



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

Modelo de Estimativa de Consumo para Aplicações em Fazendas Inteligentes com Colheita de Energia

Vinicius Simões Pedro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Francisco Butzen
Co-orientador: Prof. Dr. Vagner Santos da Rosa

Rio Grande, 2024

Ficha Catalográfica

P372m Pedro, Vinicius Simões.

Modelo de estimativa de consumo para aplicações em fazendas inteligentes com colheita de energia / Vinicius Simões Pedro. – 2024. 66 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Computação, Rio Grande/RS, 2024.

Orientador: Dr. Paulo Francisco Butzen.

Coorientador: Dr. Vagner Santos da Rosa.

1. Colheita de energia 2. Fazendas inteligentes 3. Protocolos de comunicação 4. internet das coisas I. Butzen, Paulo Francisco II. Rosa, Vagner Santos da III. Título.

CDU 004

Catálogo na Fonte: Bibliotecária Vanessa Ceiglinski Nunes CRB 10/2174

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Modelo de Estimativa de Consumo para Aplicações em Fazendas
Inteligentes com Colheita de Energia**

Vinícius Simões Pedro

Banca examinadora:

 Documento assinado digitalmente
RODRIGO ZELIR AZZOLIN
Data: 08/12/2023 14:29:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Zelir Azzolin (FURG) Documento assinado digitalmente
ROGERIO MALTA BRANCO
Data: 07/12/2023 15:42:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rogério Malta Branco (IFRS) Documento assinado digitalmente
PAULO FRANCISCO BUTZEN
Data: 13/12/2023 11:12:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Francisco Butzen (UFRGS)
Orientador Documento assinado digitalmente
VAGNER SANTOS DA ROSA
Data: 12/12/2023 09:55:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Vagner Santos da Rosa (FURG)
Co-orientador

RESUMO

PEDRO, Vinicius Simões. **Modelo de Estimativa de Consumo para Aplicações em Fazendas Inteligentes com Colheita de Energia**. 2024. 64 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

A Internet das Coisas (IoT) se tornou uma presença cada vez mais intrínseca no cotidiano das pessoas, desempenhando um papel crucial na monitorização de atividades diárias e no controle remoto de dispositivos eletrônicos. Além disso, os princípios fundamentais da IoT estão penetrando em uma ampla gama de setores, incluindo comércio, indústria e, notadamente, na agricultura.

A principal abordagem deste estudo se concentra no conceito de "Energy Harvesting" (colheita de energia) como uma solução inovadora para reduzir o consumo de energia e estender a autonomia dos dispositivos IoT utilizados na agricultura. A ideia subjacente é a utilização de fontes de energia renovável, notadamente a energia solar, para alimentar esses dispositivos eletrônicos. Ao adotar essa abordagem, podemos substancialmente reduzir a necessidade de manutenção dos equipamentos, uma vez que a substituição frequente de baterias se torna dispensável. Esse avanço tem o potencial de revolucionar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de IoT em fazendas inteligentes.

O agronegócio, como um dos setores de maior crescimento econômico, demanda cada vez mais a capacidade de monitorar e gerenciar operações em campo para otimizar a produtividade. No entanto, a manutenção de dispositivos de IoT em locais remotos apresenta desafios significativos, principalmente relacionados à logística envolvida na substituição de baterias, que muitas vezes requer deslocamentos físicos até o local do dispositivo. Portanto, este trabalho tem como objetivo primordial desenvolver um modelo de estimativa de consumo para aplicações em smart farming.

O modelo é baseado em um nó específico, que utiliza um microcontrolador, um radiotransmissor LoRa e um sensor de umidade do solo, todos operando a uma tensão de 5V. Os resultados deste estudo destacam a significativa relevância da modelagem de consumo de energia na otimização de sistemas microprocessados. A aplicação de modelos de consumo possibilita a formulação de estratégias para a minimização do consumo de energia e a estimativa da autonomia do sistema em diversos cenários de operação. A modelagem do consumo emerge como um valioso recurso para a redução de despesas e o aprimoramento da eficiência energética de sistemas microprocessados, tornando-se uma ferramenta fundamental no desenvolvimento de sistemas com baixo consumo de energia.

Palavras-chave: Colheita de energia, fazendas inteligentes, protocolos de comunicação, internet das coisas.

ABSTRACT

PEDRO, Vinicius Simões. **Consumption Estimation Model for Applications in Smart Farms with Energy Harvesting**. 2024. 64 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

The Internet of Things (IoT) has become an increasingly intrinsic presence in people's daily lives, playing a crucial role in monitoring daily activities and remotely controlling electronic devices. Furthermore, the fundamental principles of IoT are penetrating a wide range of sectors, including commerce, industry and, notably, agriculture.

The main approach of this study focuses on the concept of "Energy Harvesting" as an innovative solution to reduce energy consumption and extend the autonomy of IoT devices used in agriculture. The underlying idea is to use renewable energy sources, notably solar energy, to power these electronic devices. By adopting this approach, we can substantially reduce the need for equipment maintenance, as frequent battery replacement becomes unnecessary. This advancement has the potential to revolutionize the efficiency and reliability of IoT systems on smart farms.

Agribusiness, as one of the fastest growing economic sectors, increasingly demands the ability to monitor and manage field operations to optimize productivity. However, maintaining IoT devices in remote locations presents significant challenges, mainly related to the logistics involved in replacing batteries, which often require physical travel to the device location. Therefore, this work's primary objective is to develop a consumption estimation model for smart farming applications.

The model is based on a specific node, which uses a microcontroller, a LoRa radio transmitter and a soil moisture sensor, all operating at a voltage of 5V. The results of this study highlight the significant relevance of energy consumption modeling in the optimization of microprocessor systems. The application of consumption models makes it possible to formulate strategies for minimizing energy consumption and estimating system autonomy in different operating scenarios. Consumption modeling emerges as a valuable resource for reducing expenses and improving the energy efficiency of microprocessed systems, becoming a fundamental tool in the development of systems with low energy consumption.

Keywords: Energy harvesting, smart farming, communications protocols, internet of things.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Potência do processador medida em MIPS mostrada em uma escala logarítmica. [42]	11
Figura 2	Densidade de energia da bateria em Wh/l [42]	11
Figura 3	<i>Smart Farming</i>	15
Figura 4	Transmissão de Dados	16
Figura 5	Arquitetura LoRaWAN [11]	18
Figura 6	Exemplo de um nó - Z-Wave	19
Figura 7	Exemplo de uma rede IPv6 com uma rede em malha 6LoWPAN [46]	20
Figura 8	O modelo OSI, um exemplo de pilha Wi-Fi® e a pilha 6LoWPAN [46]	20
Figura 9	Calculadora com célula solar	23
Figura 10	Fontes de energia x densidade	24
Figura 11	Características DRV5023	32
Figura 12	Características DRV5032	32
Figura 13	Diagrama do sistema proposto (Fonte: Autor)	35
Figura 14	Calculadora Online [6]	43
Figura 15	Análise 1 (Fonte: Autor)	50
Figura 16	Análise 2 (Fonte: Autor)	51
Figura 17	Análise 3 (Fonte: Autor)	52
Figura 18	Análise 3 - Aprofundado (Fonte: Autor)	52
Figura 19	Análise 4 (Fonte: Autor)	53
Figura 20	Análise 5 (Fonte: Autor)	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tabela Comparativa entre baterias e supercapacitores	10
Tabela 2	Tabela comparativa entre ZigBee e Z-Wave. Tabela: Autor	19
Tabela 3	Comparativo entre os trabalhos	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BLE	Bluetooth Low Energy
CAGR	Compound Annual Growth Rate
EH	Energy Harvesting
GW	Gigawatt
IoT	Internet of Things
kW	Quilowatt
LiPo	Lithium-Ion Polymer
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
MIPS	Millions of Instructions Per Second
MW	Megawatt
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
NFC	Near Field Communication
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
SEH	Solar Energy Harvesting
SoC	System on a Chip
SF	Spreading Factor
SC	Super Capacitor
TEG	Thermoelectric Generator
ULP	Ultra Low Power
WSN	Wireless Sensor Networks

SUMÁRIO

1	Introdução	8
1.1	Motivação	9
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivos Específicos	12
1.3	Organização	12
2	Revisão Conceitual	13
2.1	Smart Farming	13
2.2	Possíveis tecnologias de comunicação para aplicação em <i>Smart Farming</i>	15
3	Energy Harvesting	22
3.1	Formas de armazenamento de energia	24
4	Revisão da Literatura	26
4.1	Revisão bibliográfica	26
4.2	Trabalhos relacionados	29
4.3	Técnicas ultra-low power	30
5	Contextualização e Evolução da Proposta de Dissertação	34
5.1	Metodologia	35
6	Resultados	42
6.1	Modelamento do protocolo de transmissão LoRa	42
6.2	Modelamento Sensor	46
6.3	Modelamento Microcontrolador	47
6.4	Análise dos resultados	48
6.4.1	Análise 1	49
6.4.2	Análise 2	49
6.4.3	Análise 3	50
6.4.4	Análise 4	51
6.4.5	Análise 5	53
7	Conclusão	56
	Referências	59

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia está presente no cotidiano de muitas pessoas e estamos cada vez mais rodeados por ela. A necessidade de estar conectado se tornou parte de nós, seja para ver as notícias do dia, ver o extrato bancário ou trocar mensagens com algum familiar ou amigo. Mas para que isso ocorra, os dispositivos necessitam de algum tipo de energia.

Além dos dispositivos portáteis, nos últimos anos surgiram milhares de produtos baseados no conceito de Internet das Coisas (IoT, do inglês, *Internet of Things*). Embora muitos destes produtos sejam encontrados na parte interna de equipamentos como televisores ou geladeiras, os quais podem ser alimentados diretamente pela rede elétrica, existem outros produtos voltados para a IoT que não se encontram próximos de uma fonte de energia elétrica.

Em dispositivos portáteis ou de difícil acesso à rede elétrica, utilizam-se baterias para mantê-los em funcionamento. É importante considerar a necessidade de recarregar essas baterias, para garantir que estejam prontas quando mais precisam ser utilizadas.

Atualmente, com maior facilidade de acesso a internet, tornou-se viável implantar dispositivos IoT para capturar dados de quase qualquer objeto ou produto. Um mercado crescente para consumir este tipo de tecnologia é o agronegócio, o qual vem crescendo exponencialmente nos últimos anos. Além disso, a tecnologia vem se tornando uma grande aliada neste setor, já que ela pode ser aplicada em vários estágios do processo de produção, criando inclusive o conceito de *Smart Farming*, do português fazenda inteligente ou agricultura inteligente.

Segundo Heble^[32] et al. (2017), a agricultura tradicional está sendo transformada em agricultura inteligente graças a inserção da Internet das Coisas no setor agrícola a qual possibilita o monitoramento remoto de diversas funções no campo, como estágios de crescimento do plantio, doenças e estimativa do rendimento através de dispositivos de baixo custo e baixo consumo de energia. No momento, estamos na agricultura 4.0: a era da agricultura inteligente (que é caracterizada por operações não tripuladas, a qual deu-se início em 2017).

A maior barreira em aplicações consideradas remotas, é a maneira utilizada para fornecer energia para estes dispositivos. A primeira vertente deste estudo se concentra na

investigação aprofundada de dispositivos de captura e armazenamento de energia.

Existem diversas formas de energia ao nosso redor e a frase "na natureza nada se cria e nada se perde, tudo se transforma" de Antoine Laurent Lavoisier se encaixa perfeitamente, visto que podemos coletar a energia disponível na atmosfera e transformá-la para utilizar em dispositivos eletrônicos. Este processo de coleta de energia é chamado de *energy harvesting*, também conhecido como colheita de energia ou captura de energia. A captura de energia pode ocorrer através da transmissão de uma antena de RF ou de uma célula fotovoltaica, por exemplo.

A captura de energia não é algo novo. Pelo contrário, podemos dizer inclusive, que Nikola Tesla [56] utilizou um método semelhante quando inventou sua torre de raios. Essa invenção tinha como propósito transmitir energia para longas distâncias sem a necessidade de utilizar fios e cabos elétricos.

É claro que a energia gerada por vibrações ou por uma antena de RF não será suficiente para alimentar um *smartphone* de forma direta, por exemplo. Contudo, através de experimentos, análises e tecnologias atuais, deverá ser possível manter dispositivos que possuam baixa corrente ligados remotamente para enviar dados para um servidor remoto periodicamente.

Por fim, este estudo visa simplificar a complexidade dos sistemas de energia em fazendas inteligentes. Isso é essencial para tornar a tecnologia acessível e operacional, além de trazer uma contribuição significativa para a transformação sustentável da agricultura. Através da pesquisa sobre dispositivos de captura e armazenamento de energia, técnicas de colheita de energia, redução de custos, minimização de impactos ambientais e simplificação de sistemas, busca-se fornecer um modelo capaz de estimar o consumo para aplicações em fazendas inteligentes.

1.1 Motivação

A busca por soluções inovadoras e sustentáveis na agricultura é uma necessidade iminente em nossa sociedade. Fazendas inteligentes representam um avanço significativo, mas a eficiência energética e a sustentabilidade continuam sendo desafios cruciais. Este trabalho é motivado pela necessidade de investigar e implementar medidas capazes de auxiliar a otimizar fazendas inteligentes.

A pesquisa em dispositivos de captura de energia visa identificar as tecnologias mais promissoras, como painéis solares, turbinas eólicas e baterias modernas, a fim de encontrar soluções que maximizem a eficiência energética a um custo acessível. A busca por técnicas de colheita de energia é fundamental para tornar as fazendas inteligentes mais autossuficientes e eficientes. Isso inclui aproveitar as fontes de energia renovável.

No contexto da redução do custo total do *hardware*, a otimização das fontes de energia e a integração de técnicas de colheita de energia visam reduzir os gastos com equipamen-

Tecnologia	Bateria	Supercapacitores	Híbrido (EH+SC)
Custo (médio)	U\$ 10,00	U\$ 2,00	U\$ 10,00
Custos extras (médio)	U\$ 5,00	U\$ 5,00	U\$ 5,00
Eficiência	70-90%	95%	-95%
Tempo de vida	1-3 anos	5-10 anos	5-10 anos
Temperatura de operação	-10 a 40°C	-40 a 80°C	-10 a 40°C
Ciclos de operação	500-10.000	100.000-1.000.000	100.000 - 1.000.000

Tabela 1: Tabela Comparativa entre baterias e supercapacitores

[21]

tos e sistemas. Em paralelo, a transição para fontes de energia limpa auxilia na redução do desperdício energético e cotribui com a minimização dos impactos ambientais.

Uma das premissas fundamentais deste trabalho é investigar e implementar soluções de armazenamento de energia que sejam compatíveis com a otimização de fazendas inteligentes. Para atingir esse objetivo, consideraremos duas alternativas principais: baterias e supercapacitores, cada uma com suas vantagens e desvantagens distintas.

No âmbito das baterias, reconhecemos sua ampla utilização e maturidade tecnológica, oferecendo alta capacidade de armazenamento e descarga controlada. No entanto, desafios como ciclos limitados de carga e descarga, peso e tamanho significativos, e problemas de segurança destacam a necessidade de avaliação cuidadosa.

Os supercapacitores, por sua vez, surgem como uma alternativa mais recente e dinâmica. Com uma alta taxa de recarga e descarga, longa vida útil e menor necessidade de manutenção, eles apresentam vantagens distintas. Entretanto, suas limitações em capacidade de armazenamento e custo elevado, aliados ao fato de serem uma tecnologia em desenvolvimento, exigem uma avaliação crítica de sua aplicabilidade nas fazendas inteligentes.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre baterias e supercapacitores considerando custos, eficiência, tempo de vida, temperatura e ciclos de operação. As siglas EH e SC presentes na última coluna significam *Energy harvesting* e *Super capacitor*, respectivamente. Através dessas informações, dispositivos preparados para operar com baixa corrente são capazes de se beneficiar dos supercapacitores até que eles sejam recarregados novamente.

Além disso, existe um comparativo entre *hardware* e baterias que diz: apesar de dobrarmos a capacidade de processamento a cada 18 meses, Lei de Moore [50], a densidade de energia das baterias tem dobrado somente a cada 120 meses, seguindo a lei de Snail. Nos últimos 20 anos os processadores tiveram melhorias 300 vezes, conforme ilustrado na Figura 1, enquanto que as baterias em tiveram melhorias de somente 4 vezes, conforme ilustrado na Figura 2.

Diante dos desafios e das alternativas apresentadas, este trabalho visa desenvolver um modelo de estimativa de consumo energético. Este modelo buscará fornecer uma

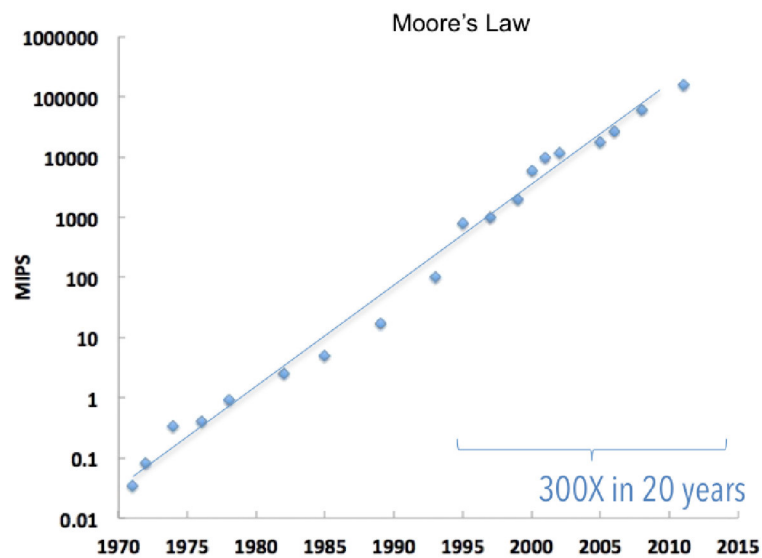


Figura 1: Potência do processador medida em MIPS mostrada em uma escala logarítmica. [42]

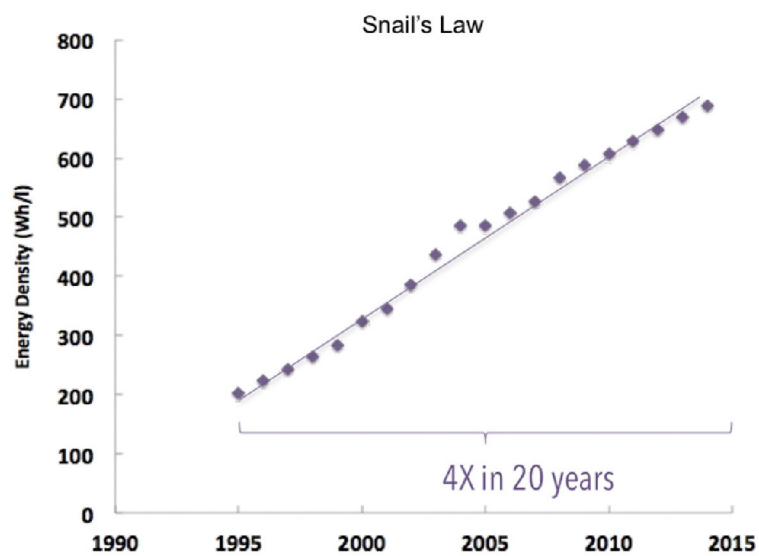


Figura 2: Densidade de energia da bateria em Wh/l [42]

estrutura analítica para avaliar a viabilidade e eficácia das soluções propostas em fazendas inteligentes com colheita de energia.

