeripheralInterruptEnable();
9     setSystemStatus(WARNING);
10    statusLed_Inicialize();
11    ADC_Initialize();
12    I2C_Initialize();
13    SPI2_Initialize();
14    oneWirePinInicialize();
15    supplyPinInicialize();
16    soilMoistureSensorPinInicialize();
17    max44009Setup();
18    SHT30Setup();
19    ds18b20Setup();
20    SX1216_Inicialize(915000000);
21 }

```

A função *TMR0\_Initialize(uint8\_t period)* em particular recebe um parâmetro de acordo com o Código-fonte 3 que é o tempo no qual o sistema fica em economia de energia antes executar a rotina de leitura e transmissão de dados. Essa função configura um dos módulos de temporização, de modo que o sistema seja despertado periodicamente.

Após realizar todos os procedimentos de inicialização com sucesso, o sistema sinaliza que está tudo normal e entra em modo de economia de energia até ser despertado pelo módulo temporizador.

Código-fonte 3 – Estrutura que contém os períodos configuráveis do temporizador

```

1     enum periods {T5_MINUTES ,

```

```

2      T10_MINUTES ,
3      T15_MINUTES ,
4      T20_MINUTES ,
5      T25_MINUTES ,
6      T30_MINUTES ,
7      T35_MINUTES ,
8      T40_MINUTES ,
9      T45_MINUTES ,
10     T50_MINUTES ,
11     T55_MINUTES ,
12     T60_MINUTES ,
13     T65_MINUTES ,
14     T70_MINUTES ,
15     T75_MINUTES ,
16     T80_MINUTES} period;
17 }

```

#### 5.4.5 Rotina de interrupção

A rotina de interrupção que é executada periodicamente é o Código-fonte 4, basicamente realiza leitura dos sensores, analisa os dados coletados, monta o pacote com os dados e o transmite.

Código-fonte 4 – Função executada periodicamente

```

1  void callBack(){
2      sensorsRead();
3      systemCheck();
4      pktBuild();
5      SX1276Transmit();
6  }

```

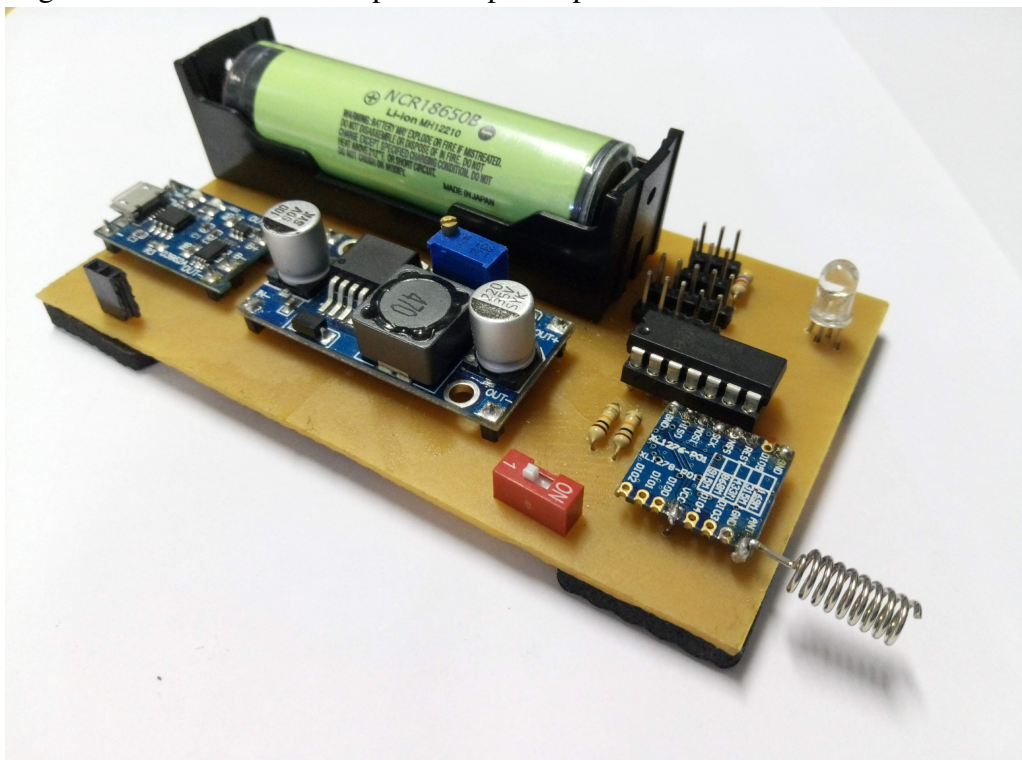
#### 5.4.6 Modo de alerta

O dispositivo possui um sistema de estado que utiliza um LED para transmitir informações visualmente. Quanto o sistema está operando normalmente sem nenhum tipo de erro ou dado inconsistente, o LED pisca na cor azul e quando o sistema é colocado em modo de alerta, o LED de estado passa a piscar na cor vermelha. Se for considerado um campo com diversos dispositivos, o LED piscando ajuda bastante na localização de dispositivos defeituosos. Além de informar o estado pelo LED, o sistema envia o seu estado em cada mensagem transmitida.

### 5.5 Protótipo

O protótipo do sistema foi confeccionado em uma placa de fenolite cobreada, de acordo com o desenho do circuito da Figura 12. Como pode ser visualizado na Figura 13, a maioria dos componentes foram soldados diretamente na placa, com exceção dos sensores e da placa solar, que se conectam a placa através de conectores e cabos, o que permite uma maior mobilidade destes.

Figura 13 – Versão final da placa do protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor.



A placa possui dois interruptores, um deles tem como função ligar e desligar o sistema, já o segundo é conectado ao terminal positivo da bateria, de modo que seja possível desconectar a bateria do circuito fazendo com que o sistema seja alimentado apenas pela placa solar.

## 5.6 Testes

Para realizar os testes foi colocado areia em uma caixa de papelão perfurada, de forma que a água pudesse escapar lentamente, deixando a areia menos úmida com o passar do tempo. Os sensores de temperatura e umidade do solo foram introduzidos dentro da caixa de modo que pudessem coletar os dados relacionados à areia contida ali.

