

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DAELN - DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

ADRIANO RICARDO DE ABREU GAMBA
DAVI WEI TOKIKAWA
ERIKA MARIA CAPOTE BOTH

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE DADOS VIA LORA
UTILIZANDO CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2021

ADRIANO RICARDO DE ABREU GAMBA
DAVI WEI TOKIKAWA
ERIKA MARIA CAPOTE BOTH

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE DADOS VIA LORA
UTILIZANDO CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

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

CURITIBA
2021

ADRIANO RICARDO DE ABREU GAMBA

DAVI WEI TOKIKAWA

ERIKA MARIA CAPOTE BOTH

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE DADOS VIA LORA UTILIZANDO CAPTAÇÃO
DE ENERGIA SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Eletrônica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 19/agosto/2021

Guilherme Luiz Moritz

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

João Luiz Rebelatto

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

Guilherme de Santi Peron

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

CURITIBA

2021

Este trabalho é dedicado aos nossos pais, os quais nos proporcionaram a estrutura familiar necessária, garantindo, com muito esforço, a nossa melhor formação.

AGRADECIMENTOS

Aos familiares, que nos incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a nossa ausência durante a dedicação e realização deste trabalho.

Aos amigos, que sempre estiveram ao nosso lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período em que nos dedicamos a este trabalho.

Aos professores, pelas correções e orientações que nos permitiram apresentar um melhor desempenho no processo de formação profissional e acadêmica ao longo do curso.

Ao professor orientador Guilherme Luiz Moritz por nos auxiliar da melhor forma possível durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, essencial em nosso processo de formação acadêmica, por toda a estrutura fornecida, e por propiciar o aprendizado necessário ao longo dos anos de curso.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

"Quando nos deparamos com o revés, precisamos desafiar nossas hipóteses"

Frase atribuída à personagem Moira O'Deorain (Jogo eletrônico "Overwatch", 2017).

RESUMO

GAMBA, Adriano; TOKIKAWA, Davi; BOTH, Erika. Sistema de transmissão de dados via LoRa utilizando captação de energia solar. 2021. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Devido à popularização das aplicações de Internet das Coisas, o gerenciamento de energia tem alcançado cada vez mais relevância principalmente considerando operações de baixa potência com fontes de energia renováveis. Através de uma aplicação de alarme focado em ambientes rurais e remotos, este projeto busca avaliar a viabilidade de um sistema capaz de transmitir dados através da modulação LoRa, cuja alimentação é feita por meio de energia solar e o armazenamento é baseado em supercapacitores ao invés de soluções eletroquímicas. Mediante experimentos que visaram obter as potências médias de consumo e abastecimento do sistema, foi possível estimar uma autonomia máxima de operação de cerca de 13 horas e um período mínimo de sol de aproximadamente 2 horas e 30 minutos para carga total do sistema de armazenamento. Dessa maneira, a aplicação do sistema de alarme remoto se demonstrou minimamente viável, com autonomia suficiente para um período noturno e podendo ser recarregado com poucas horas de sol. A utilização de supercapacitores de melhor qualidade pode proporcionar mais que um dia de autonomia.

Palavras-chave: Colheita de energia. Energia solar. Internet das Coisas. LoRa. Supercapacitores.

ABSTRACT

GAMBA, Adriano; TOKIKAWA, Davi; BOTH, Erika. Data transmission system via LoRa using solar energy capture. 2021. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Due to the popularization of Internet of Things applications, energy management has gained increasing relevance especially considering low power operations with renewable energy sources. Through an alarm application focused on rural and remote environments, this project seeks to assess the feasibility of a system capable of transmitting data through LoRa modulation, whose power is obtained by solar energy and the storage is based on supercapacitors instead of electrochemical solutions. Through experiments that aimed to obtain the average power consumption and the average power supply of the system, it was possible to estimate a maximum operating autonomy of about 13 hours and a minimum period of sunlight of approximately 2 hours and 30 minutes for the total load of the storage system. Thus, the application of the remote alarm system proved to be minimally viable, with sufficient autonomy for a night period and being able to be recharged within a few hours of sunlight. The use of better quality supercapacitors can provide more than a day of autonomy.