A criação desse modelo de estimativa de consumo não apenas contribuirá para uma compreensão mais aprofundada dos requisitos energéticos específicos dessas aplicações, mas também permitirá uma avaliação criteriosa da eficiência e custo-benefício do *hardware* aplicado para tal. Dessa forma, pretende-se não apenas teorizar sobre a otimização das fazendas inteligentes, mas também desenvolver uma ferramenta para orientar a implementação dessas soluções inovadoras.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de *energy harvesting* aplicados a *smart farming* dando enfoque sobre características de armazenamento e dispositivos de captura de energia além de explorar em mais detalhes sensores e protocolos de comunicação de baixo consumo e ainda elaborar um modelo de estimativa de consumo para aplicações em *smart farming*.

1.2.1 Objetivos Específicos

Fazer uma revisão sobre os conceitos de *energy harvesting* dando enfoque sobre características de armazenamento e dispositivos de captura de energia; Fazer uma revisão sobre *smart farming* obtendo os principais protocolos de comunicação; Fazer uma revisão da aplicação de conceitos de *energy harvesting* em *smart farming*; Elaborar um modelo de estimativa de consumo para aplicações em *smart farming*.

1.3 Organização

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: primeiramente foi realizado o levantamento bibliográfico sobre *smart farming* [2.1] e *energy harvesting* [3]. Após foi feito um levantamento bibliográfico sobre sensores e protocolos de comunicação de baixo consumo [2.2], assim como, formas alternativas de armazenamento de energia [3.1].

Em seguida, foi desenvolvido um modelo de estimativa de consumo para aplicações em *smart farming*, com a finalidade de avaliar o desempenho do sistema desenvolvido. Logo após são comparados os resultados com outros trabalhos da literatura [4.2], visando a validação do modelo proposto.

Por fim, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros [7], com o intuito de apontar possíveis melhorias no modelo desenvolvido e em outras aplicações de *smart farming* que possam ser exploradas utilizando os conceitos de *energy harvesting* e protocolos de comunicação de baixo consumo.

2 REVISÃO CONCEITUAL

Neste capítulo, será apresentada uma revisão conceitual que abordará os principais fundamentos teóricos relacionados aos conceitos de *smart farming*, *energy harvesting* e protocolos de comunicação de baixo consumo para essa finalidade. Para isso, foi realizada uma extensa revisão bibliográfica, na qual foram levantadas informações relevantes sobre esses temas.

Inicialmente, foram explorados os conceitos de *smart farming*, que envolvem o uso de tecnologias avançadas no setor agrícola para melhorar a eficiência, produtividade e sustentabilidade. São discutidas diferentes abordagens e técnicas utilizadas nesse contexto.

Em seguida, foram investigados os conceitos de *energy harvesting*, que se referem à captação e armazenamento de energia a partir de fontes renováveis, como solar, eólica, térmica, entre outras. Foram abordadas as diferentes tecnologias e dispositivos utilizados para essa finalidade, bem como suas vantagens e limitações.

Além disso, foi realizada uma análise dos protocolos de comunicação de baixo consumo de energia que são adequados para aplicações em *smart farming*. São citados protocolos como LoRaWAN, ZigBee, NB-IoT, entre outros, dando destaque as suas principais características.

Por fim, foram abordadas formas alternativas de armazenamento de energia, como baterias recarregáveis, supercapacitores, ar comprimido, entre outros, mostrando seus principais atributos. Dessa forma, essa revisão conceitual fornecerá um panorama abrangente dos principais conceitos, tecnologias e abordagens utilizadas em *smart farming* e *energy harvesting*, bem como formas de comunicação de baixo consumo e armazenamento de energia, fundamentando a pesquisa e direcionando o desenvolvimento do trabalho.

2.1 Smart Farming

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial irá aumentar em 26% até 2050 e isso requer que a produção de alimentos deva ser dada em uma escala muito maior do que a existente hoje. Dessa forma, será imprescindível que se associe técnicas de produção e tecnologia.

Porém, com o envelhecimento da população e as transições demográficas, juntamente com a grande quantidade de pessoas migrando das zonas rurais para as áreas urbanas, têm trazido muitos questionamentos para os cientistas, inclusive de que esse seja o principal motivo pela escassez na agricultura. Além disso, existem ainda as mudanças climáticas como, por exemplo, a temperatura e a umidade, fatores que podem afetar diretamente a produtividade no campo. Atualmente, existem diversos métodos tecnológicos capazes de prever com antecedência mudanças climáticas, o que prova mais uma vez de que a tecnologia é uma grande aliada a agricultura moderna.

Não é de hoje que a tecnologia está inserida nas fazendas. Em meados dos anos 90, a ordenha robotizada já prevalecia na indústria, e de lá pra cá, os métodos e técnicas foram modernizados. Em vista disso, a medida que a tecnologia avança a aplicação na agricultura pode ser dada em novos estágios do processo de produção.

Ainda que a tecnologia não seja algo novo e que os avanços continuem, o que chama mais a atenção nos dias de hoje é o que está por trás de tudo isso: a inteligência responsável por toda essa tecnologia, que inclusive virou um conceito: *smart farming*, do português fazendas inteligentes ou agricultura inteligente. Esse termo indica a inserção de tecnologias para alcançar resultados e buscar melhores desempenhos na produção do campo.

A ideia principal do *smart farming* é atuar em duas frentes: na tomada de decisão e na aplicação, aliada a técnicas de informação avançadas, tais como: inteligência artificial e computação em nuvem, além é claro, de sensores. Essas técnicas exigem informações atualizadas dos sistemas de produção e dos agentes envolvidos na produção para fornecer informações de tomada de decisão, tanto para a produção quanto para as questões estratégicas e gerenciais envolvidas. Com isso, tem-se como foco principal a produção agrícola para aumentar a produção de alimentos.

Smart Farming é uma tendência emergente na agricultura em que a eletrônica e as tecnologias de comunicação são usadas para melhorar a qualidade e a quantidade de produtos agrícolas com mudança de mão de obra intensiva para orientação tecnológica [10]. Como pode ser visto na Figura 3, a expectativa de crescimento para o setor em 2022 era bilionária, com uma taxa composta de crescimento anual de aproximadamente 14%. Em 2023, segundo o IPEA [47], a estimativa de crescimento do setor passou de 13,2% para 15,5%. Ainda de acordo com a imagem, podemos ver alguns casos em que a tecnologia é capaz de auxiliar e porque a agricultura recebe o adjetivo: inteligente.

Começando com a possibilidade da utilização de drones para avaliação do plantio, monitoramento de pragas, irrigação, monitoramento de safra, pulverização e análise do solo e campo, obter essas informações através de imagens aéreas pode ser considerado uma boa alternativa, já que transitar em áreas de plantio nem sempre é uma tarefa fácil. Já para análise do solo, é possível contar ainda com sensores que verificam a temperatura e a umidade, auxiliando na tomada de decisões quando é a melhor hora de plantar.

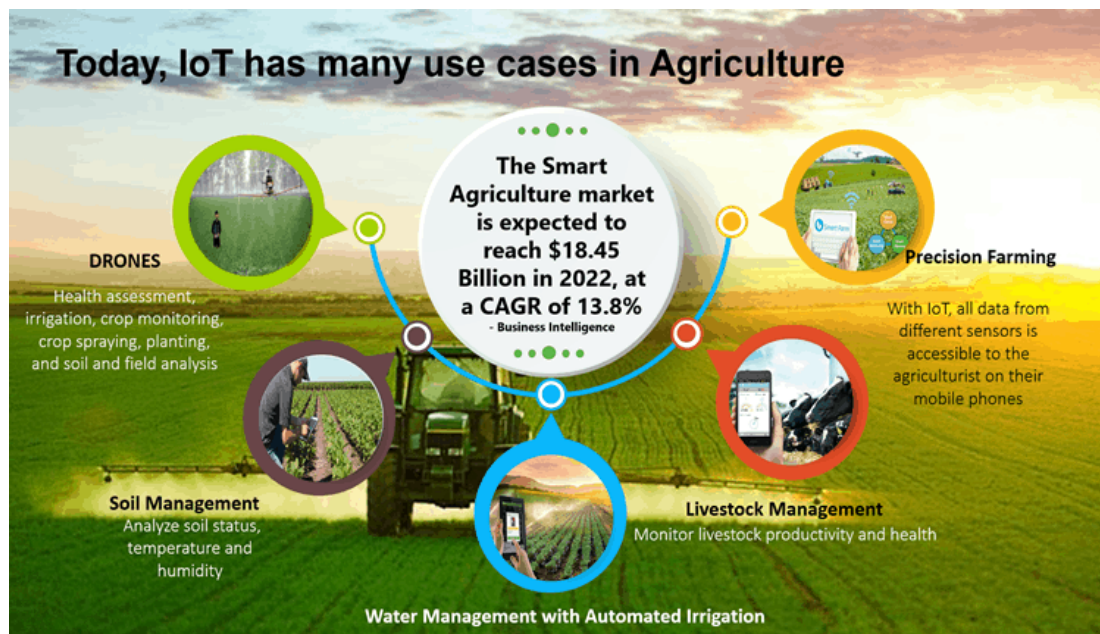


Figura 3: *Smart Farming*

[12]

Ainda é possível verificar a qualidade da água, além de efetuar um controle preciso com relação a irrigação, podendo automatizá-la, inclusive. O monitoramento da saúde e produtividade do gado também é uma forma de controle possível através de sensores.

Mas de nada adiantaria ter diversos sensores espalhados pelo campo se não fosse possível visualizar os dados coletados. Para isso, é necessário enviar os dados para um servidor no qual armazena tais dados e então, ser possível entregar de forma clara e concisa as informações para quem realmente precisa obtê-las.

2.2 Possíveis tecnologias de comunicação para aplicação em *Smart Farming*

Capturar informações através de sensores em áreas rurais exige técnicas para diminuir o consumo de energia, mas além de coletar as informações, é necessário transmiti-las para um servidor, como pode ser visto um exemplo na Figura 4. Em muitas vezes, a antena mais próxima está há alguns quilômetros de distância e para tornar isso possível, é preciso uma ou mais tecnologias de comunicação para tornar a transmissão eficaz.

Abaixo estão listados os principais meios de transmissão utilizados atualmente:

Bluetooth Low Energy[25]: O BLE é uma tecnologia sem fio de baixa potência utilizado atualmente em diversos dispositivos, inclusive os voltados para a Internet das Coisas. Além disso, a tecnologia BLE deverá ser incorporada a bilhões de dispositivos nos próximos anos e recentemente tem sido área de pesquisa

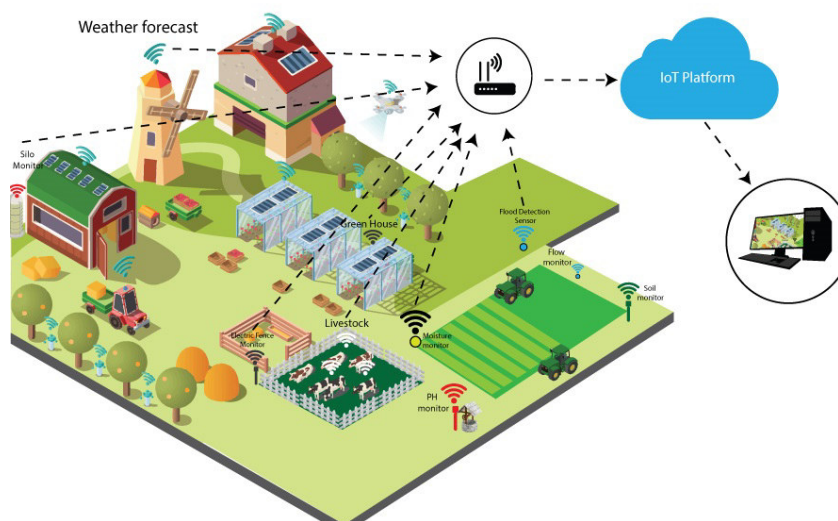


Figura 4: Transmissão de Dados

[9]

para diversas aplicações. Como empecilho, tem seu baixo rendimento, comparado com outras tecnologias sem fio. Sua taxa de transferência varia entre 58 Mbps e 236 Mbps e possui um alcance médio de aproximadamente 40 metros.

Radio Frequency Identification [59] [43] [4]: O sistema de identificação por radiofrequência (RFID) é uma tecnologia que utiliza basicamente uma antena e um transceptor. Essa tecnologia esteve presente na Segunda Guerra Mundial, nos sistemas de radares, quando o físico Sir Robert Alexander Watson-Watt desenvolveu, juntamente com o exército britânico, um dispositivo para inserir nas aeronaves que informassem ao radar que as aeronaves eram aliadas. Atualmente o RFID é uma das tecnologias de comunicação sem fio mais usadas, principalmente na identificação de um objeto, animal ou pessoa. O RFID pode operar em baixa, alta ou ultraelevada frequência, como sua comunicação se dá através de ondas de rádio, seu alcance dependerá do tipo de antena, interferências, e dados a serem transmitidos.

Wi-Fi Direct [15] [16] [53]: O Wi-Fi Direct é uma tecnologia de transmissão que permite trafegar dados via o sistema Wi-Fi, permite que dois ou mais dispositivos se conectem através de suas portas de rede. Com ela é possível conectar dispositivos diretamente através de um sinal sem fio, sem a necessidade de um roteador *wireless*. O Wi-Fi Direct pode atingir um alcance de comunicação de até 200 metros.

Near Field Communication [24]: NFC também é uma tecnologia bastante indicada para o desenvolvimento de sensores de baixo custo. O NFC é um circuito integrado que consome muito pouca energia, contudo, seu alcance é bem baixo. A tecnologia NFC

permite comunicação sem fio direta entre dispositivos e sua comunicação é bidirecional.

LoRa[40][18][14]: O protocolo LoRa (*Long Range*) é uma tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance desenvolvida para permitir a transmissão de dados em distâncias significativas, com baixo consumo de energia. Algumas especificações sobre o protocolo:

Modulação: LoRa utiliza uma técnica de modulação chamada "*Chirp Spread Spectrum*"(CSS), que permite transmitir dados de forma eficaz em longas distâncias. Essa modulação é resistente a interferências e é especialmente adequada para comunicações em ambientes urbanos e rurais.

Longo alcance: Uma das principais vantagens do LoRa é seu alcance. Dependendo das condições do ambiente e da potência de transmissão, as comunicações LoRa podem atingir distâncias de vários quilômetros.

Baixo consumo de energia: LoRa foi projetado para aplicações de baixo consumo de energia, o que o torna ideal para dispositivos que precisam de longa autonomia. Os dispositivos LoRa podem ficar anos sem precisar trocar suas baterias, tornando-os adequados para aplicações de monitoramento remoto e sensores.

Flexibilidade de largura de banda: O protocolo LoRa permite ajustar a largura de banda e a taxa de transmissão, o que o torna adequado para uma variedade de aplicações. Isso permite que os usuários otimizem a relação entre alcance e taxa de dados conforme necessário.

Topologia de rede: LoRa é frequentemente usado em topologias de rede estrela ou ponto a ponto, mas também pode ser implementado em redes *mesh* quando necessário.

Frequências ISM: LoRa opera nas faixas de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), o que significa que é amplamente disponível em muitas regiões do mundo sem a necessidade de licenças específicas.

Gateways: Para estabelecer uma rede LoRa, são necessários gateways que recebem os dados dos dispositivos LoRa e os encaminham para a infraestrutura de rede. Esses gateways são essenciais para conectar dispositivos remotos à Internet ou a outros sistemas de monitoramento.

Protocolos de aplicação: Embora LoRa seja uma camada física e de enlace de dados, muitas implementações usam protocolos de aplicação, como MQTT ou HTTP, para transmitir os dados coletados pelos dispositivos LoRa para servidores ou nuvem.

LoRa suporta até 6 fatores de espalhamento (*spreading factor*) diferentes: 7, 8, 9, 10, 11 e 12. Quanto maior o *spreading factor*, maior a duração de transmissão, o que resulta em um alcance maior. No entanto, um *spreading factor* maior também resulta em uma taxa de dados menor. Além do *spreading factor*, a largura de banda também pode ser configurada em 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz. A largura de banda determina a quantidade de espectro que é usada para transmitir dados. Uma largura de banda mais

estreita resulta em uma sensibilidade do receptor maior, o que significa que o receptor pode detectar sinais mais fracos.

Em resumo, o protocolo LoRa é uma tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance e baixo consumo de energia que se tornou fundamental para aplicações de IoT, monitoramento remoto e redes de sensores que exigem cobertura em áreas extensas. Sua flexibilidade, eficiência energética e capacidade de comunicação em longas distâncias o tornam uma escolha popular para muitos casos de uso.

LoRaWAN[11][7]: LoRaWAN é a especificação de um protocolo construído sobre a tecnologia LoRa e desenvolvido pela LoRa Alliance. Recentemente ganhou bastante atenção por ser um protocolo de baixa potência, longo alcance e que necessita de pouca energia para funcionamento, a um custo de baixa taxa de dados. As redes LoRaWAN são compostas por três elementos principais: nós, gateways e servidor. Esta arquitetura está ilustrada na Figura 5

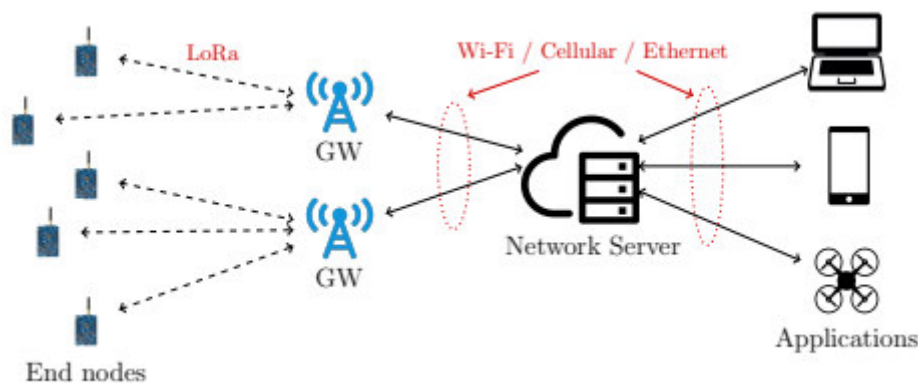


Figura 5: Arquitetura LoRaWAN[11]

Z-Wave[60]: É um protocolo de comunicação sem fio que foi desenvolvido especialmente para automação residencial e comercial. É *System on a Chip* (SoC)¹, e se destaca por ter uma boa confiabilidade na transmissão de mensagens curtas, através de ondas de rádio de baixa energia que opera em uma frequência entre 800 e 900MHz. Além disso, em uma rede Z-Wave, cada dispositivo representa um nó, como na Figura 6 e com isso, todos os dispositivos que tiverem ao seu alcance são conectados uns aos outros. Com isso, surgem algumas vantagens, como a desnecessidade de um gateway, assim como possui um alcance muito grande, visto que o protocolo inclui informações de salto de nó a nó em até quatro vezes.