A placa foi posicionada dentro de uma caixa de isopor com alguns furos que serviram de passagem para os cabos dos sensores e da placa solar, que foram posicionados do lado externo da caixa de isopor, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Dispositivo em estado de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.



O *Software* foi configurado para gerar uma interrupção periodicamente, de modo que seja coletadas as informações dos sensores e transmitidas a cada 5 minutos. Os testes e ajustes nos sensores começaram no dia 13/11/2019. Com os sensores ajustados, foi iniciado uma coleta de dados em um período interrupto de 24 horas, que foi iniciado às 18:00 do dia 19/11/2019 e se estendeu até às 18:00 do dia 20/11/2019.

O dispositivo foi posicionado em um local que ficou exposto a luz solar tanto no período da manhã, quanto no período da tarde.

### 5.6.1 Transmissor LoRa ® SX1276

Um roteador foi implementado utilizando uma placa de desenvolvimento *Raspberry Pi 3* a partir de um tutorial <sup>2</sup> disponível no site <<https://www.embarcados.com.br>>. Esse roteador pode ser acessado através do protocolo de rede *SSH*.

O roteador e o transmissor foram configurados de acordo com os seguintes parâmetros:

- Roteador
  - \* Frequência - 915 MHz
  - \* Fator de espalhamento - 7
  - \* Largura de banda - 125 kHz
- Transmissor
  - \* Frequência - 915 MHz
  - \* Fator de espalhamento - 7
  - \* Largura de banda - 125 kHz
  - \* Potência de transmissão 17 dBm

Para testar os *drivers* e a eficácia do transmissor foi enviado um pacote para o roteador conforme o Código-fonte 5.

Código-fonte 5 – Função executada periodicamente

```

1 void SX1276Transmit(){
2   beginPacket();
3   SX1276WriteString("UFC - CAMPUS QUIXADA");

```

<sup>2</sup> <<https://www.embarcados.com.br/lora-arduino-raspberry-pi-shield-dragino/>>

```

4   endPacket();
5   }

```

Como pode ser visualizado abaixo, o roteador recebeu o pacote e codificou a mensagem utilizando o protocolo base64, dessa forma para visualizar a mensagem é necessário utilizar um decodificador <sup>3</sup>.

```

1   pi@raspberrypi:~/single_chan_pkt_fwd $ ./
      single_chan_pkt_fwd
2   SX1276 detected, starting.
3   Gateway ID: b8:27:eb:ff:ff:8d:e5:b3
4   Listening at SF7 on 915.000000 Mhz.
5   -----
6   stat update: {"stat":{"time":"2019-11-22 01:11:10 GMT
      ", "lati": -4.97007, "long": -39.01793, "alti": 0, "rxnb"
      : 0, "rxok": 0, "rxfw": 0, "ackr": 0.0, "dwnb": 0, "txnb": 0,
      "pfrm": "Single Channel Gateway", "mail": "
      robertcabral@alu.ufc.br", "desc": "Teste"}} Packet
      RSSI: -52, RSSI: -44, SNR: 9, Length: 20
7   rxpk update: {"rxpk":[{"tmst":387081419, "chan":0, "
      rfch":0, "freq":915.000000, "stat":1, "modu": "LORA", "
      datr": "SF7BW125", "codr": "4/5", "lsnr":9, "rssi": -52,
      "size":20, "data": "VUZDICOgQ0FNUFVTIFFVSvhBREE="}]}

```

Para o envio de mensagem contendo os dados dos sensores, foi adotado o formato ascii. Os dados são separados por uma barra e a ordem dos dados são: status do sistema, tensão de alimentação, temperatura do ar, temperatura do solo, umidade do ar, umidade do solo e luminosidade. O valor de status pode assumir 0 ou 1 para estado normal e estado de alerta, respectivamente.

Um exemplo de mensagem com dados dos sensores recebida pelo roteador pode ser visualizado abaixo:

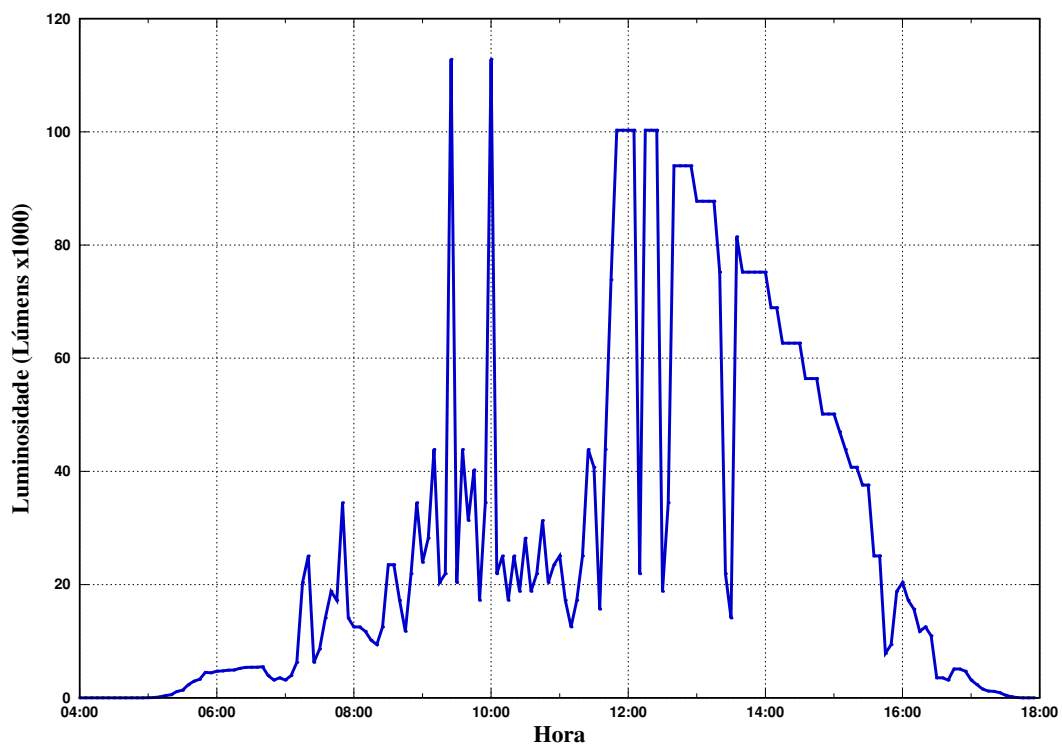
<sup>3</sup> <<https://www.base64decode.org/>>

1 0 | 3.327 | 31.37 | 30.31 | 53.59 | 26.6 | 21.4

### 5.6.2 Luminosidade

O gráfico da Figura 15 ilustra os níveis de luminosidade coletados através do sensor MAX44009 que estão de acordo com o esperado, visto que no período da manhã o céu estava um pouco nublado e durante à tarde o céu estava bastante ensolarado. Durante o período de 18:00 até 4:00 horas os níveis de luminosidade coletados não passaram de 0 Lúmens e a partir de 4:50, horário que o sol nasceu, os níveis de luminosidade começaram a aumentar, e depois de meio dia começaram a diminuir até anoitecer e atingir 0 Lúmens.