Keywords: Energy harvesting. Solar energy. Internet of Things. LoRa. Supercapacitors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de uma célula fotovoltaica de silício	17
Figura 2 – Curva I-V de um painel solar	18
Figura 3 – Relação entre densidade de energia e densidade de potência de sistemas de armazenamento.	19
Figura 4 – Diagrama de blocos funcional do BQ25570.	20
Figura 5 – Pilha de protocolos LoRa em detalhe.	22
Figura 6 – Diagrama simplificado da arquitetura LoRaWAN com The Things Network.	23
Figura 7 – Diagrama geral da arquitetura do sistema.	25
Figura 8 – Diagrama do bloco de gerenciamento de energia.	26
Figura 9 – Conversor CJMCU-2557.	27
Figura 10 – Mini painel fotovoltaico.	28
Figura 11 – Supercapacitor 500F 2,7V.	28
Figura 12 – Kit ESP32 Wifi LoRa 32 (V2).	29
Figura 13 – Comportamento do sistema de acordo com VBAT.	29
Figura 14 – Planilha para design da Texas Instruments.	30
Figura 15 – Quadro Scrum no Notion.	31
Figura 16 – Repositório de SW visualizado pelo Sourcetree.	31
Figura 17 – Arquitetura da rede LoRaWAN.	32
Figura 18 – Diagrama de estados do sistema do nó transmissor.	33
Figura 19 – Interface da aplicação na plataforma de rede LoRaWAN.	36
Figura 20 – Requisições permitidas pelo banco de dados através da interface.	36
Figura 21 – Circuito de condicionamento.	39
Figura 22 – Diagrama representando o funcionamento do <i>firmware</i> do data-logger.	40
Figura 23 – Diagrama temporal de um ciclo de transmissão.	43
Figura 24 – Caixa com a configuração dos testes de carregamento.	44
Figura 25 – Gráfico com valores medidos de tensão do supercapacitor em aberto	47
Figura 26 – Gráfico dos valores medidos de tensão do supercapacitor com o sistema em modo IDLE	49
Figura 27 – Função-exemplo da abstração ao enviar pacotes LoRa.	58
Figura 28 – Configuração dos casos que podem acordar o sistema.	58
Figura 29 – Identificação das razões de wake e montagem do pacote de envio.	59
Figura 30 – Trecho de arquivo de configuração do código do <i>gateway</i>	60
Figura 31 – Filtros adicionais para requisições e estrutura da resposta.	61
Figura 32 – Exemplo de uma resposta tratada pelo <i>script</i> Python.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de materiais	26
Tabela 2 – Lista de materiais para testes	27
Tabela 3 – Casos de teste para transmissão LoRa	42
Tabela 4 – Medições do teste de VBAT_OK	48
Tabela 5 – Consumo energético ao transmitir 100 pacotes	50
Tabela 6 – Estimativa do tempo de operação para o caso real	51
Tabela 7 – Estimativa do tempo de operação para o caso hipotético	52
Tabela 8 – Medição do teste de carregamento do sistema	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Application Programming Interface
ADC	Analog to Digital Converter
BR	Bit Rate
BW	Bandwidth
CI	Circuito Integrado
CR	Coding Rate
DAC	Digital to Analog Converter
FV	Fotovoltaico
GPIO	General Purpose Input/Output
GUI	Graphical User Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
ID	Identificação
IDE	Integrated Development Environment
I/O	Input-Output
IoT	Internet of Things
I-V	Corrente-Tensão
JSON	JavaScript Object Notation
LabSC	Laboratório de Sistemas de Comunicações
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
MAC	Media Access Control
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OLED	Organic Light-Emitting Diode

OV	Over-Voltage
PFM	Pulse Frequency Modulation
PHY	Physical Layer
PV	Photovoltaic
PWM	Pulse-Width Modulation
RAM	Random-Access Memory
RC	Resistor-Capacitor
REST	Representational State Transfer
RF	Rádio-Frequência
ROM	Read-Only Memory
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RTC	Real Time Clock
SF	Spreading Factor
SPI	Serial Peripheral Interface
SPPM	Seguidor do Ponto de Potência Máxima
TTN	The Things Network
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
ULP	Ultra Low Power
UV	Under-Voltage
WSN	Wireless Sensor Network

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	14
1.1 MOTIVAÇÕES	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2 – REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 PAINÉIS SOLARES	17
2.2 SUPERCAPACITOR	19
2.3 BQ25570	20
2.4 LoRa	21
2.4.1 Modulação LoRa	21
2.4.2 LoRaWAN	21
2.4.3 Módulos SX127X	22
2.5 ESP32	22
2.6 The Things Network	23
3 – METODOLOGIA	24
3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA	24
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	25
3.3 CONFIGURAÇÕES E CONDIÇÕES DE TESTE	26
3.4 GERENCIAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO PROJETO	30
3.5 TRANSMISSÃO SEM FIO	32
3.5.1 Desenvolvimento do <i>firmware</i>	32
3.5.1.1 Dispositivo nó	32
3.5.1.2 Dispositivo <i>gateway</i>	35
3.5.2 Servidor de rede LoRaWAN	35
3.5.3 Aplicação de acesso aos dados	37
3.6 GERENCIAMENTO DE ENERGIA	37
3.6.1 Considerações sobre o sistema de gerência de energia	37
3.6.2 Procedimento de medição de dados	38
3.6.2.1 Circuito de Condicionamento do <i>data logger</i>	38
3.6.2.2 <i>Firmware</i> do <i>data logger</i>	39
3.6.3 Procedimento do armazenamento do sistema	39
3.6.4 Procedimento do consumo do sistema	41
3.6.4.1 Consumo do sistema em modo IDLE	41

3.6.4.2	Consumo do sistema transmitindo dados	42
3.6.5	Procedimento do carregamento do sistema	43
4	– ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
4.1	DESEMPENHO DO SISTEMA DE ENERGIA	46
4.1.1	Estimativa da capacitância efetiva	46
4.1.2	Avaliação dos supercapacitores em aberto	47
4.2	ENERGIA ÚTIL DO SISTEMA	48
4.3	CONSUMO ENERGÉTICO	49
4.3.1	Sistema em IDLE	49
4.3.2	Sistema transmitindo	50
4.4	ESTIMATIVA DE AUTONOMIA DO SISTEMA	50
4.5	CAPTAÇÃO DE ENERGIA DO SISTEMA	52
5	– CONCLUSÃO	53
5.1	TRABALHOS FUTUROS	53
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	Referências	55
	Apêndices	57
	APÊNDICE A–Seções do código implementado para o dispositivo nó trans- missor	58
	APÊNDICE B–Seção do código implementado para o dispositivo gateway .	60
	APÊNDICE C–Interface e exemplo de requisição de dados da The Things Network	61

1 INTRODUÇÃO

A implantação de redes de sensores sem fio (RSSF) que podem ser aplicados em ambiente rural é de extrema importância para pequenos e grandes produtores, pois pode contribuir em uma diversa gama de aspectos de seus negócios, como no gerenciamento de recursos e no aumento da produtividade (ALCANTUD; ROSA, 2017).

Os módulos que integram esse sistema, normalmente chamados de nós, são responsáveis por coletar dados e enviá-los para que possam ser analisados pelos produtores. Como eles são instalados em regiões remotas e de difícil acesso, é de extrema importância que tenham um gerenciamento de energia eficiente e que não demandem a troca de baterias por muitos anos (PETRARIU et al., 2021). Além disso, como a rede de sensores pode conter centenas ou até milhares de nós, o custo de manutenção desses nós pode ser elevada se eles não forem eficientes, fora o impacto ambiental associado ao descarte das milhares de baterias ao longo dos anos (MARTINS; RUBIN; LONGHIN, 2018).