ZigBee[51]: É um protocolo de comunicação sem fio, com baixo consumo de energia e baixa latência, ainda utiliza criptografia AES-128 em suas transmissões. Além disso,

¹ *System On Chip* (SOC) ou em português, sistema em um chip, significa todos os componentes de um sistema eletrônico em um único Circuito Integrado (CI). Nele é possível incorporar uma unidade de processamento central, portas de entrada e saída, memória interna, bem como blocos de entrada e saída analógica, entre outras coisas. Fonte: <https://anysilicon.com/what-is-a-system-on-chip-soc/>

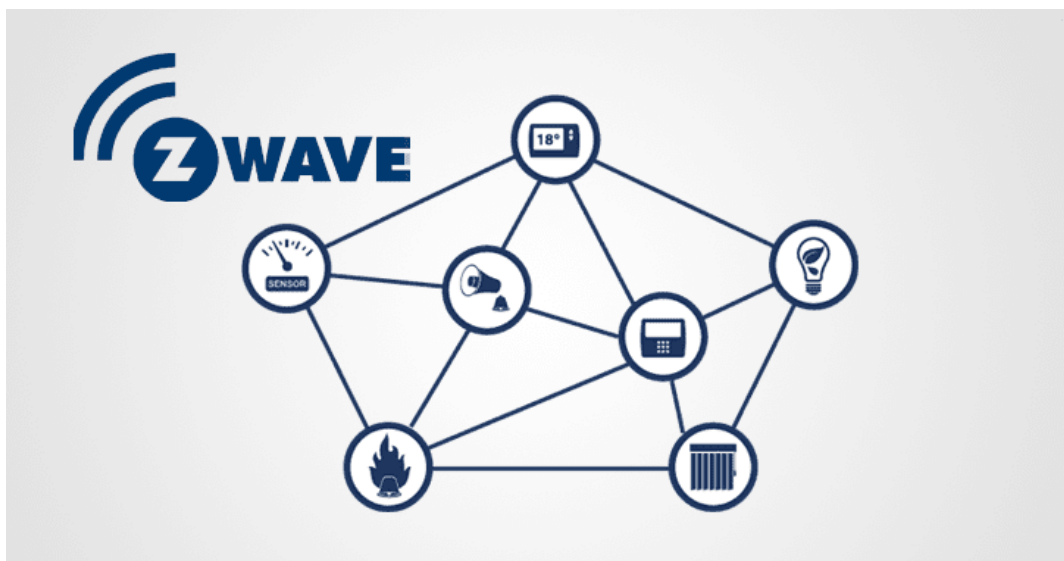


Figura 6: Exemplo de um nó - Z-Wave
[60]

	ZigBee	Z-Wave
Taxa de dados	250kb/s	40kb/s
Consumo de energia	40mA	2.5mA
Alcance	10-20 metros	30-65 metros
Frequência de operação	2.4 GHz	908 MHz
Nós suportados	Mais de 65 mil	Mais de 232
Custos	mais rentável	mais caro

Tabela 2: Tabela comparativa entre ZigBee e Z-Wave. Tabela: Autor

o protocolo ZigBee tem uma certa semelhança com Z-Wave (Tabela 2), visto que ambas utilizam o sistema de nós, permitindo com que um nó se conecte a outro, fazendo com que o alcance inicial se estenda.

6LoWPAN[46]: Um acrônimo de *IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Networks*, que significa IPv6 em redes de área pessoal sem fio de baixa potência. É uma tecnologia que permite o tráfego de pacotes de dados de forma eficiente dentro de pequenas camadas, conforme mostra a Figura 7, como as definidas pela IEEE 802.15.4. Existem três tipos de redes 6LoWPAN:

Ad-Hoc – Não estão conectadas à Internet e não necessitam de infra-estrutura.

Simple – São redes simples, conectadas a outras redes ou na Internet à partir de um coordenador.

Extended – Múltiplas redes de simples arquiteturas que se ligam por múltiplos coordenadores e estão conectadas a um backbone ou à Internet.

O coordenador é o responsável pela conexão das redes, controle de fluxo, entre outras funções. Caso a rede LoWPAN esteja conectada a uma rede IPv4, o coordenador é o principal responsável pela interligação entre as redes IPv4 e IPv6.

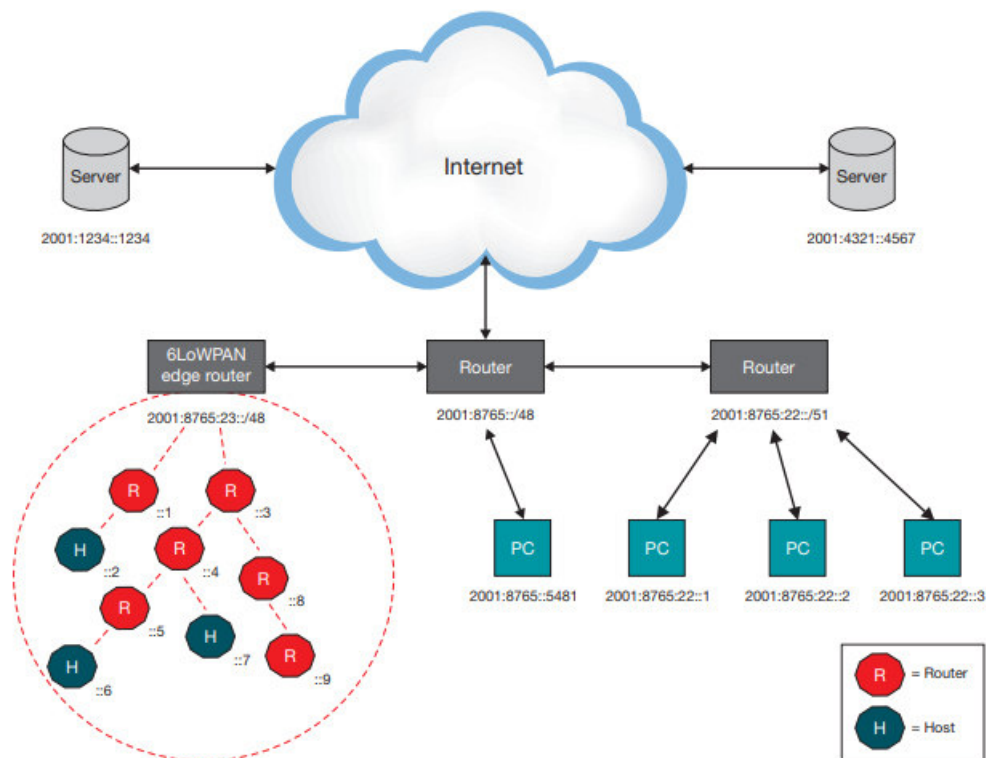


Figura 7: Exemplo de uma rede IPv6 com uma rede em malha 6LoWPAN [46]

Ainda, segundo (Ossan, 2014), a 6LoWPAN não exige um gateway para se conectar à internet, pois introduz uma camada de adaptação entre a camada de IP e as camadas de rede, como pode ser visto na Figura 8.

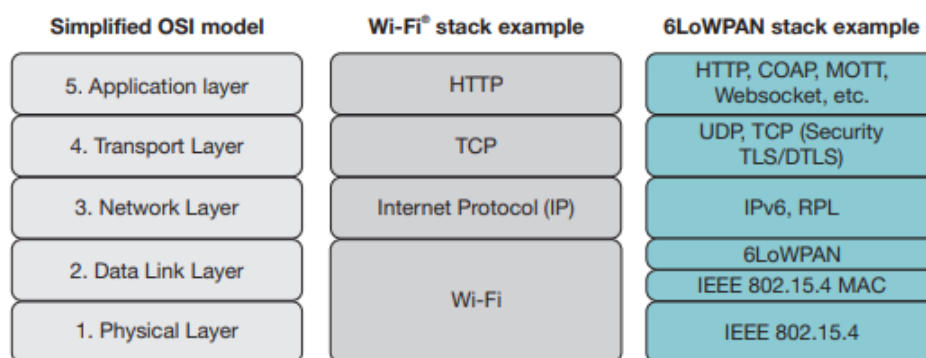


Figura 8: O modelo OSI, um exemplo de pilha Wi-Fi® e a pilha 6LoWPAN [46]

LR-WPAN[45]: abreviação de *Low Rate Wireless Personal Area Network*, uma rede de comunicação sem fio de baixo custo, baixo consumo de energia, e curto alcance que possibilita conectividade em diversas aplicações. As redes LR-WPAN utilizam técnicas de modulação para conseguirem atingir longos alcances.

NB-IoT[23]: é uma tecnologia de comunicação de rede celular de baixa potência projetada especificamente para dispositivos de Internet das Coisas (IoT). A tecnologia opera

em uma faixa de frequência de rádio de espectro estreito, utilizando espectro de frequência licenciado ou não licenciado, e pode coexistir com outras tecnologias de comunicação sem fio em uma rede celular.

As principais características do NB-IoT incluem:

Baixo consumo de energia: A tecnologia é projetada para operar com dispositivos que têm requisitos de energia muito baixos, permitindo que eles operem por longos períodos de tempo com baterias pequenas.

Cobertura de longa distância: O NB-IoT pode alcançar uma cobertura de longa distância, penetrando em estruturas de edifícios e outros obstáculos que normalmente impedem outras tecnologias de comunicação sem fio.

Grande capacidade de conexão: A tecnologia é capaz de suportar um grande número de dispositivos conectados, permitindo que as empresas implantem grandes redes IoT com eficiência.

Baixo custo: O NB-IoT é relativamente barato em comparação com outras tecnologias de comunicação sem fio, tornando-o uma opção atraente para empresas que buscam implementar redes IoT de baixo custo.

Para este trabalho, será escolhido o protocolo LoRa (*Long Range*) como protocolo de comunicação. Esta é uma decisão estratégica que se baseia em suas qualidades distintivas e adaptabilidade para atender às necessidades específicas de nosso contexto. O LoRa é um protocolo amplamente reconhecido por sua capacidade de fornecer comunicações de longo alcance, o que é essencial para dispositivos IoT que precisam cobrir vastas áreas geográficas. Essa característica, combinada com seu baixo consumo de energia, permite que dispositivos IoT operem de maneira eficiente e autônoma, reduzindo a necessidade de manutenção frequente das baterias.

A flexibilidade do LoRa em relação à largura de banda e às taxas de transmissão também são características valiosas, pois permite adaptar a comunicação de acordo com as necessidades específicas de cada projeto, equilibrando o alcance e a taxa de transferência de dados. Além disso, o LoRa é uma tecnologia comprovada em campo, amplamente adotada em diversas aplicações, desde agricultura e monitoramento ambiental até cidades inteligentes e logística. Isso significa aproveitar as melhores práticas e os melhores resultados para utilizações futuras.

Em resumo, a escolha do protocolo LoRa como base para nosso modelo de comunicação IoT é respaldada por sua eficácia comprovada, capacidade de alcance, eficiência energética e flexibilidade. Sendo assim, permite-nos atender de maneira eficaz às necessidades específicas, independentemente da escala geográfica e das aplicações.

3 ENERGY HARVESTING

A história da colheita de energia não é tão recente, ela vem de vários anos. Através dos moinhos de vento e rodas d'água já era possível realizar a coleta de energia. Esses métodos utilizavam meios de conversão para geração de energia elétrica, as quais podem ocorrer através de um dos processos: mecânico para elétrico, solar para elétrico ou térmico para elétrico, por exemplo.

Hoje em dia, os métodos de coleta mudaram um pouco, contudo, os processos para conversão permanecem os mesmos. Exemplo disso, é a forma que a Itaipu Binacional¹ gera energia elétrica. A Itaipu produz eletricidade com base na energia hidráulica, ou seja, pelo aproveitamento da energia potencial gravitacional da água contida em uma represa elevada. Esta energia está presente na natureza e pode ser aproveitada em desníveis acentuados ou quedas d'água.

Outrossim, a demanda por energia elétrica vem aumentando constantemente e com isso novas maneiras de colheita de energia vem surgindo. Além disso, com uma infinidade de sensores e dispositivos aparecendo no mercado, novas necessidades estão aparecendo, dispositivos esses que consomem energia elétrica, causando uma motivação em busca de alternativas de coleta de energia para manter esses dispositivos ligados, principalmente em locais de difícil acesso ou indisponibilidade de energia elétrica de concessionárias.

Energy harvesting pode ser definido como o processo pelo qual a energia é extraída e convertida a partir de um dos processos citados mais acima. Atualmente, a conversão solar para elétrica é a mais utilizada para diversos fins. Para exemplificar, a conversão solar para elétrica, normalmente é utilizada para energizar relógios de pulso, calculadoras (Figura 9), semáforos, entre outros produtos.

Apesar de a energia solar ser a mais comumente utilizada, não quer dizer que ela seja sempre a melhor escolha, isso vai depender muito da aplicabilidade. De acordo com Dhadwal e Rastegar (2017), "a escolha de uma determinada fonte de energia é determi-

¹ Itaipu é uma Usina Binacional, pois foi construída a partir da Ata do Iguaçu, documento assinado em 22 de junho de 1966, por ministros do Brasil e do Paraguai. Além disso, é a maior geradora de energia limpa e renovável do planeta, tendo produzido mais de 2,7 milhões de GWh desde o início de sua operação. Em 2020, a usina de Itaipu produziu 76.382 GWh. Fonte: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes>



Figura 9: Calculadora com célula solar

[8]

nada pelo ambiente, densidade de energia disponível e o nível de energia necessário para alimentar o dispositivo pretendido”.

Como pode ser visto no gráfico da figura 10, é possível perceber o porque da energia solar ser a mais utilizada, visto que possui uma maior densidade energética (quantidade de energia que pode ser extraída), principalmente em áreas externas. Ademais, é possível perceber, que o gráfico informa outros métodos eficientes de colheita de energia, tais como: energia solar em áreas internas, tensão-deformação e vibração.

A crise de energia e o aquecimento global são dois fatores críticos a serem tratados neste século. Utilizar técnicas menos agressivas e energias renováveis como fontes de energia, é necessário para atender as necessidades globais e poluir menos o meio ambiente.

Energy Harvesting é um método promissor usado para superar a desvantagem de baixa vida útil disponível nas tecnologias de baterias tradicionais. Segundo Depexe (2014) “a função primordial de um sistema *Energy Harvesting* é obter, converter, condicionar e gerenciar energia proveniente de uma fonte disponível no meio ambiente, de modo que esta alimente dispositivos de baixo consumo que usualmente seriam alimentados através de pilhas ou baterias.”

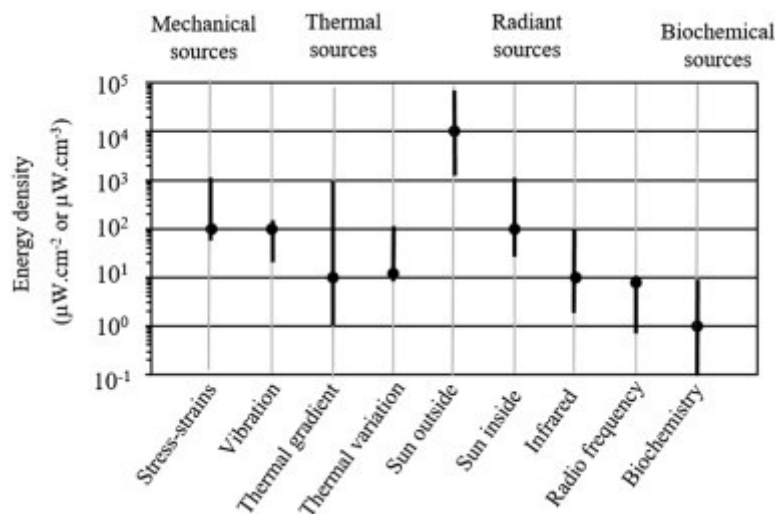


Figura 10: Fontes de energia x densidade

[31]

3.1 Formas de armazenamento de energia

De nada adianta todo o trabalho para conseguir coletar energia se não tiver um meio adequado para "armazenamento" da energia não consumida. Para isso existem alguns sistemas de armazenamento da energia produzida de forma renovável. Esse armazenamento, na realidade, não passa de uma transformação.

Até o momento, a energia elétrica pode ser facilmente gerada, transmitida e transformada. Contudo, não existem um método fácil e barato de armazenamento, para tal, a indicação é de que a energia elétrica deva ser gerada de acordo com a necessidade, e com isso, as energias renováveis necessitarão de apoio de sistemas de armazenamento para evitar o desperdício de energia limpa em períodos sem necessidade.

De acordo com a necessidade, essa energia pode ser mantida em grande escala (GW), em redes e ativos de geração (MW) e a nível de usuário final (kW). Até o momento, estas são as formas de agregar energia e as principais tecnologias que possibilitam transformar e armazenar energia de maneira satisfatória:

Ar comprimido: Utiliza um motor para armazenar o ar do ambiente em altas pressões em reservatórios no subsolo. Por ser um sistema de armazenamento mecânico, pode ser comparado em termos de capacidade com um bombeamento hidráulico.

Armazenamento térmico: Acumula energia em materiais que possibilitam a retenção e liberação de forma controlada através de métodos que incluem desde a refrigeração congelante até a exposição de elevadas temperaturas.

Baterias: São compostas por materiais químicos capazes de armazenar a energia e gerar carga elétrica. Existem diversos modelos: íon de lítio, níquel-cádmio ou pilhas de chumbo-ácido. Como vantagens, são capazes de responder rapidamente (milissegundos), além de facilidade de uso. Já como desvantagens, seus componentes químicos, muitas

vezes são tóxicos e prejudiciais ao meio ambiente.

Bombeamento hidrelétrico: Essa é a melhor maneira atualmente de armazenamento em grande escala, capaz de gerar grandes quantidades de energia limpa com tempos de resposta rápidos.