Figura 15 – Níveis de Luminosidade



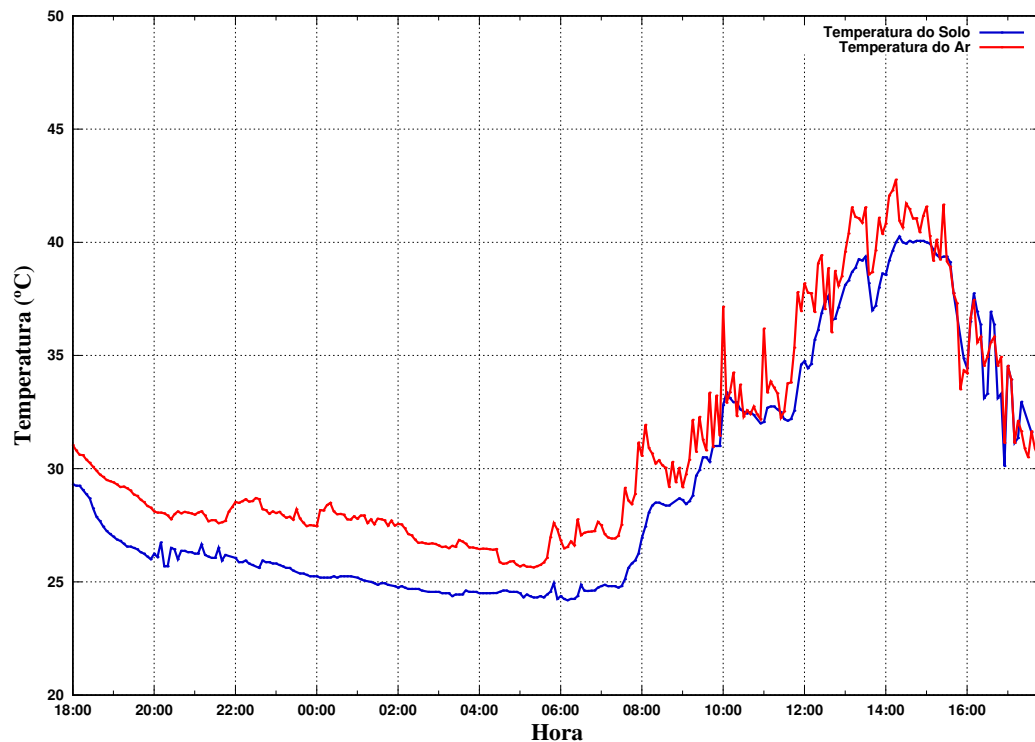
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.6.3 Temperatura

No gráfico da Figura 16 é demonstrado os níveis de temperatura do solo e do ar, coletados através dos sensores DS18B20 e SHT30 respectivamente. Conforme esperado durante o período da tarde as temperaturas foram maiores enquanto que durante a madrugada as

temperaturas caíram bastante.

Figura 16 – Níveis de Temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.6.4 Umidade

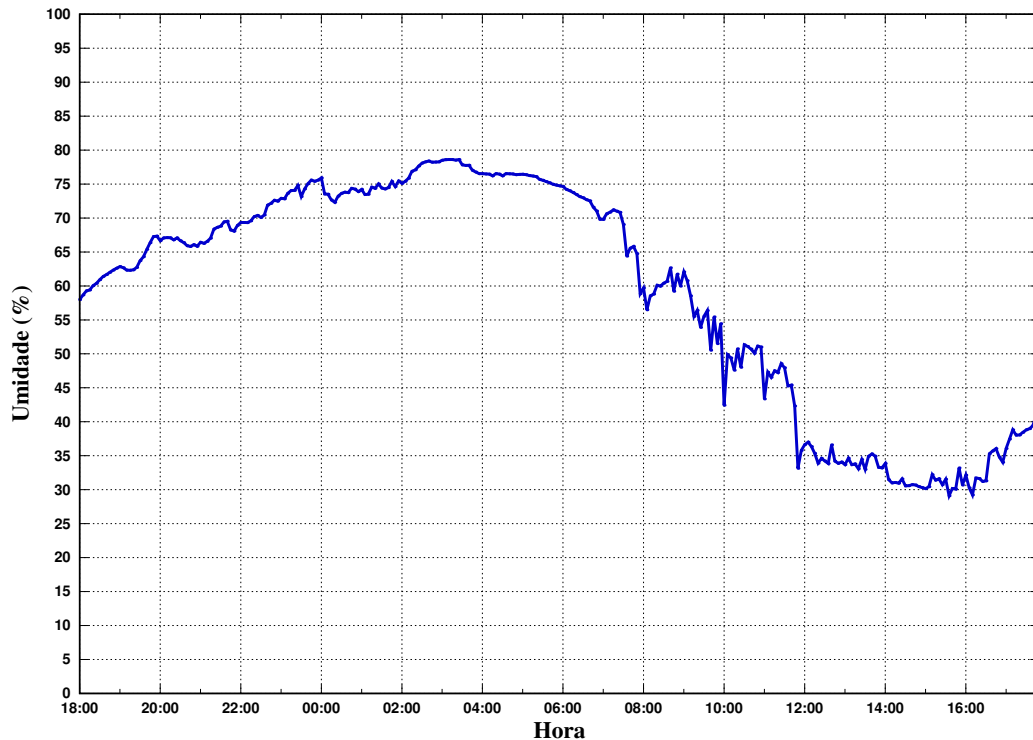
### 5.6.4.1 Umidade do ar

Os dados relacionados a umidade do ar podem ser visualizados no gráfico da Figura 17. Durante o período noturno os níveis de umidades atingiram valores mais elevados, conforme esperado.