O interesse no gerenciamento de energia em sistemas de sensores está cada vez mais evidenciado devido à popularização da Internet das Coisas (IoT) (SANISLAV et al., 2021). Logo, várias técnicas vêm sendo estudadas para propiciar um melhor gerenciamento de energia. Um método eficiente de gerência é a colheita de energia (do inglês *energy harvesting*) feita a partir de fontes de energia renováveis, como térmica, vibração mecânica de sistemas piezoelétricos, solar, acústica, eólica ou produzida a partir de ondas do mar. O sistema de gerenciamento se mantém a maior parte do tempo coletando e armazenando essa energia, e só irá utilizá-la quando for necessário (PETRARIU et al., 2021).

Em vista disso, neste trabalho é proposto um projeto de nó com capacidade de operar sem o uso de baterias e que será ecologicamente melhor em relação às soluções que utilizam armazenamento eletroquímico. Para isso, o nó fará uso dessa ideia de colheita de energia a partir da utilização de um painel solar para coletar energia e um banco de supercapacitores para armazená-la. Além disso, o nó fará a coleta de dados de um sensor e realizará o envio deles utilizando a tecnologia LoRa, bastante apropriada para sistemas de baixo consumo e que necessitam de transmissões de longa distância.

Como o nó não faz uso de baterias, não necessita de manutenção em termos de troca de fonte de energia. Além disso, supercapacitores são melhor preparados para fornecer as correntes demandadas pelo rádio LoRa no momento da transmissão dos dados.

É esperado que o sistema projetado seja capaz de se manter com uma quantidade de energia suficiente para que o nó consiga exercer as suas funções de coleta e transmissão de dados. À vista disso, o sistema foi concebido para que consiga ficar uma determinada quantidade de tempo sem recarregar, como à noite e em dias nublados. Isso foi feito através do banco de supercapacitores, o qual foi dimensionado para armazenar quantidade de energia suficiente para isso. Além do mais, uma outra medida feita foi diminuir o máximo possível o

consumo dos demais componentes do nó.

Já em termos de carregamento, é esperado que o sistema consiga se carregar no menor tempo possível, para que consiga manter a sua energia mesmo em dias com pouco sol.

Com o intuito de se avaliar a capacidade e a eficiência do sistema projetado neste trabalho, foi feita uma análise que foi dividida nas seguintes etapas:

- Etapa 1: Avaliação dos supercapacitores como sistema de armazenamento, que consistiu em relacionar a quantidade de energia que eles armazenam com a que o sistema consome, com a finalidade de se obter a quantidade máxima de tempo que o sistema permaneceria alimentado;
- Etapa 2: Avaliação do consumo de energia do sistema, a qual foi feita considerando o consumo na transmissão de dados e no sistema em modo de baixo consumo de energia ao longo do tempo;
- Etapa 3: Avaliação da capacidade do painel solar em gerar energia ao longo do tempo, a qual foi feita medindo-se a quantidade de energia gerada pelo painel em diferentes horários do dia.

Essas etapas visaram obter dados que, quando analisados em conjunto, mostram a eficiência do sistema e a sua viabilidade de funcionamento em termos de conseguir carregá-lo e mantê-lo funcionando.

Neste trabalho foi avaliada a viabilidade do sistema projetado em termos de consumo e geração de energia. Além disso, o nó transmissor foi concebido para ser utilizado com qualquer tipo de sensor ou sistema que necessite de transmissão de dados, mas neste projeto será dado certo foco para sua aplicação como alarme remoto, onde o nó, ao receber o sinal de um sensor, transmitirá uma mensagem de alerta.

1.1 MOTIVAÇÕES

O problema que motivou a ideia do projeto está na relação de áreas rurais com animais exóticos invasores presentes na região. Espécies exóticas invasoras são definidas como as que se encontram fora de seu habitat de origem e se proliferam sem controle, trazendo riscos às espécies nativas e ao meio ambiente.

As invasões favorecem a disseminação de doenças e pragas, afetando assim a fauna e flora local, e também degradando lavouras, florestas e pastagens. Levantamentos realizados nos Estados Unidos, Reino Unido, Austrália, África do Sul, Índia e Brasil mostram que bilhões de dólares são perdidos anualmente em decorrência de invasões biológicas nas culturas, pastagens e nas áreas florestais (PIMENTEL et al., 2001).

Dentre os métodos utilizados para o controle populacional dessas espécies a mais atrativa é a armadilha de captura. No entanto, uma das principais desvantagens é a necessidade de intervenção humana regular em lugares usualmente remotos para verificar se algum animal foi capturado.

A partir dessa necessidade, surgiu a ideia de um alarme remoto para regiões rurais que não tivesse a necessidade de baterias, e que operasse com um sistema de transmissão adequado para regiões sem cobertura de rede celular.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é desenvolver um sistema de transmissão de dados sem fio que não utiliza armazenamento eletroquímico de energia e seja capaz de transmitir os dados adquiridos pelo menos uma vez a cada hora. Complementarmente, há a meta de elaborar uma rede sem fio associada à um banco de dados, para que as informações transmitidas estejam disponíveis para apresentação em plataformas de acesso.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de desenvolver um sistema que cumpra com a sua proposta, o projeto é segmentado em blocos de funcionalidades. Um segmento diz respeito à transmissão e recepção sem fio, além do armazenamento dessas informações em um banco de dados. O outro segmento está associado ao sistema de gerenciamento de energia para alimentar os componentes necessários para realizar a transmissão. Todas as etapas descritas são de extrema importância para a composição do trabalho em sua totalidade.