Supercapacitores: Também conhecido como supercondensador é capaz de armazenar grandes quantidades de energia elétrica na forma de eletrostática, livre de reações químicas possui capacitância elevada quando comparado com capacitores comuns. Além disso, possuem como principais características poder de armazenamento de energia de 10 a 100 vezes por unidade de volume ou massa do que capacitores eletrolíticos comuns e podem ser carregados e descarregados rapidamente (segundos), além de possuírem maior tolerância quanto ao ciclo de carga e descarga comparado a baterias recarregáveis, aumentando sua vida útil. [30]. São ótimos para uso em locais com picos de potência ou de falta de energia (breves).

Pilhas de combustível de hidrogênio: Composta por materiais químicos, contudo, diferenciam-se das baterias pelo fato do hidrogênio prover permanentemente a pilha, desde o exterior, possibilitando seu uso constante.

Volantes de inércia (Flywheel): Sistema de armazenamento mecânico que possui um disco metálico que quando recebe um torque começa a girar e então tenta parar o volante com o torque resistente, conservando a energia elétrica em forma de cinética.

Neste estudo, será adotada a tecnologia de armazenamento de energia, englobando tanto as baterias de lítio quanto os supercapacitores, como parte do estudo de caso para a análise de soluções de armazenamento de energia. As baterias de lítio e os supercapacitores são amplamente reconhecidos por seu significativo potencial eletroquímico, possibilitando o acúmulo de consideráveis quantidades de energia. Além disso, essas tecnologias ostentam vantagens notáveis, tais como sua leveza e alta eficiência.

Em virtude do notável potencial energético e das características favoráveis das baterias de lítio e dos supercapacitores, essas tecnologias encontram aplicação difundida em uma ampla gama de setores, desde dispositivos eletrônicos portáteis até veículos elétricos. A capacidade dessas tecnologias para armazenar energia e a eficácia com que a liberam fazem delas opções atraentes para a alimentação de dispositivos usados na agricultura, incluindo sensores e sistemas de monitoramento.

No entanto, é de suma importância, ao avaliar a viabilidade das baterias de lítio e dos supercapacitores como meios de armazenamento de energia para a agricultura inteligente (*smart farming*), levar em consideração fatores essenciais, tais como a vida útil dessas tecnologias, os custos envolvidos, a reciclabilidade e as questões de segurança. A integração das baterias de lítio e dos supercapacitores neste estudo de caso possibilitará uma compreensão mais profunda das vantagens e limitações dessas tecnologias, gerando insights valiosos para o desenvolvimento de soluções eficazes e sustentáveis no contexto agrícola.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram consultados artigos científicos disponíveis nas principais plataformas, como: IEEE, Elsevier e MDPI, acerca de conceitos como: comunicação LoRa, ultra *low power*, *energy harvesting*, *smart farming*, entre outros.

4.1 Revisão bibliográfica

Abdelrahman e Gelenbe[1] (2016) discute uma abordagem nova para modelagem de um nó sensor sem fio que colhe energia, considerando flutuações na quantidade de energia extraída do ambiente, perda de energia devido a vazamentos da bateria, e o custo de energia para o processamento de dados e comunicação. A abordagem proposta utiliza o movimento browniano¹ para representar a evolução temporal da distribuição do nível da bateria do nó, em vez da estrutura teórica de filas comum usada na literatura. O artigo apresenta medidas de desempenho interessantes e soluções estacionárias do sistema, além de discutir possíveis direções para reduzir o número de parâmetros e estados do modelo sem comprometer a precisão. O trabalho é relevante para o desenvolvimento da Internet das Coisas e a necessidade de operar dispositivos sem fio em ambientes desafiadores sem muita intervenção humana. O objetivo é fornecer uma estrutura matemática detalhada para otimizar o desempenho desses sistemas.

Dispositivos IoT alimentados por bateria são limitados por sua capacidade finita e limitada. Garg[29] (2017) identifica uma solução promissora para este problema: a captação de energia "just-in-time". Essa abordagem permite que os dispositivos coletem energia quando necessário e a armazenem para uso futuro.

No estudo de Lee e Ke[39] (2018), é apresentado um sistema de malha LoRa em uma

¹O movimento browniano[38] é um fenômeno onde partículas pequenas suspensas em um líquido se movem em caminhos estocásticos. Isso ocorre porque as moléculas do líquido se movem de maneira assimétrica, o que afeta o movimento das partículas suspensas. Esse fenômeno foi estudado por cientistas como Einstein, Perrin, Langevin, Sutherland e Smoluchowski, e é muito importante em diversas áreas, incluindo a saúde, pois pode ser usado para diagnósticos não invasivos e mapeamento de evoluções como metástases. A descoberta do movimento browniano é atribuída a Robert Brown, um botânico escocês. O estudo do movimento browniano é realizado através de abordagens descritivas, qualitativas, exploratórias e bibliográficas, e pode contribuir para avanços em muitas áreas da ciência.

área de 800m x 600m no campus universitário, com 19 dispositivos LoRa em topologia de rede em malha e um gateway para coletar os dados em intervalos de 1 minuto. O desempenho da rede de malha LoRa foi comparado com a topologia estrela e foi mostrado que a rede de malha obteve uma taxa de entrega de pacotes de 88,49%, enquanto a topologia de estrela atingiu apenas 58,7% com as mesmas configurações. Por fim, foi proposta uma solução para aumentar a eficácia da comunicação LoRa em ambientes urbanos, considerando ser útil para aplicações IoT em larga escala. Além disso, o artigo é um dos primeiros a explorar detalhadamente a implementação de redes de malha LoRa e avaliar seu desempenho em experimentos reais.

Yue et al. [61] (2019) abordam a utilização de supercapacitores como solução para o armazenamento de energia em dispositivos IoT alimentados por energia solar. Embora a baixa capacidade de armazenamento dos supercapacitores não seja um problema para aplicações com baixo consumo de energia, a perda de energia no processo de redistribuição de carga é uma preocupação. Um novo método baseado em carga para estimar o armazenamento de supercapacitores em aplicações IoT com entrada sub-mW² é proposto. Esse método permite uma estimativa mais simples e direta do armazenamento de energia em supercapacitores, sem a necessidade de obter parâmetros do modelo de supercapacitores e do estado de carga inicial. Também apresenta uma análise de tempo constante e testes experimentais que demonstram a eficácia do novo método. Além disso, o mostra que o uso exclusivo de supercapacitores pode permitir que dispositivos IoT sejam alimentados sem a necessidade de substituição de baterias, o que pode ter um impacto significativo no futuro do desenvolvimento de dispositivos IoT.

Wang et al. [58] (2019) apresenta a redução do consumo de energia em microcontroladores e sistemas de sensores, bem como a utilização de métodos alternativos de fornecimento de energia, como a energia de colheita. Foi apresentado um dispositivo IoT LoRa que utiliza um gerador termoelétrico (TEG) como fonte de energia. Além disso, descreve o projeto do sistema de gestão de energia, a unidade de armazenamento de energia utilizando supercapacitor e o algoritmo de baixo consumo de energia do dispositivo IoT. Foram apresentados resultados de geração de energia do TEG e consumo de energia do dispositivo IoT em diferentes modos de operação. Também apresenta um modelo de simulação para otimizar o tamanho do TEG, seleção do supercapacitor e os ciclos de operação do dispositivo IoT. No geral, propõe uma solução viável para a alimentação de dispositivos IoT utilizando TEGs e supercapacitores, sem a necessidade de baterias.

Já Sharma [54] et al. (2019) descreve como as redes de sensores sem fio (*Wireless Sensor Networks* - WSNs) podem ser utilizadas na Internet das Coisas (IoT) em várias aplicações. É proposta uma solução inovadora para o problema de limitação de energia em WSNs, através da utilização da energia solar ambiente para carregar as baterias dos

²Menor que um miliwatt em inglês. Neste contexto, refere-se a aplicações de energia solar fotovoltaica em que a potência gerada é menor que um miliwatt.

nós. O trabalho enfoca em maximizar a vida útil da rede WSN utilizando a técnica de colheita de energia solar. Os resultados das simulações mostram que a vida útil da rede e a taxa de transferência aumentam significativamente com o uso de SEH-WSNs (*Solar Energy Harvesting - Wireless Sensor Networks*).

Benkhelifa, Qin e McCann[5] (2019), investigam a transmissão de uplink em redes de baixo consumo e longo alcance (LPWAN), onde os sensores são alimentados por energia colhida do ambiente. Especificamente, o estudo se concentra em redes LoRa, que utilizam *energy harvesting* para transmitir os dados para um gateway por meio de diferentes códigos de espalhamento. O trabalho propõe a otimização da taxa de transferência, através do ajuste do fator de espalhamento (SF), tempo de energia colhida e potência de transmissão. O estudo inclui o desenvolvimento de dois tipos de algoritmos que visam atribuir SFs justos ou propositalmente 'injustos' para os rádios LoRa. O artigo apresenta novas descobertas, incluindo o fato de que a alocação "injusta" de SFs pode maximizar a taxa mínima e que a interferência de colisão do fator de espalhamento (co-SF) é a principal limitação no desempenho da taxa de transferência, em vez da escassez de energia.

Em Gaikwad et al.[28] (2020) é apresentada uma proposta de otimização de energia para um nó sensor IoT alimentado por energia solar, com o objetivo de realizar o envio de dados para a nuvem. Para isso, foi utilizado um microcontrolador Wemos D1 Mini para registro e envio das informações para a nuvem e otimização de consumo de energia. O sistema funciona inteiramente com uma bateria Li-ion recarregável de 4000mAh que é carregada por meio de uma placa gerenciadora de carga modelo TP 4056, assim como o sensor BME280, capaz de medir umidade e temperatura, para captura de dados. A recarga da bateria é feita através de um mini painel solar, tornando o sistema totalmente autônomo. O trabalho propõe uma solução para otimizar o consumo de energia demonstrando ser possível utilizar a energia solar como fonte de energia alternativa para alimentar o sistema.

Philip e Singh[48] (2020) tratam de sistemas de monitoramento em tempo real, como monitoramento ambiental e agricultura inteligente, que utilizam redes de sensores sem fio (WSN) compostas por nós e gateways. Para superar o desafio da vida útil das baterias que alimentam os sensores são utilizadas técnicas de colheita de energia. No entanto, relatam que estudos mostram que a energia colhida muitas vezes não é suficiente para suprir as necessidades energéticas dos sistemas em WSN. Nesse contexto, o estudo propõe a utilização da tecnologia LoRa, que consome menos energia em comparação a outras tecnologias, para minimizar a discrepância entre a energia colhida e consumida em sistemas baseados em LoRa.

Para Vatti[57] et al. (2020) a agricultura inteligente é uma tendência que cresce cada vez mais em conjunto com a eletrônica e as tecnologias de comunicação que são usadas para melhorar a qualidade e a quantidade de produtos derivados da agricultura, mas que para isso, são necessários dispositivos para transformar a agricultura em inteligente e que esses dispositivos necessitam de fornecimento contínuo de energia e que a energia solar

se torna a melhor alternativa à eletricidade convencional nas áreas rurais da Índia.

Em Sanislav [52] et al. (2021), são apresentados dois exemplos de técnicas de colheita de energia em estudos de caso com o objetivo de mostrar como a tecnologia de colheita de energia pode ser uma solução ambientalmente amigável para prolongar a vida útil dos sensores sem fio usados em redes IoT, substituindo ou complementando o uso de baterias convencionais. Além disso, relatam sobre como a colheita de energia oferece vantagens econômicas e práticas, tais como a otimização do uso de energia e a redução de custos de manutenção da rede. Ainda discute desafios futuros que devem ser abordados para permitir a implantação em larga escala de soluções de colheita de energia para ambientes IoT.

4.2 Trabalhos relacionados

Existem diversos trabalhos que exploram os conceitos de *energy harvesting* e *smart farming* de formas independentes. Contudo, não foram encontrados muitos trabalhos que utilizassem o conceito de *energy harvesting* em *smart farming* ou aplicados a agricultura, apenas.

Um dos trabalhos encontrados que aplica o conceito de colheita de energia em fazendas inteligentes é o: *The PLATINO Experience: A LoRa-based Network of Energy-Harvesting Devices for Smart Farming* o qual foi desenvolvido um protótipo de um dispositivo para coletar energia e que foi projetado especificamente para funcionar em algumas aplicações agrícolas inteligentes. O dispositivo é equipado com diversos sensores para verificar as condições ambientais e monitoramento energético e um módulo de comunicação LoRa para transmitir os dados a uma longa distância. Além disso, utiliza painéis solares para a captura de energia além de utilizar bateria recarregável, com capacidade de 2.000 mAh e uma tensão de funcionamento de 3,7V e a saída varia entre 4,2V (quando totalmente carregado) para 3,3V (quando totalmente descarregado). O painel solar fotovoltaico fornece uma corrente nominal de 340 mA com uma tensão de saída de 6,5V.

Outro trabalho é o *Solar energy harvesting for smart farming using nanomaterial and machine learning*, o qual é aplicado na agricultura da Índia. O trabalho explora a questão da eletricidade ser um dos principais elementos na agricultura inteligente, além de frisar que tanto a qualidade quanto o custo dos produtos na agricultura são determinados pela qualidade de energia gerada. Ainda aborda a questão da Índia ser rica em agricultura mas que muitas áreas rurais não possuem eletricidade suficiente para essa atividade. O trabalho utiliza nanomateriais para uma melhor eficiência de conversão de energia solar, afirmam ser melhor que a conversão atual que é entre 16 e 18%. Alguns dos nanomateriais utilizados foram: grafeno e o SiNH (*silicon nanhole*).

Os autores alegam ter usado o grafeno por ser um material com propriedades superca-

pacitivas, capaz de armazenar eletricidade. Além disso, o óxido de grafeno é considerado um supercapacitor e pode ser usado por muito tempo armazenando energia solar. Por fim, informam que o grafeno pode aumentar a capacidade de colheita solar em 40% quando comparado com células solares de silício.

Outro trabalho analisado é o *Wireless technologies for smart agricultural monitoring using internet of things devices with energy harvesting capabilities*, o qual compara o uso de três dispositivos sem fio para monitoramento agrícola: IEEE 802.11 g (WiFi 2,4 GHz), IEEE 802.15.4 (Zigbee) e *Long Range Wireless Area Network* (LoRaWAN). Esse trabalho apresentou uma relação entre o consumo x eficiência na transmissão dos dados, mostrando que com três dispositivos que realizam basicamente as mesmas tarefas, é possível atingir o objetivo geral, contudo, com a escolha certa e possível ganhar com otimização e consumo.

Por fim, o trabalho *LoRaFarM: a LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture*, foi aplicado de forma real em uma fazenda na Itália e utilizou um módulo simples para coleta de informações, já no vinhedo, utiliza sensores para verificar temperatura e umidade do solo, nesses locais, o autor alega que a internet pode não ser eficiente e por isso alerta sobre a possibilidade de usos de redes como SigFox³, NB-IoT ou rede celular, que tem valores monetários à parte. Além disso, para recepção dos dados foram utilizados uma Raspberry Pi⁴ e um concentrador iC880A-SPI, o qual possibilidade receber e transmitir dados em uma rede LoRaWAN e que operou na frequência de 868 MHz. Os dados tiveram uma taxa de sucesso média de 79,14% de transmissão a uma distância média de 90,5 metros do gateway. Alguns dados dos trabalhos estão disponíveis na tabela ^[3]

Como pode ser visto na tabela, 75% dos trabalhos analisados utilizam LoRaWan como tecnologia de comunicação e todos os trabalhos utilizam energia solar como forma de energia alternativa para gerar energia elétrica. Já como armazenamento de energia, todos os trabalhos utilizam baterias, apenas variando suas composição químicas.

4.3 Técnicas ultra-low power

Utilizar sensores e microcontroladores nos mais variados projetos são de grande interesse por suas variadas aplicações práticas, contudo, o grande problema encontrado geralmente é por conta da energia que esses projetos necessitam.

Os sensores podem ser adicionados nos locais mais distintos e remotos, por isso, ter energia disponível nem sempre é uma realidade. Em muitas vezes eles são alimentados com pilhas ou baterias convencionais, as quais possuem baixa vida útil. A necessidade de tentar reduzir o consumo dos sensores e utilizar fontes alternativas tem aumentado gradativamente.

³ A Sigfox é uma operadora de rede global francesa fundada em 2010 que constrói redes sem fio para conectar objetos de baixa energia, como medidores de eletricidade e relógios inteligentes. (Sigfox)

⁴ Raspberry Pi é um computador de placa única que pode ser conectado a um monitor, mouse e teclado.

Tabela 3: Comparativo entre os trabalhos

Trabalho	Tecnologias de Comunicação	Método de Cap-tura de Energia	Formas de Ar-mazenamento de Energia
The PLATINO Experience: A LoRa-based Network of Energy-Harvesting Devices for Smart Farming	LoRaWan	Energia Solar	Bateria de lítio recarregável com capacidade de 2.000 mAh
Solar energy harvesting for smart farming using nanomaterial and machine learning	-	Energia Solar	Bateria de Gra-feno
Wireless technologies for smart agricultural monitoring using internet of things devices with energy harvesting capabilities	WiFi 2.4Ghz, ZigBee, Lo-RaWan	Energia Solar	Bateria de Li-Po
LoRaFarM: a LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture	LoRaWan	Energia solar	Bateria de Li-Po

Atualmente, muitos estudos estão focados em: ”o conceito de sistema autônomo de energia. Isto é, um sistema eletrônico projetado para operar o maior tempo possível, proporcionando, elaborando, armazenando e transmitindo informações sem estar conectado a uma rede elétrica”(MELO e SILVA, 2014).

A aplicabilidade desse conceito vem sendo cada vez mais utilizada, principalmente na alimentação de sensores e dispositivos instalados em locais remotos. Além de possuir uma capacidade energética suficiente para alimentar diversos sensores em uma longa duração de tempo, esse método é ecologicamente correto, visto que utiliza energia limpa e renovável.

Alguns sensores já carregam consigo o nome e características de ultra-low power, como é o caso do *DRV5032 Ultra-Low-Power Digital-Switch Hall Effect Sensor*. Em outros casos, é necessário realizar alterações na forma de funcionamento para conseguir o resultado esperado.

Nos gráficos abaixo é possível ver a diferença de consumo entre o sensor de efeito hall modelo DRV5023 (comum)[11] x DRV5032 (ultra-low-power)[12]. Os gráficos foram extraídos dos *datasheets* originais e suas características foram preservadas, inclusive suas unidades de medida, sendo que a do sensor DRV5032 se encontra em microampère (μA) e a do sensor DRV5023 se encontra em miliampère (mA).