### 5.6.4.2 Umidade do solo

O sensor capacitivo utilizado possui um terminal que emite uma tensão que varia de acordo com o nível de umidade do solo. Através de testes foi analisado a variação dessa tensão em diversas situações com a areia muito molhada e com a areia muito seca e a partir dessa análise foi desenvolvido um algoritmo com a Equação 5.1 para retornar o valor da umidade

Figura 17 – Níveis de Umidade relativa do Ar



Fonte: Elaborado pelo autor.

em uma escala de 0 até 30, sendo 0 o menor e 30 o maior nível de umidade possível.

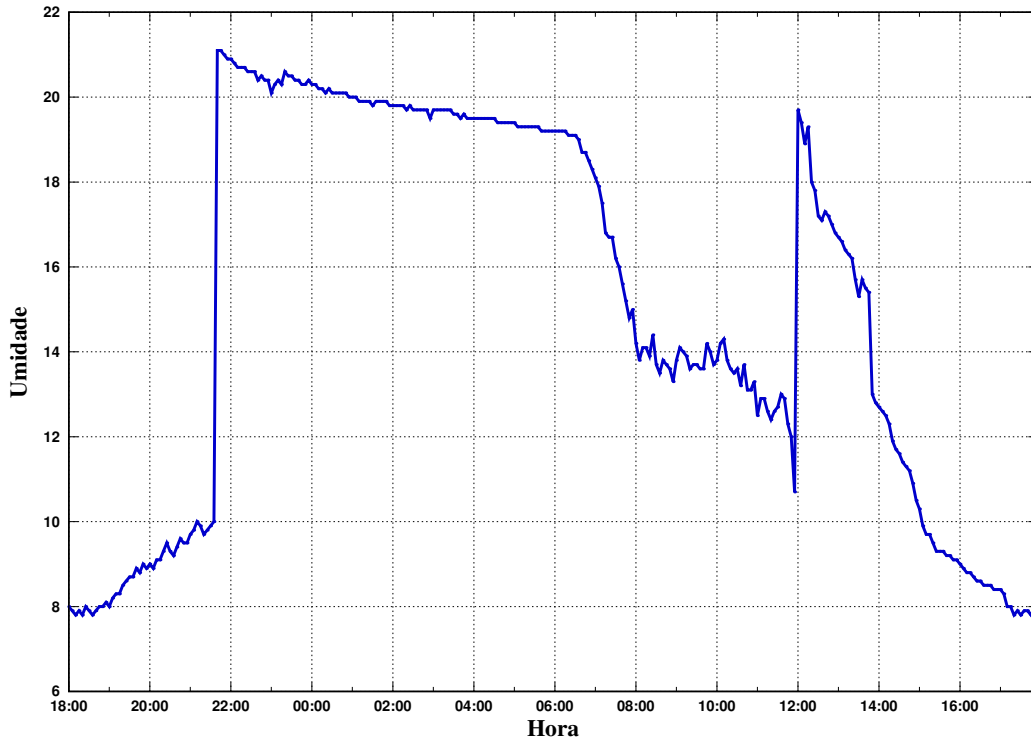
$$Umidade = 100 * [0.7 - (Tensão\ do\ sensor / Tensão\ de\ alimentação)] \quad (5.1)$$

O gráfico da Figura 18 ilustra os níveis de umidade da areia coletados através do sensor capacitivo. Nos momentos próximos às 22:00 e 12:00 foi despejada água na areia, isso explica a mudança abrupta de umidade, após as aplicações a umidade começou a diminuir. Durante o período diurno a umidade do solo decresceu bem mais rápido devido alguns fatores, especialmente a temperatura do solo que chegou a ultrapassar os 40°C durante à tarde.

### 5.6.5 Tensão de Alimentação

Para realizar a leitura do nível de tensão da alimentação do sistema foi utilizado o periférico conversor analógico-digital em conjunto com a referência fixa de tensão interna do microcontrolador. As opções de tensão de referência do PIC16F18426 são: 1.024, 2.048 e 4.096 Volts. Devido este valor não poder ser maior que a tensão de alimentação, o valor selecionado foi 2.048 V, já que a alimentação é de 3.3 V. Isso significa que ao utilizar

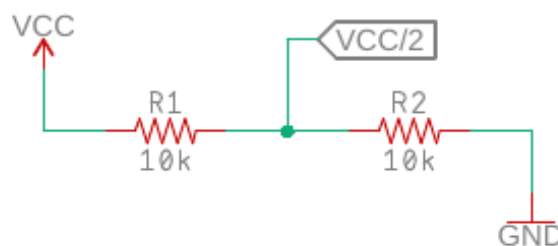
Figura 18 – Níveis de Umidade do solo



Fonte: Elaborado pelo autor.

somente o conversor analógico digital não é possível medir tensões maiores 2.048 V visto que esse é o valor de referência.