Algumas metas intermediárias designam a forma como o projeto é constituído, de forma a compor o sistema global do trabalho. Tais etapas relacionadas à rede sem fio são:

- Integração entre módulo transceptor e microcontrolador;
- Desenvolvimento de *firmware* para controle de transmissão de dados e modos de operação;
- Cadastro e integração da rede em uma plataforma de infraestrutura de comunicação para Internet das Coisas;
- Aquisição dos dados armazenados através de uma API.

As etapas em relação ao gerenciamento energético são:

- Projeto do circuito de armazenamento e colheita de energia;
- Testes e análises de validação da solução de hardware proposta.

A intenção é alcançar uma mínima autonomia energética para o sistema operar sem irradiação solar por um longo período de tempo, através do gerenciamento de painéis solares e supercapacitores.

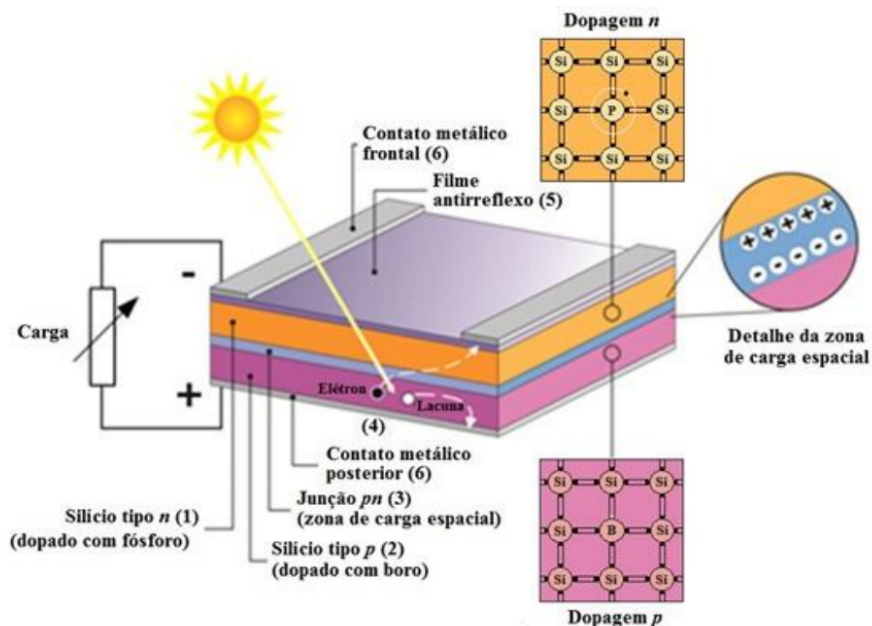
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PAINÉIS SOLARES

A energia do sol é uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover energia necessária ao desenvolvimento humano (GALDINO; PINHO, 2014). É uma fonte de energia abundante, limpa e que está cada vez mais sendo aproveitada. Uma maneira de se utilizar essa energia é através de painéis solares, que são dispositivos que permitem converter a energia luminosa do sol em energia elétrica.

Tecnicamente falando, um painel solar é um módulo fotovoltaico (FV, ou em inglês, PV) composto de um arranjo de células fotovoltaicas usadas para converter a energia luminosa do sol em eletricidade (SINGH et al., 2016). O seu funcionamento se baseia no efeito fotovoltaico, descoberto por Edmond Becquerel em 1839, o qual consiste no aparecimento de uma diferença de potencial ao se iluminar uma célula eletroquímica. Com o passar do tempo, foi visto esse feito também em semicondutores, os quais passaram a ser a principal tecnologia na construção de painéis.

Figura 1 – Representação de uma célula fotovoltaica de silício



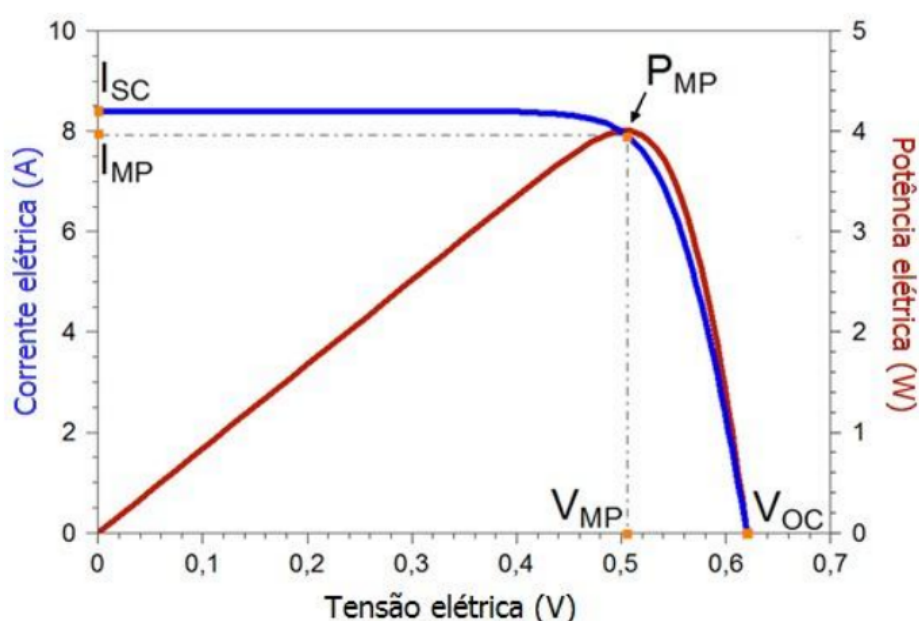
Fonte: Galdino e Pinho (2014)

À vista disso, o princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica consiste na tecnologia de semicondutores. De uma maneira geral, fótons de luz ao atingirem uma junção PN geram pares elétron-lacuna que dão origem a uma corrente elétrica. Para ilustrar, na Figura 1, que mostra a estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício e seus elementos,

pode ser notado um raio de luz gerando um par elétron-lacuna, o qual irá se mover devido ao campo elétrico do meio e gerará corrente elétrica.