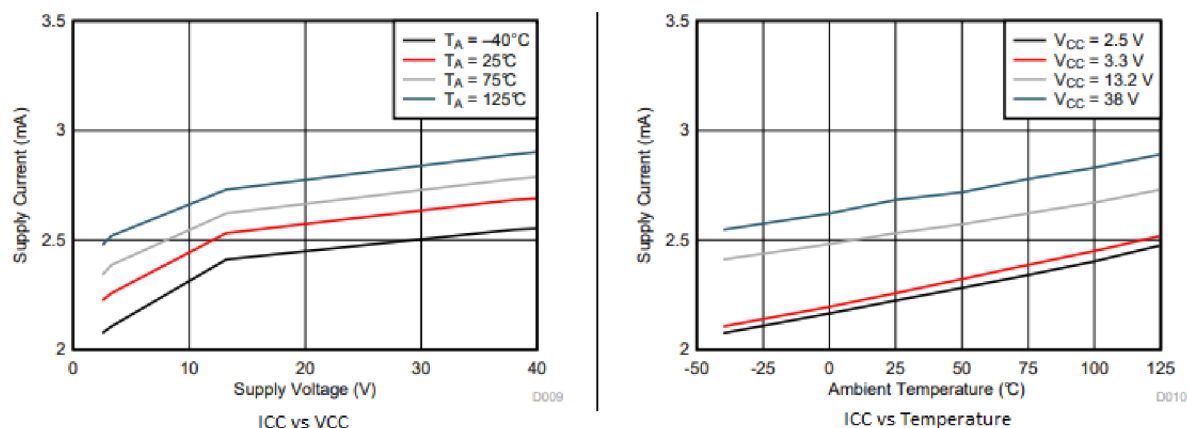


Figura 11: Características DRV5023

[35]

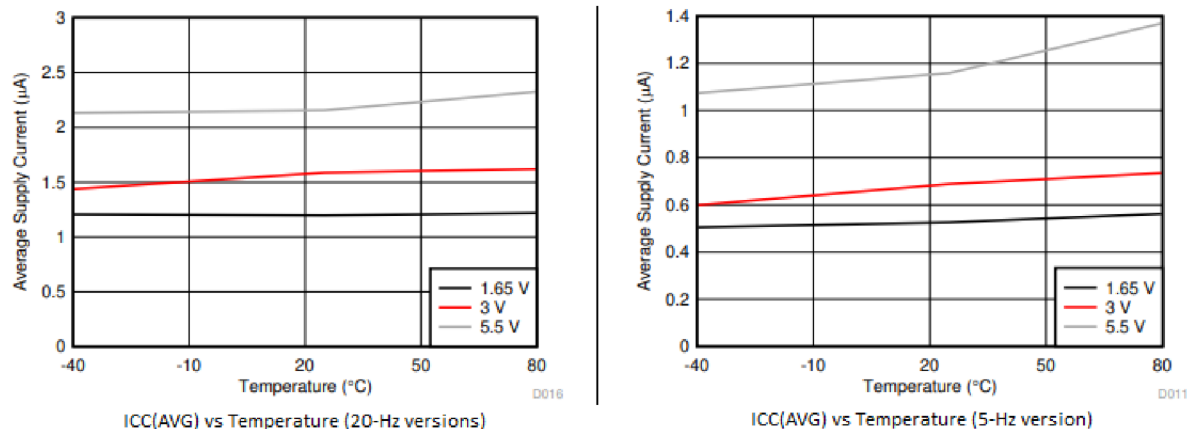


Figura 12: Características DRV5032

[36]

Um exemplo de consumo ULP no DRV5032 é quando a densidade do fluxo magnético excede o limite do ponto de operação, o dispositivo fornece uma baixa tensão e mantém a saída de tensão baixa até que a densidade do fluxo diminua, abaixo do limite do ponto de liberação, só nesse momento ele emite uma tensão de saída alta. Ainda que o comparativo seja referente a sensores, técnicas *ultra-low-power* estão ligadas tanto ao *hardware* quanto ao *software*.

Pequenos componentes vem sendo lançados com recursos característicos de economia de energia, as quais se aplicam a circuitos complexos que utilizam técnicas como redução

de frequência de operação e redução de tensão de operação, por exemplo. Por outro lado, em alguns casos é necessário controlar esses recursos via programação em microcontroladores, os quais enviam tensão para os sensores de tempos em tempos, ou alimentam com a quantidade mínima necessária para operação.

5 CONTEXTUALIZAÇÃO E EVOLUÇÃO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO

O propósito deste trabalho é desenvolver um modelo de estimativa de consumo para aplicações em fazendas inteligentes com colheita de energia para o *hardware* do diagrama ilustrado na Figura 13, com o objetivo de auxiliar no planejamento e dimensionamento de sistemas eletrônicos. O modelo será baseado em técnicas de análise de consumo de energia e levará em consideração características específicas do *hardware* do diagrama, tais como: a frequência de operação, o número de componentes, e o tipo de alimentação elétrica utilizado. Através do uso desse modelo, será possível prever com maior precisão o consumo de energia de um sistema eletrônico, permitindo que sejam projetados sistemas mais eficientes e com maior autonomia de funcionamento.

Além disso, a combinação do painel solar, dispositivo de armazenamento de carga, microcontrolador, radiotransmissor e sensor de umidade de solo torna o nodo IoT um dispositivo altamente personalizável e adaptável para diferentes aplicações. A energia gerada pelo painel solar é armazenada na bateria, permitindo que o dispositivo funcione de forma autônoma e sem necessidade de fontes de energia externas. O microcontrolador, por sua vez, pode ser programado para realizar diversas funções, desde a coleta de dados até o controle de outros dispositivos.

O uso de tecnologias de comunicação sem fio, como o rádio LoRa, permite que o nodo IoT se comunique com outros dispositivos em uma rede LoRaWAN ou rede ponto-a-ponto, o que amplia suas possibilidades de aplicação. Em uma fazenda, por exemplo, vários nodos IoT podem ser utilizados para monitorar o solo e o clima em diferentes partes da propriedade, permitindo que os agricultores tenham um controle mais preciso sobre as condições da plantação e tomem decisões mais informadas sobre o uso de recursos.

Em resumo, o nodo IoT que utiliza energia solar é uma solução eficiente e sustentável para monitoramento de solo e outras aplicações. Com sua capacidade de armazenamento de energia e comunicação sem fio, o dispositivo pode ser personalizado e adaptado para diferentes necessidades, tornando-se uma ferramenta valiosa para aplicações em áreas remotas ou rurais. A combinação de tecnologias como o painel solar, bateria ou supercapacitor, microcontrolador, rádio LoRa e sensor de umidade de solo oferecem um grande

potencial para o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficientes em várias áreas.

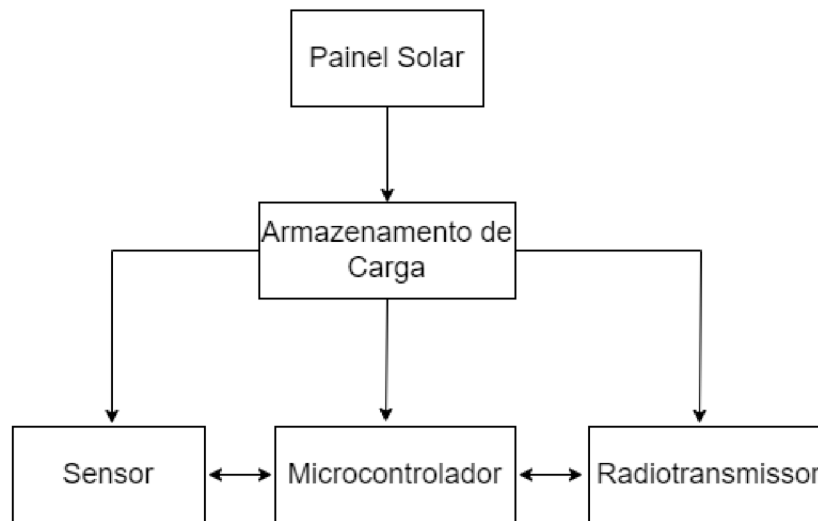


Figura 13: Diagrama do sistema proposto (Fonte: Autor)

Logo, LoRa é uma tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance que tem sido amplamente adotada em diversas aplicações IoT devido às suas vantagens, tais como alta capacidade de inserção de sinal, baixo consumo de energia, longo alcance de transmissão, e baixo custo de implementação (Devalal, Shilpa e Karthikeyan[19], 2018). Comparada a outras tecnologias, como Sigfox e *Bluetooth Low Energy* (BLE), LoRa apresenta uma maior distância de comunicação e maior capacidade de inserção de sinal, tornando-a uma opção mais adequada para aplicações em que a comunicação precisa ocorrer em grandes distâncias ou em locais com alta interferência de sinal (Ikpehai et al. [34], 2019).

No contexto de *smart farming*, onde os sensores estão frequentemente localizados em áreas remotas e de difícil acesso, as tecnologias de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia são essenciais. Nesse sentido, a escolha do LoRa como tecnologia de comunicação para o modelo desenvolvido neste trabalho se justifica pela sua capacidade de oferecer uma solução de comunicação sem fio de longo alcance e baixa potência.

Além disso, a tecnologia LoRa possui uma arquitetura de rede mais flexível em relação a outras tecnologias LPWAN, como Sigfox, NB-IoT e LTE-M. Isso permite uma maior customização e adaptação do sistema de comunicação às necessidades específicas da aplicação, o que é particularmente útil para aplicações de *Smart Farming*, onde a topologia da rede e a área de cobertura podem variar significativamente (Adelantado et al. [3], 2017).

5.1 Metodologia

A metodologia utilizada neste projeto deu-se em envolver a criação de um modelo de estimativa de consumo de energia para um nodo IoT alimentado por energia solar. O

modelo é baseado em dados adquiridos da bibliografia, assim como *datasheet* dos componentes.

A primeira etapa consistiu na pesquisa bibliográfica, com o objetivo de coletar informações sobre os componentes eletrônicos que serão utilizados no nodo IoT, incluindo o painel solar, controlador de carga, bateria, microcontrolador, módulo de comunicação sem fio LoRa e sensor de umidade de solo. Foram selecionados componentes com base em sua especificação de consumo de energia e eficiência energética.

Em seguida, foram levantados dados a partir dos *datasheets* dos componentes eletrônicos selecionados, com o objetivo de identificar o consumo de energia dos componentes em diferentes condições de operação. Com base nos dados obtidos na pesquisa bibliográfica e nos *datasheets* dos componentes, foi possível desenvolver um modelo de estimativa de consumo de energia, conforme mencionado anteriormente. O modelo de estimativa de consumo permite que seja feita uma previsão do consumo de energia do sistema em diferentes cenários de operação, o que será útil na otimização do gerenciamento de energia e na seleção adequada de componentes eletrônicos.

Por fim, foram realizadas simulações para avaliar a eficácia do modelo de estimativa de consumo de energia. Também foram criados cenários de operação do sistema com comparação entre os valores medidos e os valores previstos pelo modelo. Os resultados obtidos foram analisados e descritos mais abaixo, a fim de demonstrar a aplicação do modelo desenvolvido.

1 - Modelagem do sistema microprocessado

A modelagem isolada de cada *hardware* envolvido no sistema microprocessado permite uma análise mais detalhada do consumo de energia de cada componente individualmente. Essa abordagem permite uma otimização mais precisa e eficiente do sistema, já que é possível identificar os componentes que mais consomem energia e buscar alternativas mais econômicas.

No final, os resultados das modelagens isoladas de cada *hardware* foram integrados em um modelo completo do sistema microprocessado. Isso possibilitou uma análise mais abrangente e realista do consumo de energia do sistema como um todo, permitindo uma otimização global do sistema.

1.1 - Modelagem consumo do radiotransmissor baseado em LoRA

Esta etapa é crucial para o desenvolvimento de sistemas IoT que utilizam esta tecnologia. Inicialmente, foi utilizado um site de código aberto[6] para calcular o *airtime* de cada mensagem transmitida, já que este valor varia de acordo com o *spreading factor* utilizado. O *airtime* é o tempo que a mensagem leva para ser transmitida, e é calculado com base em diversos parâmetros, como a taxa de transmissão de dados e o tamanho da

mensagem

Posteriormente, baseado no código fonte do site e na equação completa para calcular o *airtime*, foi encontrada a equação da reta para determinar o *airtime* para diversos *spreading factors*, o que permitiu automatizar o cálculo do *airtime* de forma mais rápida. Esta equação leva em conta o número de símbolos transmitidos em cada pacote, o que é diretamente relacionado ao spreading factor utilizado. Com este dado em mãos, foi possível estimar de forma mais precisa o consumo de energia em mAh de cada transmissão.

É importante ressaltar que o consumo de energia durante as transmissões LoRa é um fator crucial a ser considerado no desenvolvimento de sistemas IoT. O microcontrolador precisa se manter em funcionamento durante as transmissões, o que pode levar a um consumo de energia significativo caso o sistema não seja otimizado. Por isso, é essencial realizar uma estimativa precisa do consumo de energia para que se possa dimensionar adequadamente as baterias ou supercapacitores que alimentam o sistema.

O modelo do sistema de consumo de radiotransmissões baseado em LoRa é especialmente relevante em projetos que têm como objetivo a economia de energia. Com esta ferramenta, é possível identificar os pontos críticos de consumo de energia do sistema e buscar soluções para reduzir o consumo em momentos que não há necessidade de transmissão de dados. Além disso, o modelo permite fazer uma análise mais precisa do consumo de energia do sistema como um todo, o que pode ser útil em projetos que envolvem a integração de diversos sensores e dispositivos.

Ainda, é importante destacar que o modelo do sistema de consumo de radiotransmissões baseado em LoRa é uma ferramenta em constante evolução. Com o avanço da tecnologia e o surgimento de novos componentes e dispositivos, é necessário atualizar constantemente as equações e algoritmos utilizados para estimar o consumo de energia. Ainda assim, esta ferramenta é essencial para o desenvolvimento de sistemas IoT eficientes e sustentáveis.

Outro ponto de relevância é que no Brasil é adotada a norma australiana (AU915MHz) para comunicações LoRa, que estabelece um tempo máximo de propagação para mensagens de até 400ms. Isso significa que, na faixa AU915MHz, não é viável o uso dos fatores de espalhamento SF11 e SF12, uma vez que essas configurações excedem o limite de 400ms para a transmissão de apenas 1 byte de dados. O *spreading factor* está diretamente ligado a distância de transmissão, distâncias maiores, precisam de SF maiores. Entretanto, como dito anteriormente, com o aumento do SF aumenta também o tempo de propagação no ar e o consumo.

1.2 - Modelagem de consumo do microcontrolador

Para modelar o consumo do microcontrolador, é necessário levar em consideração o consumo informado pelo *datasheet*, ou seja, as características do componente eletrônico

em questão, assim como tensão de operação e a corrente elétrica consumida em diferentes modos de operação. Essas informações geralmente são fornecidas pelo fabricante e estão disponíveis no *datasheet* do componente. Ainda será necessário calcular a frequência de uso do sistema, ou seja, quantas vezes o microprocessador irá transmitir informações por hora.

Com essas informações, é possível modelar e estimar o consumo de energia, levando em conta as diferentes etapas de operação do sistema, tais como transmissão de dados, recebimento de dados e modo de espera. É importante ressaltar que o consumo de energia pode variar significativamente de acordo com as condições de operação, como temperatura ambiente e tensão de alimentação.

A modelagem com base no consumo e na frequência de uso pode ser utilizada para otimizar o gerenciamento de energia, permitindo que sejam tomadas decisões que maximizem a eficiência energética do sistema, como a escolha adequada de baterias e a programação de tarefas em horários de menor consumo de energia. Para atingir este objetivo, serão realizados cálculos com base no consumo de transmissão do microcontrolador assim como na inicialização do mesmo.

1.3 - Modelagem de consumo do sensor

A modelagem de consumo do sensor é feita com base na corrente fornecida no *datasheet* e no tempo de leitura. O *datasheet* normalmente informa a corrente máxima que o sensor pode consumir durante seu funcionamento. Para modelar o consumo, pode-se utilizar essa informação e multiplicar pela duração da leitura, que é o tempo que o sensor fica ligado e consumindo corrente.

No entanto, é importante levar em consideração que o tempo de leitura de um sensor pode ser muito curto e, em alguns casos, menor do que 1 (um) segundo. Nesses casos, é comum utilizar o valor de 1 (um) segundo como tempo de leitura, uma vez que um valor menor do que isso seria quase insignificante em termos de consumo de energia. Assim, a modelagem do consumo do sensor consideraria a corrente informada no *datasheet* multiplicada pelo tempo de leitura de 1 (um) segundo.

É importante ressaltar que a corrente fornecida no *datasheet* pode variar dependendo das condições de operação do sensor, como a temperatura ambiente e a tensão de alimentação. Portanto, é importante levar em consideração esses fatores ao realizar a modelagem de consumo de um sensor.

Além disso, é possível que um mesmo sensor tenha diferentes modos de operação, consumindo diferentes quantidades de energia em cada um deles. Nesse caso, é importante considerar qual modo será utilizado em cada situação e ajustar a modelagem de consumo de acordo com o modo de operação escolhido.

2 - Estimar elementos de armazenamento de carga

A estimativa dos elementos de armazenamento de carga é um processo fundamental para o desenvolvimento de sistemas eletrônicos eficientes. Nesse contexto, é importante estudar diferentes tipos de elementos de armazenamento de energia, como baterias, capacitores, supercapacitores e células de combustível. Cada tipo apresenta características específicas, tais como a capacidade de carga, a durabilidade, a velocidade de carregamento e o tempo de descarga, que devem ser observadas para determinar qual tipo é mais adequado para cada aplicação.

Um dos principais fatores a serem considerados na estimativa dos elementos de armazenamento de carga é a capacidade de carga. Esse parâmetro se refere à quantidade de energia que o elemento é capaz de armazenar e é essencial para garantir que o sistema funcione corretamente. Além disso, a durabilidade é outro aspecto importante a ser avaliado, pois os elementos de armazenamento de carga precisam ser capazes de suportar um grande número de ciclos de carga e descarga sem apresentar falhas. A velocidade de carregamento e o tempo de descarga também são fatores críticos, especialmente em sistemas que precisam de uma recarga rápida e/ou que possam fornecer energia durante um longo período de tempo.

3 - Estimar a colheita de energia de um painel solar

Para estimar a colheita de energia de um painel solar, é necessário levar em consideração diversos fatores, tais como a intensidade da luz solar, a inclinação e orientação do painel, a eficiência do sistema de conversão de energia, entre outros. Como mencionado anteriormente, é possível utilizar equações para calcular a energia produzida pelo painel em função da irradiância solar e da área do painel. Além disso, é importante levar em conta o efeito de sombreamento no painel, pois isso pode afetar significativamente a sua capacidade de geração de energia.

Outro ponto relevante é a escolha do tipo de painel solar, uma vez que existem diferentes tecnologias disponíveis, cada uma com suas particularidades em relação à eficiência e à capacidade de geração de energia. Painéis monocristalinos, por exemplo, são conhecidos por apresentarem maior eficiência em condições de baixa luminosidade, enquanto painéis policristalinos tendem a ter um melhor desempenho em ambientes com alta luminosidade. Ainda, é importante considerar o tamanho do painel e a sua capacidade de produzir energia em relação ao consumo energético do sistema que ele alimenta.