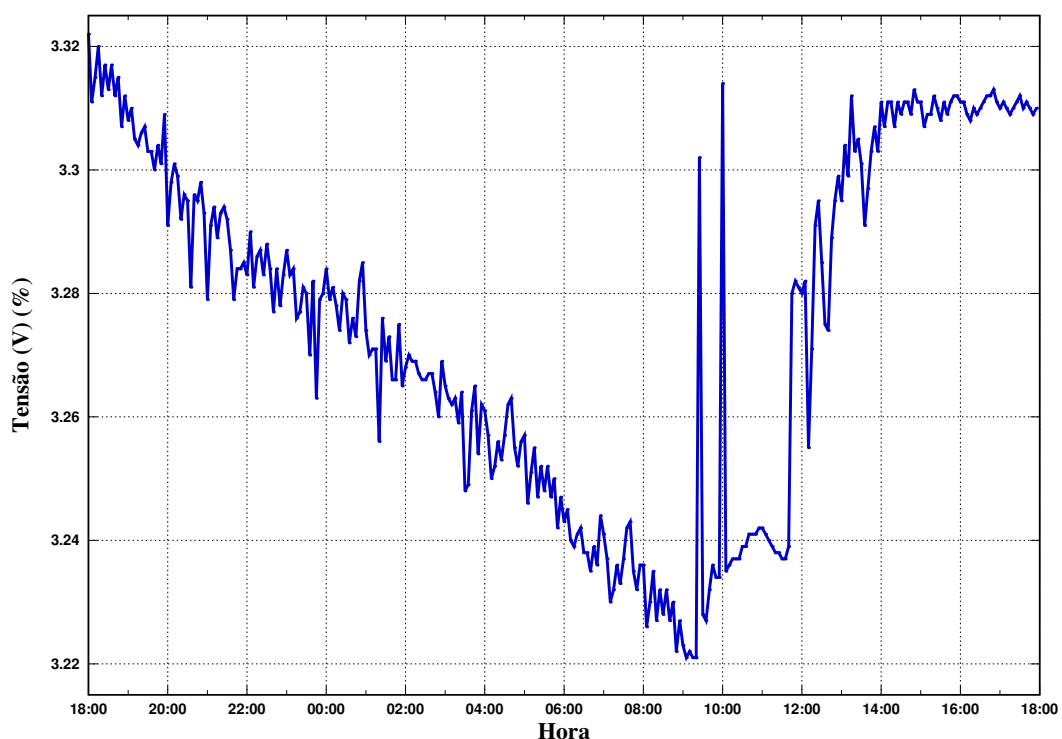
Contudo é necessário medir tensões maiores que 2.048 V, para que isso seja possível foi adotado o uso de um circuito divisor de tensão com dois resistores de valor  $10\text{ k}\Omega$  de acordo com a Figura 19, logo, o resultado obtido na medição deve ser dobrado. Este valor de resistência adotado resulta em um valor de resistência total de  $20\text{ k}\Omega$ , logo a corrente que irá percorrer esses resistores será aproximadamente  $1,65\text{ }\mu\text{A}$  que é suficientemente pequena para não demandar muito da bateria e suficientemente alta para o conversor analógico-digital detectar o nível de tensão.

Figura 19 – Divisor de tensão com dois resistores de  $10\text{ k}\Omega$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visualizado no gráfico da Figura 20, durante o período noturno a tensão de alimentação caiu aos poucos, isso aconteceu devido o sistema está sendo alimentado apenas pela bateria, já que não há luz solar, logo os painéis solares não geram energia durante este período. A partir do momento em que há luz solar suficiente para gerar energia o sistema passa a ser alimentado também através do painel solar, e a bateria é carregada. Durante o período da tarde houve uma maior incidência de luz solar como pode ser observado no gráfico da Figura 15, dessa forma a bateria pode ser carregada mais rapidamente durante este período.

Figura 20 – Níveis de Tensão de Alimentação

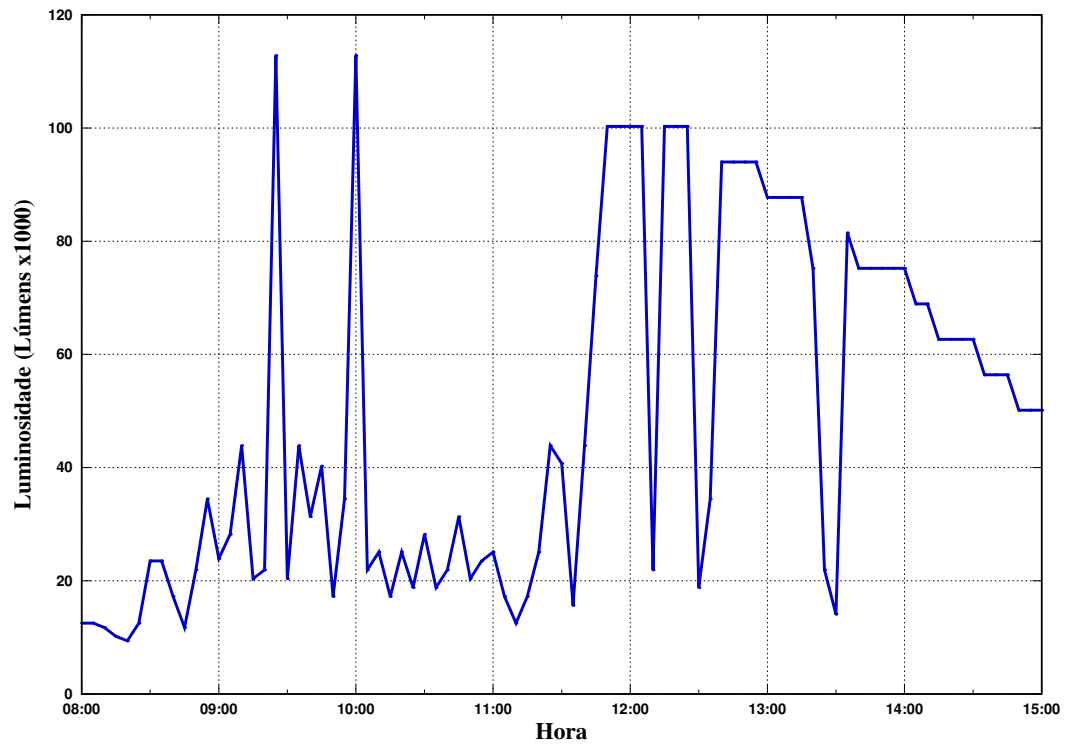


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o gráfico das Figuras 21 e 22 podemos notar que entre 9:00 e 10:00 a luminosidade passa de um valor baixo para um valor bem alto, e isso resulta em uma elevação na tensão de alimentação devido a placa solar começar a fornecer energia ao sistema. Já entre 12:00 e 14:00 algumas nuvens interceptaram a luz solar e isso fez com que o painel solar parasse de funcionar, logo a bateria que não estava completamente carregada passou a alimentar o sistema, o que explica a queda de tensão.