Em função de sua construção, as células fotovoltaicas apresentam um comportamento, em termos de tensão e corrente, que pode ser expresso pela curva I-V expressa na Figura 2. Nessa figura podem ser observados os seguintes parâmetros, os quais representam as características dessa curva: I_{SC} ou máxima corrente de curto circuito do painel, obtida quando os seus terminais estão em curto e a tensão entre eles é 0V; V_{OC} ou máxima tensão de circuito aberto, obtida quando o painel está em aberto e a corrente é igual a 0A; e P_{MP} ou ponto de máxima potência do painel, definida pela corrente I_{MP} e a tensão V_{MP} (GALDINO; PINHO, 2014).

Figura 2 – Curva I-V de um painel solar



Fonte: Galdino e Pinho (2014)

Tendo esse comportamento em vista, pode-se notar que a potência que pode ser absorvida pelo painel depende do seu ponto de operação. Assim sendo, é necessário algum método para se alcançar o ponto de máxima potência (MPP). Esses métodos recebem o nome de seguidor do ponto de potência máxima (SPPM) ou *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) em inglês (GALDINO; PINHO, 2014) e (HASSANALIERAGH et al., 2014).

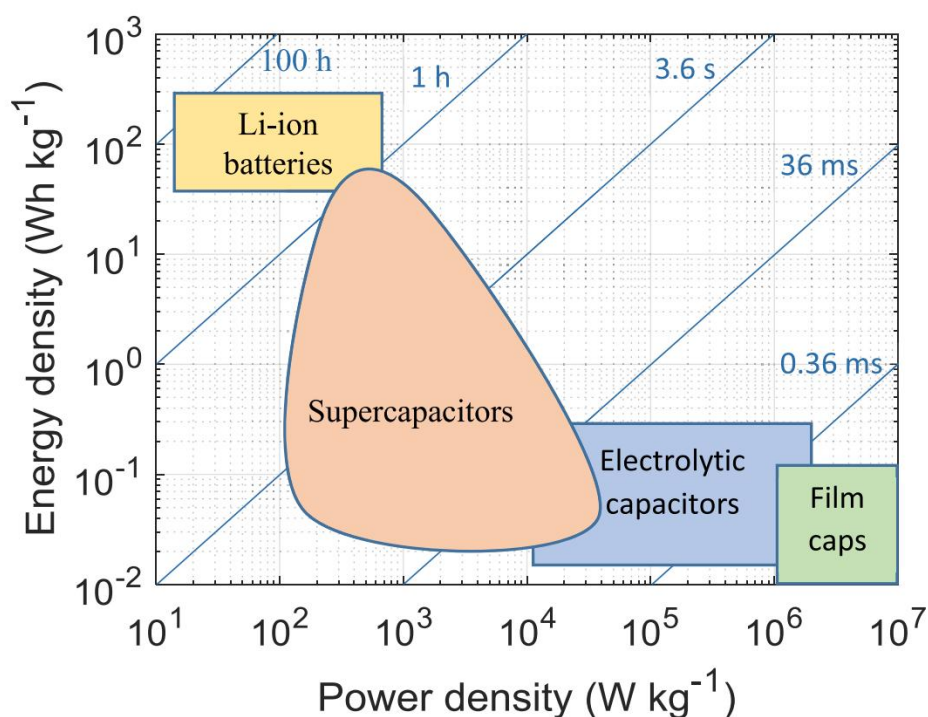
Há ainda outros fatores que podem interferir na eficiência dos painéis solares, como a temperatura, o número de horas de insolação, a nebulosidade e o ângulo de inclinação deles. É interessante notar também que vários desses parâmetros variam com a localização do painel, fazendo com que a geração seja melhor em determinadas épocas do ano.

2.2 SUPERCAPACITOR

Supercapacitor é um dispositivo para armazenamento elétrico de energia que está cada vez mais ganhando aplicações devido às suas propriedades de alta densidade de energia, bom desempenho e longo tempo de vida sem manutenção (BERRUETA et al., 2019).

Em termos de densidade de energia e de potência elétrica, os supercapacitores se encontram entre as baterias e os capacitores convencionais. Como pode ser visto na Figura 3, a densidade de energia dos supercapacitores, que está associada à quantidade de energia que eles podem armazenar, é maior que a dos capacitores convencionais, mas menor que os das baterias. Já com relação à densidade de potência, associada à máxima potência que pode ser fornecida, pode-se ver que eles podem fornecer uma potência maior que as baterias, mas menor que os capacitores convencionais.

Figura 3 – Relação entre densidade de energia e densidade de potência de sistemas de armazenamento.



Fonte: Berrueta et al. (2019)

Essa característica dá aos supercapacitores uma gama de aplicações que requerem uma quantidade relativamente grande de energia, mas que necessitam diversos números de ciclos de carga e descarga.

continua a operar em modo de *pass* (100% de *duty cycle*), repassando a tensão de entrada diretamente para saída, enquanto VBAT é maior que o limiar de subtensão e menor que VOUT.

O chip também implementa uma solução de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) programável, para otimizar a transferência de energia. Por exemplo, painéis solares usualmente operam com MPP (*Maximum Power Point*) de 80% da sua tensão de circuito em aberto. Essa configuração é feita através de uma amostragem de tensão, já prevista na placa que faz a interface do chip.