Por fim, é válido destacar a importância da monitoração contínua da produção de energia pelo painel solar. Com o uso de sensores e dispositivos de comunicação, é possível coletar dados em tempo real sobre a geração de energia, permitindo ajustes e otimizações no sistema para garantir um melhor desempenho e uma maior eficiência.

energética. A partir da análise desses dados, é possível também estimar a colheita de energia de um painel solar em diferentes condições climáticas e de operação, contribuindo para uma melhor gestão e aproveitamento da energia solar.

4 - Desenvolvimento de *software* que implementa o modelo

O desenvolvimento de um *software* que implementa o modelo de estimativa de consumo de energia é crucial para permitir que obtenha-se resultados precisos e relevantes sobre o consumo de energia do sistema microprocessado. O *software* deve ser capaz de receber parâmetros de entrada para então apresentar o modelo de estimativa de consumo de energia para o sistema e fornecer resultados claros e compreensíveis. É importante que os resultados sejam apresentados de forma que seja possível avaliar o consumo de energia em diferentes cenários e compreender como as alterações nos parâmetros de entrada afetam o consumo de energia do sistema.

Além disso, o *software* foi projetado para possibilitar ajustes nos parâmetros de entrada conforme necessário. Isso permite a execução de simulações adicionais, contribuindo para a obtenção de resultados mais precisos.

5 - Agregar variantes de componentes no modelo desenvolvido para aumentar a abrangência do mesmo

Através dessa possibilidade, é possível a consideração de diferentes opções de *hardware*, além de proporcionar maior flexibilidade e adaptabilidade ao modelo. Por exemplo, diferentes tipos de baterias/supercapacitores podem ser incluídos, considerando suas especificações e características, como capacidade de armazenamento, tempo de vida útil e tempo de recarga.

Outra possibilidade seria considerar diferentes tipos de sensores e dispositivos eletrônicos que poderiam ser utilizados em conjunto com o sistema de energia renovável. Para isso, é necessário alguns ajustes no modelo desenvolvido, mas que pode ser devidamente ajustado em trabalhos futuros. Com isso, será possível avaliar o impacto desses dispositivos no consumo de energia e estimar a quantidade de energia necessária para seu funcionamento. Além disso, diferentes configurações de dispositivos poderiam ser testadas para determinar a melhor combinação para um determinado cenário.

Também seria possível incluir diferentes fontes de energia renovável no modelo, como turbinas eólicas ou geradores de energia hidrelétrica, além do painel solar já considerado. Isso permitiria que o modelo fosse utilizado em cenários mais amplos e diversos, onde diferentes fontes de energia são utilizadas em conjunto para atender às demandas energéticas do sistema.

Portanto, agregar variantes de componentes no modelo desenvolvido pode torná-lo

mais completo e permitir que ele seja aplicado em diferentes cenários e condições. Isso proporcionaria uma visão mais abrangente e realista da operação de sistemas de energia renovável, contribuindo para a tomada de decisões mais precisas e informadas.

6 RESULTADOS

Foram realizadas leituras de artigos científicos que versam sobre as temáticas abordadas afim de traçar um panorama das pesquisas realizadas acerca das tecnologias que pautam este projeto, com isso, foi possível identificar uma série de desafios enfrentados na implementação de sistemas IoT alimentados por energia solar. Um dos principais desafios é a necessidade de um bom gerenciamento de energia, de forma a garantir que os dispositivos IoT possam operar continuamente. Além disso, é necessário levar em consideração o impacto das condições climáticas na eficiência energética dos painéis solares, bem como a escolha adequada dos componentes eletrônicos utilizados.

A revisão de literatura também permitiu identificar tendências recentes em tecnologias de comunicação sem fio, como a crescente adoção de redes utilizando o protocolo LoRa em aplicações IoT. Essas redes apresentam vantagens significativas em relação a outras tecnologias de comunicação sem fio, como baixo consumo de energia, alcance de longo alcance e capacidade de cobertura em áreas remotas.

Os resultados deste estudo serão apresentados por meio de gráficos gerados a partir do modelo desenvolvido para este trabalho, as fórmulas apresentadas logo a seguir, foram utilizadas para calcular o consumo do sistema como um todo, bem como do microcontrolador, do rádio e dos sensores individualmente. A partir destas equações foi possível chegar ao modelo proposto. Cada gráfico representará um aspecto importante do projeto.

6.1 Modelamento do protocolo de transmissão LoRa

Este trabalho apresenta uma modelagem de consumo de energia de um sistema microprocessado com radiotransmissão baseado em LoRa, utilizando dados do *datasheet* dos componentes e equações para estimar o consumo de energia durante as transmissões. Além disso, os resultados indicam que o uso de *spreading factors* maiores resultam em uma redução significativa no consumo de energia durante as transmissões. A partir dessas informações, temos:

Encontrando a equação das grandezas e o *airtime*:



Airtime calculator for LoRaWAN

AS923 AU915 AU915 DL CN470 EU868 IN865 KR920 US915 US915 DL

AU915-928 uplink

overhead size[Ⓓ] 222 payload size[Ⓓ] share[Ⓓ]

	DR6	DR5	DR4	DR3	DR2	DR1	DR0
data rate	[Ⓘ] DR6 BW ₅₀₀ SF8	DR5 BW ₁₂₅ SF7	DR4 BW ₁₂₅ SF8	DR3 BW ₁₂₅ SF9	DR2 BW ₁₂₅ SF10	DR1 BW ₁₂₅ SF11	DR0 BW ₁₂₅ SF12
airtime	164.0 ms	368.9 ms	655.9 ms max dwell time exceeded	1,168.4 ms max dwell time exceeded	2,132.0 ms max dwell time exceeded	4,673.5 ms max dwell time exceeded	8,364.0 ms max dwell time exceeded
1% max duty cycle	16.4 sec 219 msg /hour	36.9 sec 97 msg /hour	65.6 sec 54 msg /hour	116.8 sec 30 msg /hour	213.2 sec 16 msg /hour	467.4 sec 7 msg /hour	836.4 sec 4 msg /hour
fair access policy	472.2 sec (avg) 7.6 avg /hour 182 /24h msg	1,062.4 sec (avg) 3.4 avg /hour 81 /24h msg	1,888.9 sec (avg) 1.9 avg /hour 45 /24h msg	3,364.9 sec (avg) 1.1 avg /hour 25 /24h msg	6,140.1 sec (avg) 0.6 avg /hour 14 /24h msg	13,459.8 sec (avg) 0.3 avg /hour 6 /24h msg	24,088.4 sec (avg) 0.1 avg /hour 3 /24h msg

Figura 14: Calculadora Online 

Spreading Factor 7

$$y = mx + b \quad (1)$$

onde y é a variável dependente (*airtime* encontrado na calculadora da Figura 14), x é a variável independente (tamanho do pacote em bytes), m é a inclinação da reta e b é o intercepto no eixo y .

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (2)$$

$$m = \frac{(368,9 - 46,3)}{(222 - 1)} \quad (3)$$

onde 368,9 é o *airtime* encontrado na calculadora online da Figura 14 para o pacote de 222 bytes e 46,3 o *airtime* para o pacote de 1 byte.

$$m = \frac{322,6}{221} \quad (4)$$

$$m = 1,458 \quad (5)$$

Agora, com a inclinação m , podemos usar um dos pontos dados para encontrar o intercepto " b " (*airtime*). Usando o ponto (1, 46,3):

$$y = mx + b \quad (6)$$

$$46,3 = 1,458 \times 1 + b \quad (7)$$

$$b = 44,842 \quad (8)$$

portanto a equação das grandezas é:

$$y = 1,458x + 44,842 \quad (9)$$

Usando essa equação, podemos prever o valor da grandeza dependente para qualquer valor da grandeza independente.

Spreading Factor 8

$$y = mx + b \quad (10)$$

$$m = \frac{(399,9 - 82,4)}{(125 - 1)} \quad (11)$$

$$m = \frac{317,5}{124} \quad (12)$$

$$m = 2,560 \quad (13)$$

$$y = mx + b \quad (14)$$

$$82,4 = 2,560 \times 1 + b \quad (15)$$

$$b = 79,84 \quad (16)$$

portanto a equação das grandezas é:

$$y = 2,560x + 79,84 \quad (17)$$

Spreading Factor 9

$$y = mx + b \quad (18)$$

$$m = \frac{(390,1 - 164,9)}{(53 - 1)} \quad (19)$$

$$m = \frac{225,2}{52} \quad (20)$$

$$m = 4,331 \quad (21)$$

$$y = mx + b \quad (22)$$

$$164,9 = 4,331 \times 1 + b \quad (23)$$

$$b = 160,57 \quad (24)$$

portanto a equação das grandezas é:

$$y = 4,331x + 160,57 \quad (25)$$

Spreading Factor 10

$$y = mx + b \quad (26)$$

$$m = \frac{(370,7 - 288,8)}{(11 - 1)} \quad (27)$$

$$m = \frac{81,9}{10} \quad (28)$$

$$m = 8,19 \quad (29)$$

$$y = mx + b \quad (30)$$

$$288,8 = 8,19 \times 1 + b \quad (31)$$

$$b = 280,61 \quad (32)$$

portanto a equação das grandezas é:

$$y = 8,19x + 280,61 \quad (33)$$

Através das equações das grandezas encontradas nos passos anteriores, é possível chegar no *airtime* a partir da equação:

Exemplo para o SF7:

$$E_{airtime} = 1,458 \times (\text{Tamanho do pacote em bytes}) + 44,842 \quad (34)$$

onde *E_{airtime}* é a equação do *airtime*

Supondo que o tamanho do pacote seja de 5 bytes, o *airtime* neste caso seria de 52,132ms.

Já para chegar na equação de consumo, é necessário informar a tensão de operação do rádio, a corrente de transmissão fornecida pelo *datasheet* do fabricante, o *airtime* e a frequência de transmissão por hora.

$$Consumo = 5 \times 0,12 \times \left(\frac{\text{Airtime}}{3600} \right) \times \text{Frequência de Transmissão por Hora} \quad (35)$$

onde 5 é a tensão do rádio fornecida em Volts; 0,12 é a corrente de transmissão dada pelo *datasheet* em Ampere; *airtime* é o tempo em milissegundos que o rádio está transmitindo dados. Ele é dividido por 3600 para convertê-lo para hora.

6.2 Modelamento Sensor

Outro resultado interessante encontrado foi a modelagem de consumo de um sensor. Utilizando a corrente fornecida no *datasheet* e considerando um tempo de leitura de valor constante, foi possível estimar o consumo de energia durante as operações do sensor. Os resultados ainda indicam que o tempo de leitura é um fator importante no consumo de energia do sensor, e que a escolha do tempo de leitura deve levar em consideração o conflito de escolha entre precisão e consumo de energia.

Portanto, para modelagem do sensor utilizado nesta análise, temos a seguinte equação:

$$ES = 35 \times \left(\frac{1}{3600} \right) \times \text{Frequência de leitura por hora} \quad (36)$$

onde ES é a equação do sensor; 35 é a corrente de funcionamento do sensor em miliampere, valor retirado do *datasheet*, em seguida é convertido para mAh; Frequência de leitura por hora é quantas vezes o sensor efetuará a leitura no intervalo de uma hora.

6.3 Modelamento Microcontrolador

Os resultados iniciais destacam que a frequência de transmissão é um ator crítico para o consumo de energia, uma vez que o microcontrolador necessita permanecer ativo durante esses processos. Essa consideração torna-se essencial para compreender e otimizar o desempenho energético.

No caso em questão, o modelo do sistema microprocessado foi baseado no consumo em mA encontrado em um fórum [13], já que não foi possível encontrar essa informação em documentos oficiais. Isso ocorre porque muitas vezes os fabricantes só especificam o consumo máximo permitido, deixando a tarefa de medir o consumo real para o desenvolvedor. Dessa forma, a consulta a fóruns especializados é uma prática comum para estimar o consumo de energia de sistemas microprocessados.

Ademais, é importante destacar que a frequência de transmissão por hora é inserida manualmente e pode variar de acordo com as necessidades do sistema. Essa frequência é um dado importante para a estimativa do consumo de energia, já que a transmissão de dados é uma das atividades que mais consome energia em um sistema IoT. Portanto, ao inserir a frequência de transmissão, é possível avaliar como essa atividade afeta o consumo de energia do sistema e, assim, otimizá-lo para um melhor desempenho.

Assim, o uso de dados obtidos em fóruns especializados combinado com a inserção manual da frequência de transmissão por hora permite modelar de forma eficiente o consumo de energia de um sistema microprocessado. Essa abordagem possibilita identificar gargalos no consumo de energia, otimizar o desempenho do sistema e escolher os elementos de carga mais adequados, como baterias ou supercapacitores, para garantir a alimentação adequada do sistema.

$$CT = \frac{18 + 26}{2} \times \frac{\text{Airtime}}{3600} \times \text{Frequência de Transmissão por hora} \quad (37)$$

onde CT é o Consumo de Transmissão em miliampere hora (mAh); 18mA e 26mA foram as correntes encontradas em um Arduino Pro Mini executando o programa "blynk", o qual tende a piscar o led do *hardware* a cada segundo operando a uma tensão de 5V; *Airtime*: é a variável de transmissão do radio; Frequência de Transmissão é a quantidade de vezes

que o sistema precisará ler e transmitir informações.

$$CS = \frac{18 + 26}{2} \times \frac{1}{3600} \times \text{Frequência de Transmissão por hora} \quad (38)$$

onde CS é o consumo do arduino na inicialização (mAh); O valor 1 é uma constante, e será utilizado visto que o valor real encontrado em simulação foi menor e tornaria o resultado final insignificante.

6.4 Análise dos resultados

Os parâmetros especificados para a geração do gráfico são essenciais para configurar e compreender o funcionamento do modelo. Abaixo será detalhado cada um deles:

Interval (Intervalo): Este parâmetro define a série temporal de registro dos dados em milissegundos.

Battery (Bateria): O parâmetro "battery" representa a capacidade máxima do *hardware* de armazenamento de energia, geralmente medida em miliamperes (mA). Essa capacidade define quanto de energia pode ser armazenado pelo sistema. Em outras palavras, é a quantidade máxima de energia que o sistema pode acumular.

Wakeup Time (Tempo de Despertar): O "wakeup_time" é o tempo, em minutos, que o dispositivo ou nodo de monitoramento vai esperar antes de acordar para realizar a leitura do sensor e efetuar a transmissão de dados. Isso ajuda a economizar energia, pois o dispositivo não precisa estar ativo o tempo todo.

Min Capture (Captura Mínima) e Max Capture (Captura Máxima): Esses parâmetros estão relacionados à quantidade de energia capturada pela placa solar durante diferentes intervalos de geração de energia. O "min_capture" representa a quantidade mínima de energia que a placa solar capturará durante os intervalos de menor geração, enquanto o "max_capture" representa a quantidade máxima de energia capturada durante os intervalos de maior geração.

Esses parâmetros são fundamentais para personalizar o modelo, permitindo o controle da frequência de registro de dados, a capacidade de armazenamento, o consumo de energia do dispositivo e a geração média dos painéis em diferentes horários do dia. Eles desempenham um papel importante na otimização da eficiência e com isso poder chegar mais próximo ao mundo real.

Além disso, os gráficos foram gerados com as seguintes informações:

Geração: A geração refere-se a geração de energia propriamente dito, como um aspecto fundamental para alimentar os dispositivos. No contexto deste modelo específico, a energia é "colhida" através de painéis solares, representando uma fonte ideal e constante para efeito de exemplo. Estes dados fixos proporcionam um panorama estável para análise.

Acumulado: O acumulador, por sua vez, refere-se ao somatório do consumo do microcontrolador, sensor e radiotransmissor, descontando a energia gerada. Essa medida indica o saldo entre a energia consumida pelos dispositivos e a produzida pelos painéis solares. Em outras palavras, o acumulador representa a quantidade líquida de energia consumida pelo nó.

Bateria: É importante ressaltar que, embora as representações gráficas analisadas mais à diante possam sugerir estabilidade na carga da bateria, na prática, essa não é uma realidade. O dispositivo de armazenamento de energia, responsável por armazenar a energia excedente para momentos de baixa geração, não é estática. Ela perde carga gradualmente à medida que o acumulado aumenta, refletindo as inevitáveis perdas e eficiência finita dos sistemas de armazenamento de energia.

6.4.1 Análise 1

Na Figura 15, é possível observar um fenômeno notável que ocorre por volta das 10 horas da manhã. Nesse ponto específico, a curva que representa a geração de energia, ultrapassa consideravelmente o limite máximo da capacidade da bateria. Esse evento marca um momento crucial no sistema de energia, pois a geração de energia excede a capacidade do dispositivo de armazenamento.

Essa sobreposição entre a geração de energia e a capacidade de armazenamento é um indicativo de eficiência energética, onde o excedente de energia gerado pode ser diretamente consumido pelo *hardware*. Nesse caso, o consumo acumulado pelo microcontrolador, rádio e sensor, que normalmente seria suprido pelo dispositivo de armazenamento de energia, é atendido pela abundante geração de energia, resultando na anulação do consumo da bateria.

Entretanto, à medida que o dia avança e a geração de energia a partir da fonte renovável diminui gradualmente, uma mudança significativa ocorre após as 18 horas. Quando a produção de energia cessa completamente, o acumulado volta a consumir da bateria. Esse é o momento em que o sistema transita de volta para a energia armazenada na bateria para alimentar o nodo, garantindo um suprimento contínuo de energia, mesmo quando não há geração renovável disponível.