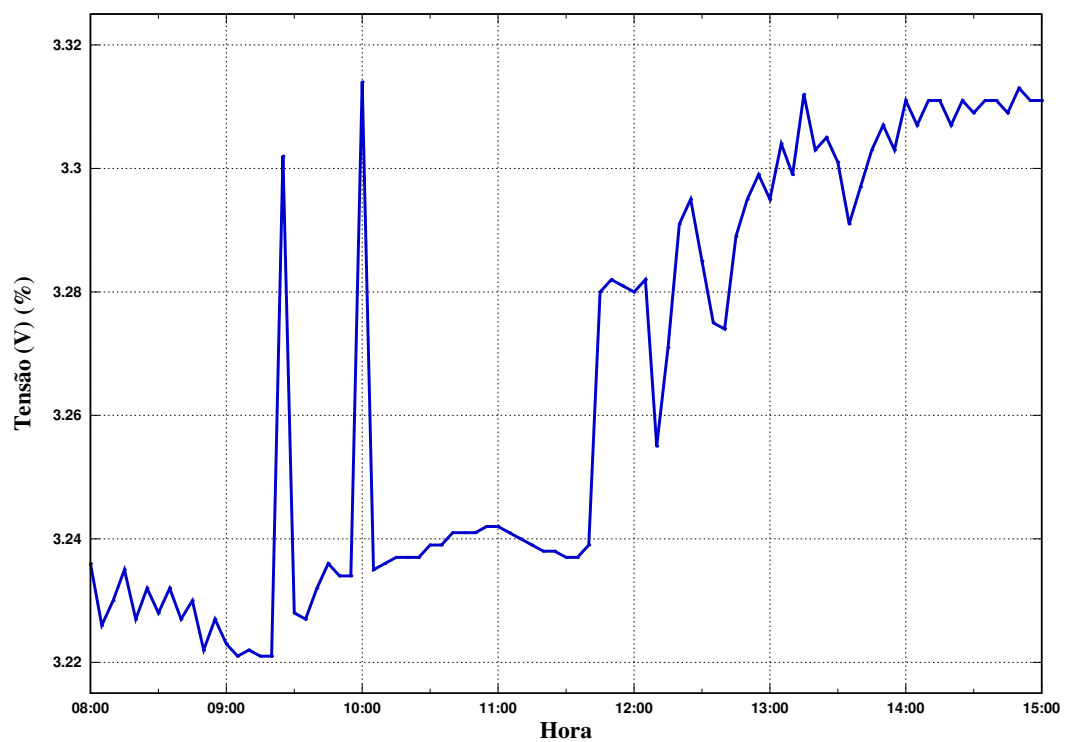
É importante ressaltar que o valor de tensão da bateria aumentou significativamente no período da tarde, logo podemos chegar a conclusão que a bateria recarregou através da energia fornecida pelo painel solar.

Figura 21 – Níveis de luminosidade entre 08:00 e 15:00



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Níveis de tensão de alimentação entre 08:00 e 15:00



Fonte: Elaborado pelo autor.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho apresentou o processo de implementação de um dispositivo utilizando tecnologias que estão em ascensão na área de sistemas embarcados, como LoRaWAN® e energia solar. Um dos fatores que mais influenciou no processo seletivo de componentes foi consumo de energia, desde que o componente desempenhe seu papel de modo que cumpra os requisitos do sistema.

Entre as principais tarefas, codificar os *drivers* dos periféricos foi o que demandou mais tempo, visto que o microcontrolador utilizado no projeto é novo e não possui bibliotecas prontas, logo foi necessário implementar praticamente tudo. O desenvolvimento do *firmware* do transmissor SX1276 foi o que demandou mais tempo, cerca de 70% do tempo total gasto na implementação do dispositivo. Isso aconteceu devido o SX1276 não ser um transmissor fácil de utilizar, selecionar o transmissor RN2903 para o projeto facilitaria bastante o processo de implementação, contudo o custo do sistema iria ultrapassar o dobro do sistema utilizando o SX1276, logo utilizar o transmissor mais barato foi uma decisão que valeu a pena.

O processo de construção do dispositivo foi bem rápido e tudo saiu como esperado, além disso alguns problemas relacionados a conexões e interferências foram solucionados ao migrar os componentes da *protoboard* para a placa PCB. Os sensores se mostraram bastante acurados, pois os dados coletados estão de acordo com as condições climáticas do local no qual o dispositivo foi testado. Alguns testes relacionados a consumo e distância máxima de comunicação poderiam ser sido feitos, contudo foi dado foco em fazer o transmissor funcionar para satisfazer todos os objetivos específicos.

Como trabalhos futuros pretende-se implementar um modo de *debug* para o dispositivo, de forma que seja possível ajustar algumas configurações tais como tempo de cada ciclo, precisão dos sensores e modos de operação, sem a necessidade de recompilar o código fonte e gravar novamente. Em adição, a plataforma de *debug* será uma aplicação móvel que utilizará o protocolo de transmissão *bluetooth*, de forma que seja possível acessar e alterar facilmente as configurações através de um *smartphone* ou *tablet*, sem a necessidade de utilizar cabos.

## REFERÊNCIAS

- AI-THINKER. ESP-01 WiFi Module. 2015. Disponível em: <<http://ecksteining.de/Datasheet/Ai-thinkerESP-01EN.pdf>>.
- ALVES, R. ANA e Embrapa concluem levantamento sobre irrigação com pivôs centrais no Brasil. 2015. Disponível em: <[http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id\\_noticia=12669](http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=12669)>. Acesso em: 21 mar. 2019.
- ANASTASI, G.; BORGIA, E.; CONTI, M.; GREGORI, E. IEEE 802.11 ad hoc networks: Performance measurements. **Proceedings - 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, ICDCSW 2003**, p. 758–763, 2003.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Grupo Gen - LTC, 2011. ISBN 9788521618799. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=HBZCAwEACAAJ>>.
- BOARD, N. S.; COUNCIL, N. R. *et al.* **Technology for the United States Navy and Marine Corps, 2000-2035: Becoming a 21st-century Force: V. 3, Information in Warfare**. [S.l.]: National Academies, 1997.