O BQ25570 é compatível com vários tipos de unidades de armazenamento diferentes, como baterias recarregáveis, super capacitores e capacitores convencionais. O chip foi desenhado para atuar em aplicações com fontes de energia que normalmente apresentam disponibilidade esporádica e variável com o tempo. Dessa forma, o uso de unidades de armazenamento em conjunto com os *harvesters* se apresenta como uma solução para obter uma fonte de energia constante. O chip também oferece o monitoramento de tensões máxima e mínima programáveis, através de resistores, pelo usuário através de valores de *under-voltage (UV)* e *over-voltage (OV)*, de forma a prevenir possíveis danos a unidade de armazenamento.

2.4 LoRa

2.4.1 Modulação LoRa

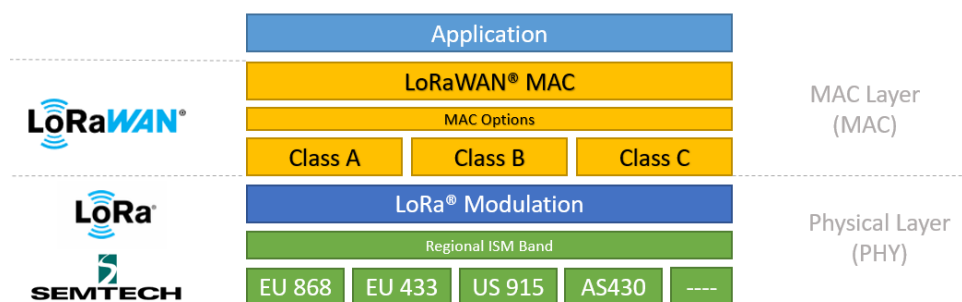
LoRa consiste em uma técnica proprietária de modulação RF *spread spectrum* desenvolvida pela Semtech, a qual permite transmissões em longas distâncias com baixo consumo energético. Este efeito é alcançado em detrimento de altas taxas de transmissão. Um dispositivo LoRa pode ser configurado com os parâmetros de banda (BW), taxa de codificação (CR) e fator de espalhamento (SF), resultando em diferentes relações de compromisso entre a taxa de transmissão e a sensibilidade (RIBEIRO et al., 2020). O alcance de um enlace LoRa pode atingir dezenas de quilômetros, com taxas de transmissão que variam entre 0,3 kbps e 20 kbps (LIN, 2016).

2.4.2 LoRaWAN

A modulação LoRa em si diz respeito somente à camada física da pilha de protocolos. Para a definição das camadas superiores podem ser utilizadas arquiteturas de protocolos que executam sobre tal modulação. LoRaWAN é um padrão aberto desenvolvido pela LoRa Alliance que abrange a camada MAC e faz interface aos *drivers* da aplicação, além de definir elementos de rede, como a topologia estrela entre os dispositivos nós e *gateway*.

O padrão tem papel importante para garantir as principais características da comunicação LoRa, como a segurança, o tempo de vida da bateria, a capacidade da rede e a qualidade de serviço (LIN, 2016).

Figura 5 – Pilha de protocolos LoRa em detalhe.



Fonte: LoRa Developer Portal (2021)

2.4.3 Módulos SX127X

Os módulos transceptores da família SX127X, da Semtech, são componentes de *hardware* responsáveis pela comunicação LoRa em sua camada física. Consistem em circuitos integrados capazes de utilizar as técnicas de modulação LoRa enquanto minimizam o consumo energético. Sua interface SPI, estendida com pinos de I/O digital, permite rápida transferência de dados e acesso aos seus registradores de controle e configuração, com um *clock* de barramento máximo de 10MHz (SEMTECH, 2020).

A configuração dos parâmetros da camada física (PHY) do LoRa é realizada no módulo transceptor através de uma formatação, pré-determinada em *datasheet*, de pacotes transmitidos sobre a interface física. Alguns dos principais parâmetros de uma transmissão LoRa são definidos nesta comunicação direta com o *hardware*, como:

- Fator de espalhamento (SF)
- Taxa de codificação (CR)
- Largura de banda (BW)

A combinação dos parâmetros listados influencia diretamente na taxa de bits (BR) resultante, um dos principais indicadores observados em uma transmissão de dados. Além disso, são parâmetros essenciais para a adequação às leis e regulamentações de transmissões sem fio de cada país, juntamente com os parâmetros de potência de transmissão e a frequência de portadora.

2.5 ESP32

O ESP32 é um microcontrolador de baixo custo e baixa potência projetado pela Espressif Systems que possui diversas características que permitem a sua utilização em diversos projetos na área de IoT (MAIER; SHARP; VAGAPOV, 2017). Ele é um microcontrolador com alta capacidade de processamento, possui módulos de Wifi e Bluetooth para realizar comunicações à distância, além de outros módulos comumente encontrados em microcontroladores em geral. Em termos técnicos, o ESP32 conta com 2 núcleos de 240MHz, 448 kB de memória

ROM, 520 kB de memória RAM, RTC, ADC, DAC, PWM, UART, SPI, I2C, dentre outros módulos (ESPRESSIF SYSTEMS, 2021b).