Os parâmetros usados para geração do gráfico da Figura 15 foram: *"interval"*: 60, *"battery"*: 60, *"wakeup_time"*: 15, *"min_capture"*: 15, *"max_capture"*: 30

6.4.2 Análise 2

A análise da Figura 16 revela um desafio crítico no sistema, que possui uma bateria de 100mAh, com um intervalo de análise de 30ms e um ciclo para "acordar" a cada 5 minutos para leitura e telemetria. Os dados indicam que o sistema enfrenta um sério desequilíbrio entre a demanda de energia e a capacidade de fornecimento. A corrente mínima de captura do painel solar, de 10mAh, é frequentemente insuficiente para atender

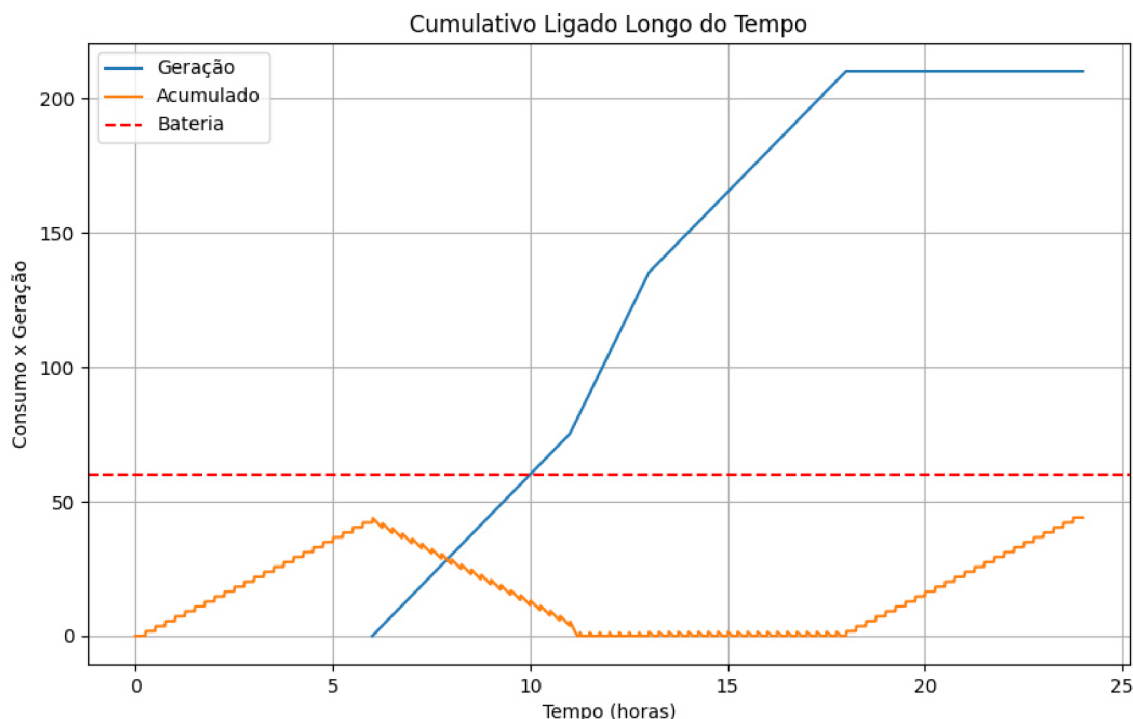


Figura 15: Análise 1 (Fonte: Autor)

à demanda do sistema, resultando em um consumo de energia maior do que o painel pode gerar e a bateria pode sustentar. Esse desequilíbrio leva ao esgotamento da carga da bateria em pouco mais de 4 horas de uso.

Além disso, a análise do gráfico mostra que, quando a geração de energia pelo painel solar começa, o sistema tenta acionar. No entanto, devido à falta de energia suficiente, ele não consegue completar o acionamento com sucesso. Essa tentativa frustrada de operação durante a geração solar destaca uma ineficiência crítica no gerenciamento de energia do sistema, o que pode resultar em interrupções e problemas operacionais.

Os parâmetros usados para geração do gráfico da Figura 16 foram: "interval": 30, "battery": 100, "wakeup_time": 5, "min_capture": 10, "max_capture": 15

6.4.3 Análise 3

A análise minuciosa da Figura 17 apresentando uma bateria de também 100mAh, com um intervalo de análise consistente de igualmente 30 milissegundos e um ciclo para acionamento entre leitura e telemetria a cada 5 minutos revela uma situação que ecoa o cenário anteriormente descrito. O sistema continua enfrentando um desafio crítico, caracterizado por uma demanda de energia que ultrapassa tanto a capacidade de geração do painel solar quanto a capacidade de armazenamento da bateria. Esse desequilíbrio leva ao esgotamento da carga em pouco mais de 4 horas de uso.

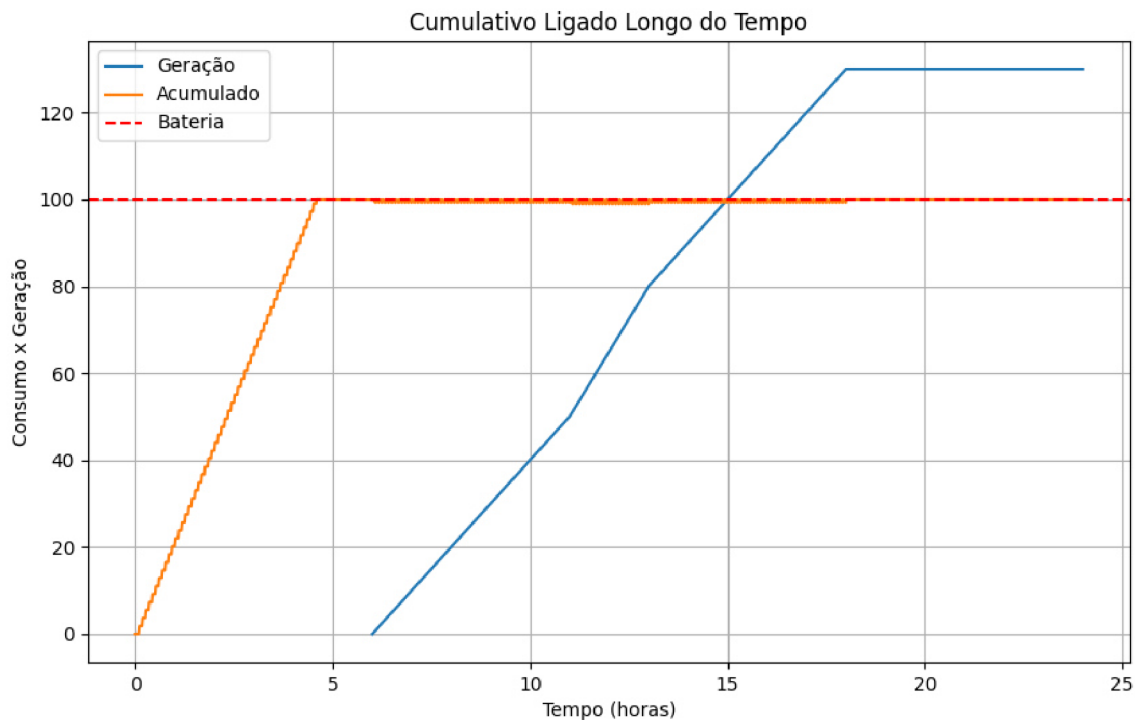


Figura 16: Análise 2 (Fonte: Autor)

Entretanto, ao analisarmos o gráfico [18](#), somos capazes de obter uma visão mais detalhada do funcionamento do sistema. Nele, é possível observar a tentativa de ativação do sistema durante o período de geração solar, embora a carga disponível seja insuficiente para garantir o sucesso da operação. Por volta das 8 horas, após o início da geração de energia pelos painéis solares, ocorre um ponto crucial de virada, onde as curvas de consumo acumulado e energia gerada se cruzam. Esse momento sinaliza que o sistema volta a operar de forma estável. Por volta das 11 horas, quando a geração solar atinge seu pico, a carga da bateria está completamente recarregada. Nesse momento, o sistema consome apenas a energia gerada, até que, após o término da geração de energia, o sistema retoma o consumo da bateria, levando-a novamente ao esgotamento.

Os parâmetros usados para geração do gráfico da Figura [17](#) foram:

"interval": 30, "battery": 100, "wakeup_time": 5, "min_capture": 30, "max_capture": 60

6.4.4 Análise 4

Uma análise detalhada da Figura [19](#), que descreve o desempenho de uma bateria de 60mAh, com uma taxa de amostragem a cada 1 milissegundo e um ciclo de "despertar" a cada 15 minutos para fins de leitura e telemetria, revela informações significativas sobre a durabilidade do sistema. Além disso, é importante notar que a captura de energia varia

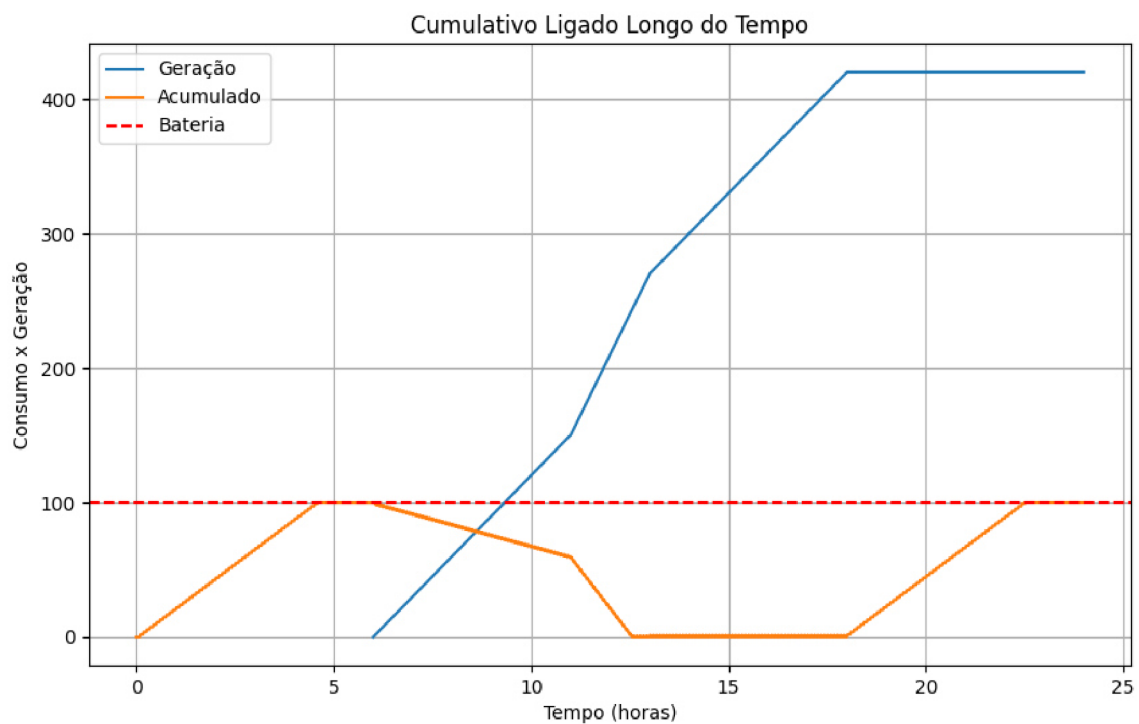


Figura 17: Análise 3 (Fonte: Autor)

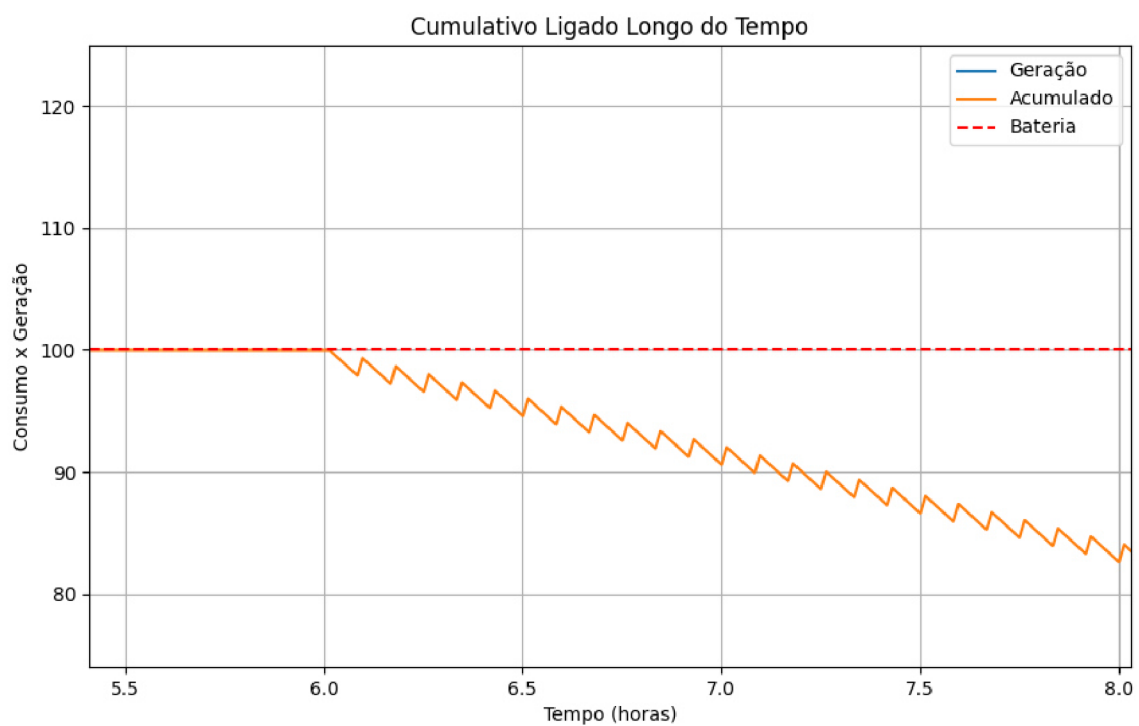


Figura 18: Análise 3 - Aprofundado (Fonte: Autor)

entre 5mAh e 10mAh ao longo do tempo.

De acordo com os dados apresentados, a bateria mantém o sistema operante por um período considerável, aproximadamente até as 17 horas de funcionamento contínuo. No entanto, após esse ponto, o consumo de energia se equipara à capacidade de armazenamento da bateria, levando ao esgotamento da carga. Como resultado, o sistema não consegue mais manter sua operação.

Os parâmetros usados para geração do gráfico da Figura 19 foram:

"interval": 1, "battery": 60, "wakeup_time": 15, "min_capture": 5, "max_capture":

10

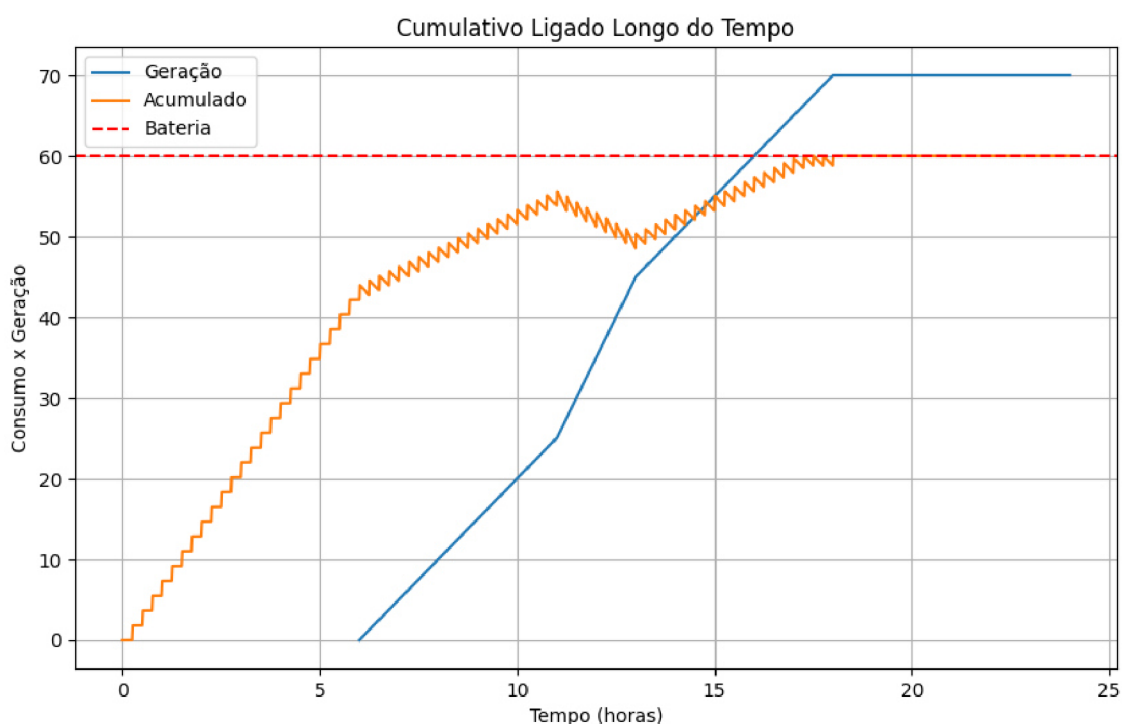


Figura 19: Análise 4 (Fonte: Autor)

6.4.5 Análise 5

Da mesma forma, na Figura 20, que retrata um cenário similar ao analisado anteriormente, destaca-se uma diferença crucial: a taxa de amostragem é realizada a cada 100 milissegundos.

Os dados revelam que a bateria consegue manter o sistema em operação por um período substancial, aproximadamente até as 17 horas de funcionamento contínuo. No entanto, a partir desse ponto, o consumo de energia se iguala à capacidade de armazenamento da bateria, resultando no esgotamento da carga. Consequentemente, o sistema não é mais capaz de manter sua funcionalidade.

Os parâmetros usados para geração do gráfico da Figura 20 foram:

"interval": 100, "battery": 60, "wakeup_time": 15, "min_capture": 5, "max_capture":

10

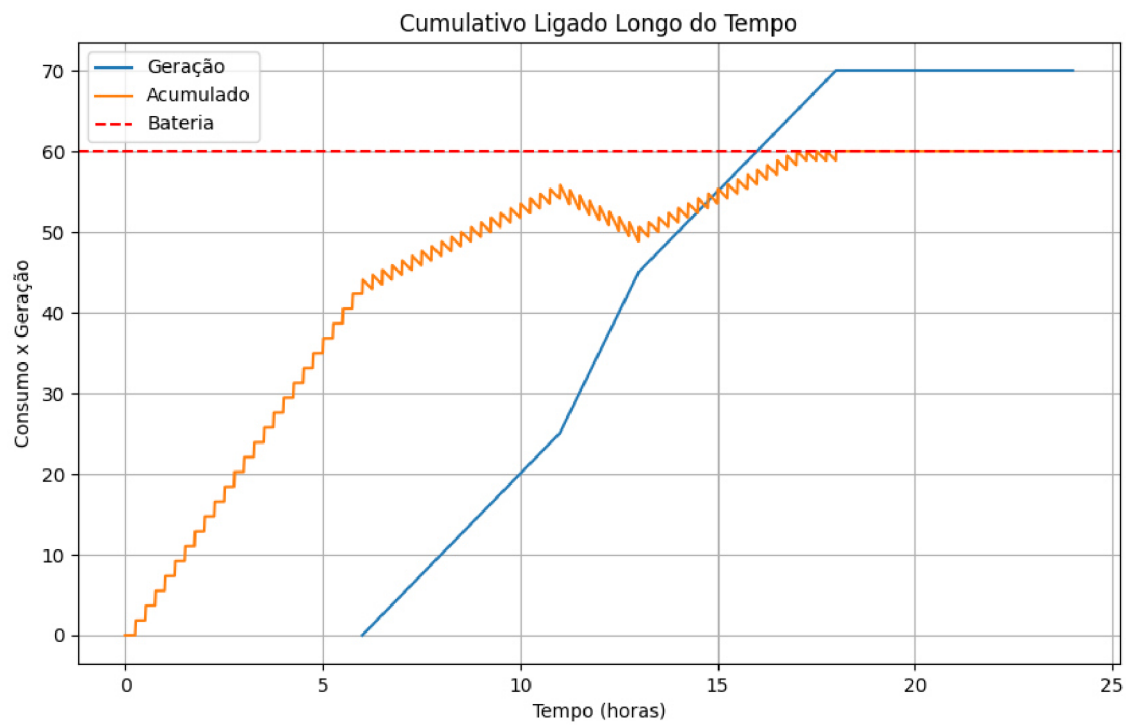


Figura 20: Análise 5 (Fonte: Autor)

Os resultados mostram que a escolha dos elementos de carga, como baterias e supercapacitores, é crítica para o desempenho do sistema. A modelagem de consumo permite estimar a autonomia do sistema em diferentes cenários, levando em consideração a capacidade dos elementos de carga escolhidos. Os resultados ainda são capazes de indicar que a escolha dos elementos de carga deve ser feita com cuidado, considerando as especificações dos componentes e as necessidades do sistema em termos de autonomia.