- DAVIS, G.; CASADY, W. W.; MASSEY, R. E. Precision agriculture: An introduction. **Extension publications (MU)**, University of Missouri Extension, 1998.
- DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. LoRa Technology - An Overview. **Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2018**, IEEE, n. Iceca, p. 284–290, 2018.
- DÍAZ, S. E.; PÉREZ, J. C.; MATEOS, A. C.; MARINESCU, M. C.; GUERRA, B. B. A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier B.V., v. 76, p. 252–265, 2011. ISSN 01681699. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.004>>.
- FARAHANI, S. ZigBee Basics. **ZigBee Wireless Networks and Transceivers**, p. 1–24, 2009.
- FORSTER, A. **Introduction to wireless sensor networks**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. ISBN 9781118993514.
- GARCÍA-HERNÁNDEZ, C.; IBARGÜENGOYTIA-GONZÁLEZ, P.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J.; PÉREZ-DÍAZ, J. Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey. **IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security**, v. 7, p. 264–273, 2007. Disponível em: <<http://campus.cva.itesm.mx/jdperez/documentos/IJCSNS-WSN-publicado-03-2007.pdf>>.
- ILIE-ABLACHIM, D.; PăTRU, G. C.; FLOREA, I. M.; ROSNER, D. Monitoring device for culture substrate growth parameters for precision agriculture: Acronym: MoniSen. **Networking in Education and Research: RoEduNet International Conference 15th Edition, RoEduNet 2016 - Proceedings**, IEEE, 2016.
- INC, M. T. **PIC16(L)F18426/46**. 2017. 757 p.
- INTEGRATED, M. Water Temperature Sensor : DS18S20. **Maxim Integrated**, v. 92, p. 1–21, 2017.

JUAN, M. N. V.; FARUK, F. R.; QUEZADA, Y. M. Design and implementation of WSN for precision agriculture in white cabbage crops. **Proceedings of the 2017 IEEE 24th International Congress on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2017**, 2017.

LI, C. H.; LAO, K. W.; TAM, K. W. A flooding warning system based on RFID tag array for energy facility. **RFID-TA 2018 - 2018 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications**, IEEE, 2018.

LoRa Alliance Technical Committee. Low-Power Long Range LoRa ® Technology Transceiver Module. 2017. Disponível em: <<https://loro-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v11>>.

MEERA, C. S.; SAIRAM, P. S.; SUNNY, S.; SINGH, R. A.; SINGH, R. K. Implementation of an incampus fire alarm system using zigbee. **2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)**, p. 732–737, 2015.

MICROCHIP. **PICKIT 3 User's Guide**. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9781620770085.

Microchip Technology Inc. MPLAB ® X IDE User ' s Guide. 2012.

PAN, G.; HE, J.; WU, Q.; FANG, R.; CAO, J.; LIAO, D. Automatic stabilization of Zigbee network. **2018 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data, ICAIBD 2018**, IEEE, p. 224–227, 2018.

PANASONIC. **Panasonic NCR18650B Specifications**. Sanyo Energy, 2012. 18650 p. Disponível em: <<https://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf>>.

PATHAK, S.; KUMAR, M.; MOHAN, A.; KUMAR, B. Energy Optimization of ZigBee Based WBAN for Patient Monitoring. **Procedia Computer Science**, Elsevier Masson SAS, v. 70, p. 414–420, 2015. ISSN 18770509. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.10.055>>.

PEREIRA, L. S.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, v. 57, n. 3, p. 175–206, 2002. ISSN 03783774.

SEMTECH. Sx1276/77/78/79 Wireless, Sensing & Timing Datasheet. n. March, 2015. ISSN 00224944.

TANIM, M. M. Z. **How does passive RFID works, briefly explained**. 2016.

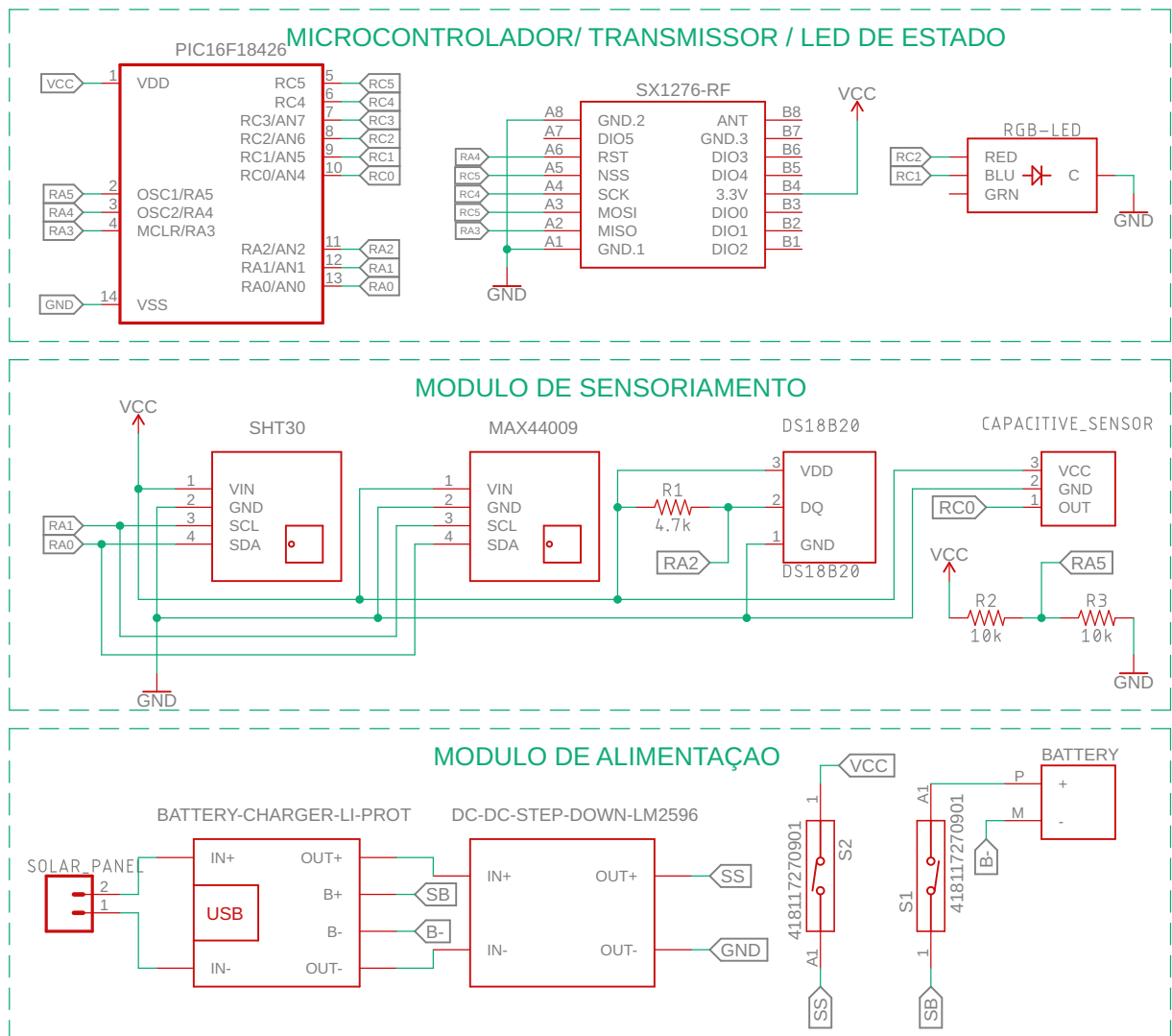
Texas Instruments. **LM2596 SIMPLE SWITCHER ® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator**. 2016. 1–45 p. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>>.