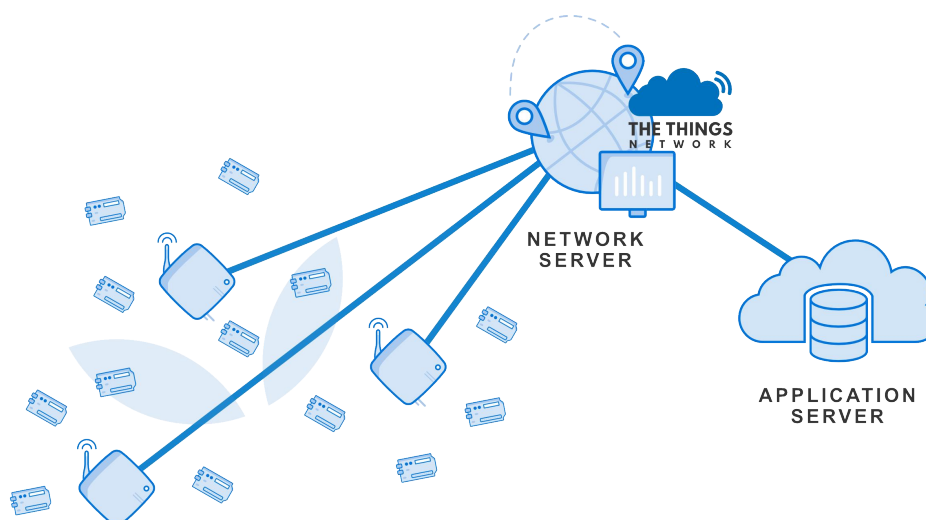
Dentre as suas características, o ESP32 possui 3 modos de sleep, sendo o deep-sleep o que apresenta menor consumo. Nesse modo, todos os módulos são desligados (com exceção do RTC), o que possibilita um consumo de energia de apenas $10\mu\text{A}$. Além disso, é possível acordar o microcontrolador a qualquer momento a partir de um evento, seja ele de tempo ou de GPIO (ESPRESSIF SYSTEMS, 2021b).

O kit de desenvolvimento utilizado neste trabalho foi o Heltec Wifi Lora 32 (V2), o qual é produzido pela Heltec Automation e é recomendado para aplicações na área de IoT (HELTEC AUTOMATION, 2021). Ele possui o chip ESP32 e também o rádio LoRa SX127X, já explicados, respectivamente, na Seção 2.5 e na Subseção 2.4.3.

2.6 The Things Network

Representando grande parte da camada de rede do padrão LoRaWAN, a infraestrutura de comunicação colaborativa The Things Network (TTN) apresenta soluções de integração para uma rede de dispositivos LoRa. Sua plataforma permite cadastrar dispositivos como ponto de acesso (*gateway*) aos seus servidores em nuvem, expandindo a área de cobertura para todos os usuários da região. Adicionalmente, o sistema da TTN possibilita o cadastro de aplicações para facilitar o gerenciamento dos pontos de acesso e dos dados que transitam pela rede, assim possibilitando integrar serviços complementares que viabilizam o acesso aos dados por aplicações de interface com o usuário.

Figura 6 – Diagrama simplificado da arquitetura LoRaWAN com The Things Network.



Fonte: The Things Network (2021b)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados todos os aspectos relacionados à montagem e aos testes com o nó autônomo. Primeiramente será apresentada a arquitetura do sistema, a qual representará o nó autônomo a ser construído, os seus componentes e o que o comportamento do nó. Na sequência, será feita uma descrição mais detalhada de cada parte do sistema, o qual abrange desde a coleta de dados até o envio deles, além do gerenciamento de energia do nó. Após isso, serão descritos os testes realizados para se avaliar o desempenho do nó tanto em termos energéticos quanto em termos de seu funcionamento.

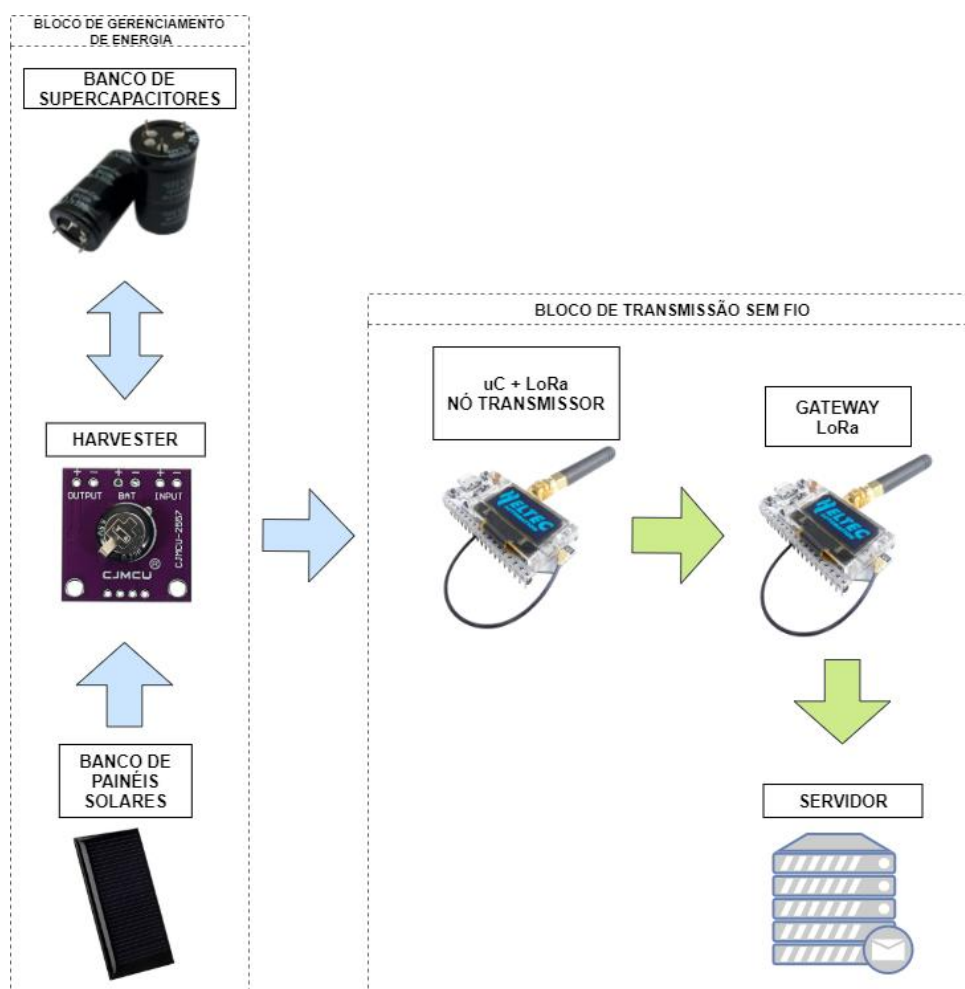
3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