Por fim, os resultados deste trabalho mostram a importância da modelagem de consumo de energia para a otimização de sistemas microprocessados. A utilização de modelos de consumo pode permitir a escolha adequada dos elementos de carga, a definição de estratégias para a redução do consumo de energia e a estimativa da autonomia do sistema em diferentes cenários de operação. A modelagem de consumo pode contribuir para a redução de custos e para o aumento da eficiência energética de sistemas microprocessados, tornando-se uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de sistemas de baixo consumo de energia.

7 CONCLUSÃO

A dissertação proposta aborda a temática de *Energy Harvesting* e *Smart Farming*, buscando oferecer o uso desses conceitos em propriedades rurais que possam torná-los mais inteligentes. O trabalho consistiu em uma pesquisa bibliográfica detalhada sobre esses temas, destacando que embora o conceito de *Energy Harvesting* não seja novo, a evolução de componentes eletrônicos e dispositivos cada vez mais modernos e eficientes abre a possibilidade de utilização de fontes de energia renováveis.

Um dos principais setores que vêm ganhando destaque é o agronegócio, responsável por movimentar a economia e por uma cadeia de produção alimentar que conecta diversos setores. Com o crescimento desse setor, torna-se necessária a modernização do campo, incluindo a coleta de dados para encontrar soluções inteligentes de negócio que facilitem a tomada de decisões.

Para gerenciar esse estilo de negócio, diversas informações e ferramentas são necessárias, incluindo sensores e dispositivos que possam coletar dados e desempenhar suas funções de forma confiável. Nesse contexto, a possibilidade de utilizar energia colhida ao invés de baterias convencionais que possuem prazo de duração limitado torna-se uma opção atrativa.

Neste trabalho, buscou-se o aprofundamento na análise desses conceitos e em como eles podem ser aplicados em propriedades rurais, considerando as particularidades do setor agrícola de cada local de produção. Foram investigadas fontes de energia renováveis que pudessem ser utilizadas em dispositivos eletrônicos utilizados na agricultura, bem como a viabilidade de sistemas de monitoramento e coleta de dados que utilizem essas fontes de energia.

Foi proposto o desenvolvimento de um modelo de estimativa de consumo para aplicações em fazendas inteligentes com colheita de energia. Esse modelo é baseado em um nó específico, que utiliza um microcontrolador Arduino Pro Mini, um radiotransmissor LoRa SX1276 e um sensor de umidade do solo HL-69, todos operando a uma tensão de 5V.

Embora o modelo tenha sido desenvolvido com base em uma análise de 24 horas, ele possui a flexibilidade necessária para ser aplicado em simulações abrangentes, englo-

bando períodos de tempo diferentes daqueles especificamente considerados. Isso significa que, além de avaliar o desempenho ao longo de um dia típico, podemos utilizá-lo para simular cenários em que a duração de um dispositivo de armazenamento de carga é estendida e adaptada para diferentes condições climáticas.

Suponhamos, por exemplo, que desejemos determinar o tempo médio de duração de um dispositivo de armazenamento de carga sob condições adversas, como dias nublados, nos quais a geração de energia solar é limitada. Com a aplicação deste modelo, podemos efetuar simulações que levem em conta esses cenários. Isso nos permite calcular com precisão por quanto tempo o sistema poderá continuar funcionando em tais condições, considerando a capacidade de armazenamento da carga e os padrões de consumo de energia.

Essa versatilidade torna o modelo uma ferramenta valiosa para prever a autonomia de sistemas de energia, independentemente das condições climáticas, e tomar decisões informadas sobre otimização e eficiência energética. Dessa forma, ele se mostra útil não apenas para análises baseadas em 24 horas, mas também para uma ampla variedade de cenários e períodos de tempo, proporcionando *insights* valiosos para a gestão de sistemas de energia sustentáveis e eficazes.

Como perspectivas para pesquisas futuras, há várias áreas que podem ser exploradas para melhorar e expandir o modelo apresentado. Algumas delas incluem:

Incorporação de Novos Sensores: Uma possível extensão do estudo envolve a integração de uma variedade de sensores adicionais, como sensores climáticos mais sofisticados, sensores de qualidade da água, e outros dispositivos que podem fornecer informações valiosas para a agricultura de precisão. Essa expansão do modelo permitiria uma coleta de dados mais abrangente e detalhada.

Análise em Diferentes Horários do Dia: A análise apresentada se baseou em um modelo de 24 horas, mas para uma compreensão mais completa do uso de energia ao longo do tempo, poderiam ser realizadas análises em diferentes horários do dia. Isso é particularmente relevante para considerar flutuações no fornecimento de energia, dependendo da fonte, como a energia solar ao longo do dia.

Geração de Energia Não Contínua: A maioria das fontes de energia renovável é intermitente, como a solar e a eólica. Portanto, futuras pesquisas podem se concentrar em estratégias para lidar com a geração de energia não contínua e armazenamento eficiente. Isso pode incluir o uso de tecnologias de armazenamento de energia avançadas e sistemas de gerenciamento de energia.

Otimização de Sistemas de Coleta de Dados: Para garantir uma coleta de dados eficiente e confiável, é importante explorar estratégias de otimização para os sistemas de monitoramento e coleta de dados. Isso pode incluir algoritmos de roteamento de dados eficazes, aprimoramento da conectividade de rede e estratégias de gerenciamento de energia para dispositivos de coleta de dados.

Adaptação a Diferentes Ambientes Agrícolas: O modelo atual foi desenvolvido com base em um *hardware* específico, mas diferentes ambientes agrícolas podem requerer sistemas diversos. Portanto, uma área promissora de pesquisa envolve a adaptação do modelo a diferentes contextos.

Essas perspectivas de pesquisa oferecem um amplo campo para futuros estudos visando aprimorar a eficiência, a sustentabilidade e a aplicabilidade de sistemas de *Smart Farming* baseados em energia colhida e coleta de dados de alta precisão.

REFERÊNCIAS

- [1] ABDELRAHMAN, O. H.; GELENBE, E. A Diffusion Model for Energy Harvesting Sensor Nodes. In: IEEE 24TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MODELING, ANALYSIS AND SIMULATION OF COMPUTER AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS (MASCOTS), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.154–158.
- [2] ABREU MELO, R. F. d. S. Cíntia Fernanda de. Sistemas de comunicações de ultra-baixo consumo de energia. , [S.l.], p.65, 2014.
- [3] ADELANTADO, F.; VILAJOSANA, X.; TUSET-PEIRO, P.; MARTINEZ, B.; MELIA-SEGUI, J.; WATTEYNE, T. Understanding the Limits of LoRaWAN. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v.55, n.9, p.34–40, 2017.
- [4] ALEXANDER BOTHE JAN BAUER, N. A. RFID-assisted Continuous User Authentication for IoT-based Smart Farming. , [S.l.], 2019.
- [5] BENKHELIFA, F.; QIN, Z.; MCCANN, J. Minimum Throughput Maximization in LoRa Networks Powered by Ambient Energy Harvesting. In: ICC 2019 - 2019 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC), 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.1–7.
- [6] BENTEM, A. van. **Airtime calculator for LoRaWAN.** <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/au915/0>.
- [7] BRUNO CITONI FRANCESCO FIORANELLI, M. A. I. Q. H. A. Internet of Things and LoRaWAN-Enabled Future Smart Farming. , [S.l.], p.14–19, 2019.
- [8] CALCULADORA movida a energia solar. <https://alter220.ru/solnce/kalkulyator-na-solnechnoj-bataree.html>.
- [9] CHALIMOV, A. **IoT in Agriculture: 8 technology use cases for Smart Farming (and challenges to consider).** <https://easternpeak.com/blog/iot-in-agriculture-technology-use-cases-for-smart-farming-and-challenges-to-consider/>.

- [10] CHARANIA, I. Smart farming: Agriculture shift from labor intensive to technology native industry, Internet of Things. , [S.l.], 2020.
- [11] CODELUPPI, G.; CILFONE, A.; DAVOLI, L.; FERRARI, G. LoRaFarM: A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. **Sensors**, [S.l.], v.20, n.7, 2020.
- [12] COMPUTER, E. **Smart Farming**: How IoT-Driven Precision Agriculture Helps Feed the Globe. <https://www.expresscomputer.in/guest-blogs/smart-farming-how-iot-driven-precision-agriculture-helps-feed-the-globe/68180/>.
- [13] COOK, J. S. **Getting started with the Arduino Pro Mini**: tutorial low power applications. <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/getting-started-with-the-arduino-pro-mini>.
- [14] CUOMO, F.; CAMPO, M.; CAPONI, A.; BIANCHI, G.; ROSSINI, G.; PISANI, P. EXPLoRa: Extending the performance of LoRa by suitable spreading factor allocations. In: IEEE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS AND MOBILE COMPUTING, NETWORKING AND COMMUNICATIONS (WIMOB), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.1–8.
- [15] DANIEL CAMPS-MUR ANDRES GARCIA-SAAVEDRA, P. S. A Group-Less and Energy Efficient Communication Scheme Based on Wi-Fi Direct Technology for Emergency Scenes. , [S.l.], p.96 – 104, 2013.
- [16] DANIEL CAMPS-MUR ANDRES GARCIA-SAAVEDRA, P. S. Device-to-device communications with Wi-Fi Direct: overview and experimentation. , [S.l.], 2013.
- [17] DEPEXE, M. D. Concepção de um circuito Energy Harvesting aplicado a redes de sensores sem fio para sistemas de iluminação. , [S.l.], p.116, 2014.
- [18] DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. LoRa Technology - An Overview. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMMUNICATION AND AEROSPACE TECHNOLOGY (ICECA), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.284–290.
- [19] DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. LoRa Technology - An Overview. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMMUNICATION AND AEROSPACE TECHNOLOGY (ICECA), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.284–290.
- [20] DIEISSON PIVOTO PAULO DABDAB WAQUIL, E. T. C. P. S. F. V. F. D. C. G. d. V. M. Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. , [S.l.], p.21–32, 2018.

- [21] ELECTRONICA, O. **Além do Arduino 1: Energia para as coisas da Internet das Coisas.** <https://www.omni-electronica.com.br/post/energia-para-as-coisas-da-internet-das-coisas-al%C3%A9m-do-arduino-1>.
- [22] ELSAYED SAID MOHAMED AA. BELAL, S. K. A.-E. M. A. E.-S. A. G. B. Z. Smart farming for improving agricultural management. , [S.l.], 2021.
- [23] EMBARCADOS. **NB-IoT: Um Guia Prático para a Tecnologia.** <https://embarcados.com.br/nb-iot-um-guia-pratico/>.
- [24] EMERSON ALECRIM, A. M. **O que é NFC? Como funciona a tecnologia em celulares e cartões.** <https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-nfc/>.
- [25] F. JOHN DIAN AMIRHOSSEIN YOUSEFI, S. L. A practical study on Bluetooth Low Energy (BLE) throughput. , [S.l.], 2018.
- [26] FELIX WORTMANN, K. F. Internet of Things. **Bus Inf Syst Eng**, [S.l.], p.221–224, 2015.
- [27] G. R. KANAGACHIDAMBARESAN R. MAHESWAR, V. M. K. R. **Internet of Things in Smart Technologies for Sustainable Urban Development.** [S.l.]: EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. 252p.
- [28] GAIKWAD, V.; JOSHI, P.; MUDALIAR, Y.; NAIK, A.; GUDAL, A.; BHANDARI, S. Optimizing Power Consumption for Solar Powered Rechargeable Lithium Ion (Li-ion) Battery Operated IoT Based Sensor Node Using WeMos D1 Mini. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING SMART COMPUTING AND INFORMATICS (ESCI), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.148–152.
- [29] GARG, N.; GARG, R. Energy harvesting in IoT devices: A survey. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SUSTAINABLE SYSTEMS (ICISS), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.127–131.
- [30] GONZÁLEZ, A.; GOIKOLEA, E.; BARRENA, J. A.; MYSYK, R. Review on supercapacitors: Technologies and materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v.58, p.1189–1206, 2016.
- [31] HARBANS S. DHADWAL, J. R. Energy Harvesting for Low-Power Autonomous Devices and Systems. , [S.l.], 2017.
- [32] HEBLE, S.; KUMAR, A.; PRASAD, K. V. V. D.; SAMIRANA, S.; RAJALAKSHMI, P.; DESAI, U. B. A low power IoT network for smart agriculture. In: IEEE 4TH WORLD FORUM ON INTERNET OF THINGS (WF-IOT), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.609–614.

- [33] IBERDROLA. **Armazenamento de energia:** a chave para um futuro des-carbonizado. <https://www.iberdrola.com/meio-ambiente/armazenamento-eficiente-de-energia>.
- [34] IKPEHAI, A.; ADEBISI, B.; RABIE, K. M.; ANOH, K.; ANDE, R. E.; HAMMOU-DEH, M.; GACANIN, H.; MBANASO, U. M. Low-Power Wide Area Network Technologies for Internet-of-Things: A Comparative Review. **IEEE Internet of Things Journal**, [S.l.], v.6, n.2, p.2225–2240, 2019.
- [35] INSTRUMENTS, T. **DRV5023 Digital-Switch Hall Effect Sensor**. 33p. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5023.pdf>.
- [36] INSTRUMENTS, T. **DRV5032 Ultra-Low-Power Digital-Switch Hall Effect Sensor**. 40p. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5032.pdf>.
- [37] ITAIPU. **Energia Hidráulica**. <https://www.itaipu.gov.br/energia/energia-hidraulica>.
- [38] JULIANNIO PIZZANO AYOUB, M. R. N. d. O. **Desvendando a Engenharia sua Abrangência e Multidisciplinaridade**. 118p.
- [39] LEE, H.-C.; KE, K.-H. Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [S.l.], v.67, n.9, p.2177–2187, 2018.
- [40] LOGPYX. **LoRa:** o que é essa solução para a conectividade das coisas. <https://logpyx.com/blog/lora-solucao-para-conectividade-das-coisas>.
- [41] MAANAK GUPTA MAHMOUD ABDELSALAM, S. K. S. M. Security and Privacy in Smart Farming: Challenges and Opportunities. , [S.l.], p.34564–34584, 2020.
- [42] MALUF, N. **On Moore’s law and Snail’s law**. <https://qnovo.com/moores-law-and-snails-law/>.
- [43] NASEER HUSSIEN SAIF ALSAIDI, I. A. M. M. F. H. A. Smart Shopping System with RFID Technology Based on Internet of Things. , [S.l.], 2020.
- [44] NAÇÕES UNIDAS, O. das. **População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU**. <https://brasil.un.org/pt-br/83427-populacao-mundial-deve-chegar-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu>.
- [45] NS-3. **Low-Rate Wireless Personal Area Network**. <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lr-wpan.html>.
- [46] OLSSON, J. 6LoWPAN demystified. , [S.l.].

- [47] PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, I. de. **Ipea revisa de 13,2% para 15,5% o valor adicionado do setor agropecuário em 2023.** <https://globorural.globo.com/economia/noticia/2023/09/ipea-eleva-estimativa-de-crescimento-da-agropecuaria-para-155-pontos-percentuais-em-2023.ghtml>.
- [48] PHILIP, M. S.; SINGH, P. Review of Energy Harvesting in LoRa based Wireless Sensor Network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTING, COMMUNICATION CONTROL AND NETWORKING (ICACCCN), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.338–341.
- [49] RAMBABU VATTI NAGARJUNA VATTI, K. M. P. L. V. B. K. Solar energy harvesting for smart farming using nanomaterial and machine learning. , [S.l.], 2020.
- [50] RAMESH KUMAR PRIYE RANJAN, M. D. Moore’s Law. **International Journal of Modern Trends in Engineering and Research**, [S.l.], Abril 2016.
- [51] RAMYA, C. M.; SHANMUGARAJ, M.; PRABAKARAN, R. Study on ZigBee technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS COMPUTER TECHNOLOGY, 2011., 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. v.6, p.297–301.
- [52] SANISLAV, T.; MOIS, G. D.; ZEADALLY, S.; FOLEA, S. C. Energy Harvesting Techniques for Internet of Things (IoT). **IEEE Access**, [S.l.], v.9, p.39530–39549, 2021.
- [53] SEBASTIAN SADOWSKI, P. S. Wireless technologies for smart agricultural monitoring using internet of things devices with energy harvesting capabilities. , [S.l.], 2020.
- [54] SHARMA, H.; HAQUE, A.; JAFFERY, Z. A. Maximization of wireless sensor network lifetime using solar energy harvesting for smart agriculture monitoring. **Ad Hoc Networks**, [S.l.], v.94, p.101966, 2019.
- [55] SOLEDAD ESCOLAR FERNANDO RINCON, X. d. T. J. B. F. J. V.-M. J. S. D. V.; LÓPEZ, J. C. The PLATINO Experience: A LoRa-based Network of Energy-Harvesting Devices for Smart Farming. , [S.l.].
- [56] TESLA, N. **Apparatus for transmitting electrical energy.** [S.l.]: U.S. Patent 1119732, 1914.
- [57] VATTI, R.; VATTI, N.; MAHENDER, K.; VATTI, P. L.; KRISHNAVENI, B. Solar energy harvesting for smart farming using nanomaterial and machine learning. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.l.], v.981, n.3, p.032009, dec 2020.

- [58] WANG, W.; CHEN, X.; LIU, Y.; WANG, X.; LIU, Z. Thermo-electric Energy Harvesting Powered IoT System Design and Energy Model Analysis. In: IEEE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ANTI-COUNTERFEITING, SECURITY, AND IDENTIFICATION (ASID), 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.303–308.
- [59] WANT, R. An Introduction to RFID Technology. , [S.l.], p.25 – 33.
- [60] YASSEIN, M. B.; MARDINI, W.; KHALIL, A. Smart homes automation using Z-wave protocol. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING MIS (ICEMIS), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.1–6.
- [61] YUE, X.; KIELY, J.; GIBSON, D.; DRAKAKIS, E. M. Charge-Based Supercapacitor Storage Estimation for Indoor Sub-mW Photovoltaic Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Nodes. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [S.l.], v.67, n.3, p.2411–2421, 2020.