TIWARI, P.; SAXENA, V. P.; MISHRA, R. G.; BHAVSAR, D. Wireless Sensor Networks: Introduction, Advantages, Applications and Research Challenges. **HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research** ISBN, v. 14, 2015. Disponível em: <<http://ijtir.hctl.org>>.

TOMAR, A. Introduction to Zigbee Technology. **Global Technology Centre**, v. 1, n. July, p. 1–24, 2011.

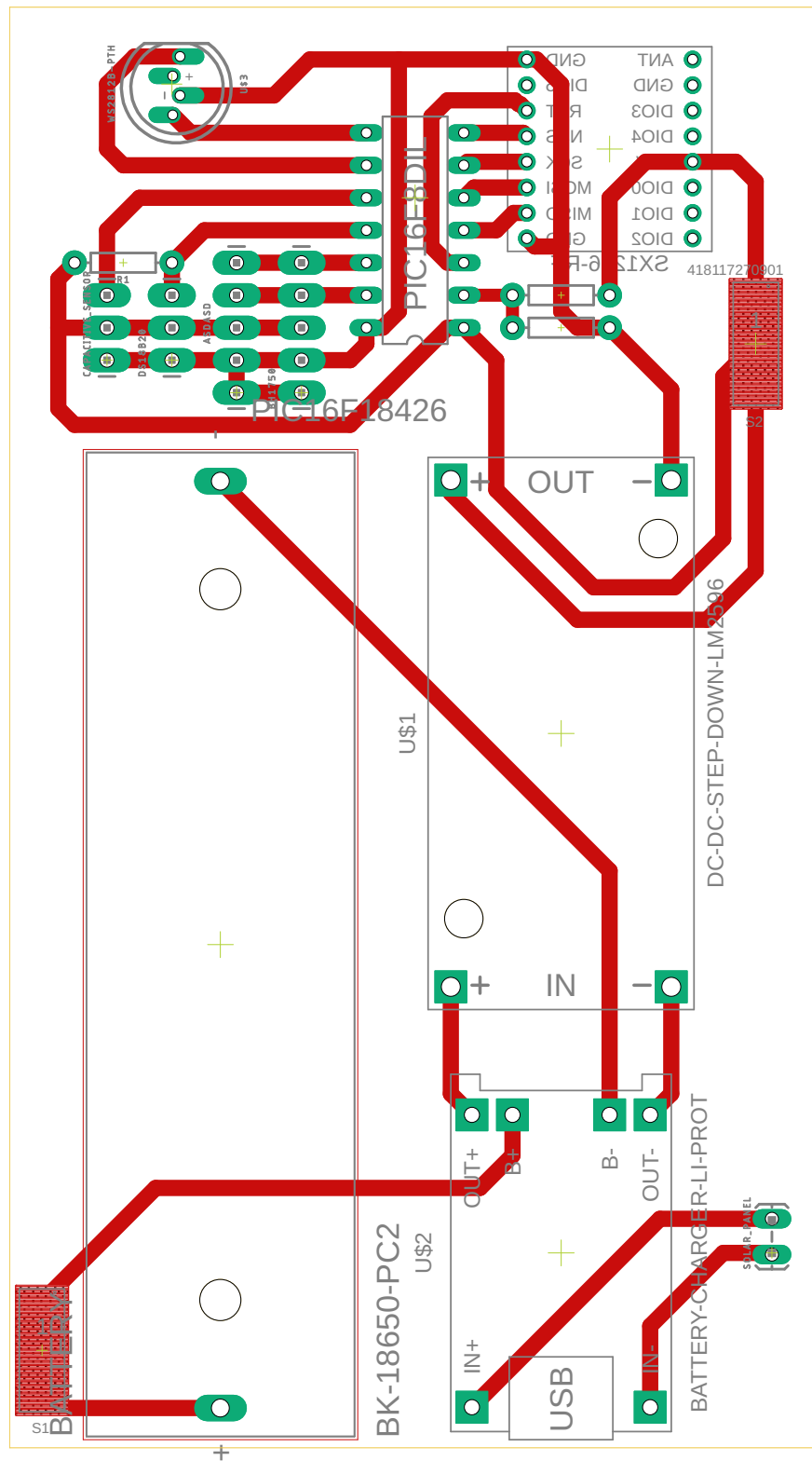
WANG, C.; GEORGE, D.; GREEN, P. R. Development of plough-able RFID sensor network systems for precision agriculture. **WiSNet 2014 - Proceedings: 2014 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks**, IEEE, 2014.

## APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO DISPOSITIVO



Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE B – DESENHO DA PLACA DO DISPOSITIVO



Fonte: Elaborado pelo autor.