A Figura 7 representa o diagrama geral dos componentes presentes no sistema. O trabalho foi dividido em dois macro blocos, o primeiro denominado como bloco de gerenciamento de energia e o segundo como bloco de transmissão sem fio. A primeira parte é responsável por obter a energia do sistema e gerenciar o armazenamento e fornecimento da mesma para todos os demais dispositivos eletrônicos do sistema remoto. Os dispositivos que compõem esse bloco são o banco de supercapacitores, o banco de painéis solares e o circuito *harvester*. Já a segunda parte é responsável por adquirir os dados observados e repassar até o usuário final pelos métodos de comunicação escolhidos. Esse bloco é composto pelo nó transmissor LoRa, *gateway* LoRa e servidor de rede LoRaWAN.

É possível observar a disposição dos componentes, que fazem parte do bloco de gerenciamento de energia, de forma mais detalhada na Figura 8.

A placa de interface com o chip BQ25570 é chamada de CJMCU-2557, porém mais comumente referenciada como *harvester* devido ao seu papel. As portas disponíveis para o usuário diretamente são OUTPUT, INPUT e BAT. A porta OUTPUT é a saída para carga, que fornece uma tensão regulada pelo *harvester*. Essa saída fornece a alimentação ao ESP32 e ao módulo LoRa (que caracterizam o nó transmissor). A porta BAT refere-se à conexão com o dispositivo de armazenamento, nessa aplicação caracterizado pelo banco de supercapacitores. E por fim, a porta INPUT é a entrada de fonte DC do componente, que nesse sistema é conectada ao banco de painéis solares, composto de dois painéis ligados em paralelo para permitir uma corrente maior de carregamento.

Figura 7 – Diagrama geral da arquitetura do sistema.



Fonte: Autoria própria

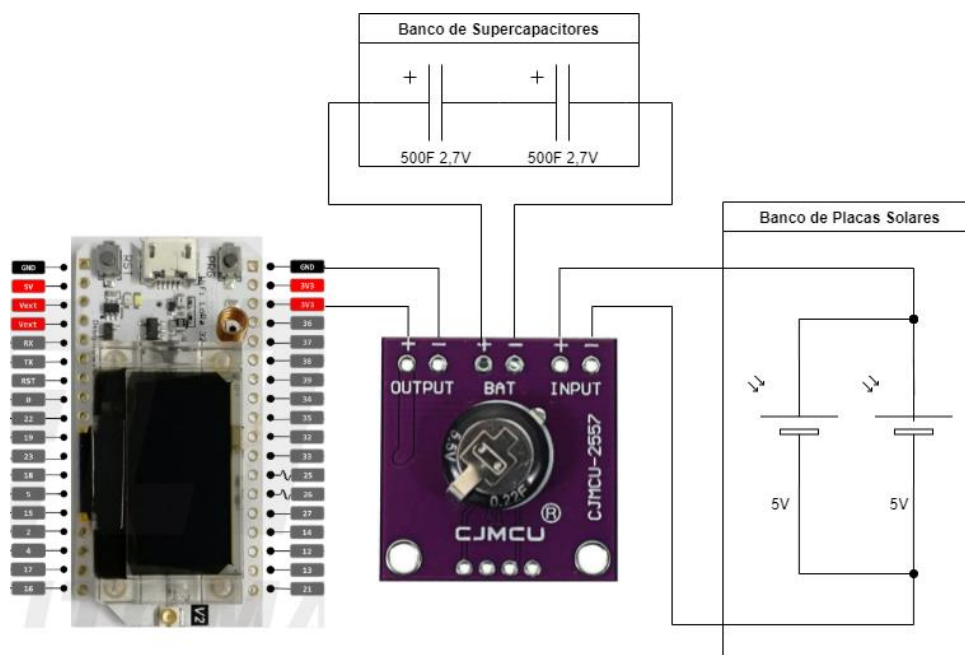
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais listados na Tabela 1 foram utilizados para o desenvolvimento desse trabalho. Parte foi adquirida pelos integrantes, porém a maioria foi emprestada pelo LabSC (Laboratório de Sistemas de Comunicações) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Com relação aos materiais listados na Tabela 2 foram utilizados para suporte dos testes de validação realizados para o desenvolvimento do trabalho. Estes materiais os integrantes já possuíam devido a estudos e experimentos práticos anteriores.

Nas figuras abaixo é possível observar os principais materiais utilizados no trabalho. A maioria das figuras contém o material ao lado de um transistor tradicional (encapsulamento TO-220), para escala de tamanho.

Figura 8 – Diagrama do bloco de gerenciamento de energia.



Fonte: Autoria própria

Tabela 1 – Lista de materiais.

Material	Quantidade	Fornecedor	Preço Total (R\$)	Data de Pesquisa
1 Kit ESP32 WiFi LoRa 32 (V2) - Heltec	2	Mercado Livre	354,00	04/08/2021
2 Supercapacitor 500F 2.7V	2	Mercado Livre	198,60	04/08/2021
3 Conversor CJMCU-2557	1	AliExpress	73,75	04/08/2021
4 Mini painel fotovoltaico	2	AliExpress	21,94	04/08/2021

Fonte: Autoria Própria

3.3 CONFIGURAÇÕES E CONDIÇÕES DE TESTE

Para possibilitar os testes de validação do sistema, algumas configurações em *hardware* foram feitas, além da preparação de um ambiente de testes. Com relação as configurações é importante primeiro apresentar, de forma geral, a funcionalidade de gerenciamento de energia do dispositivo de armazenamento realizado pelo chip BQ25570, que garante o funcionamento correto do circuito conectado à saída VOUT. Essa funcionalidade está ilustrada pela Figura 13.

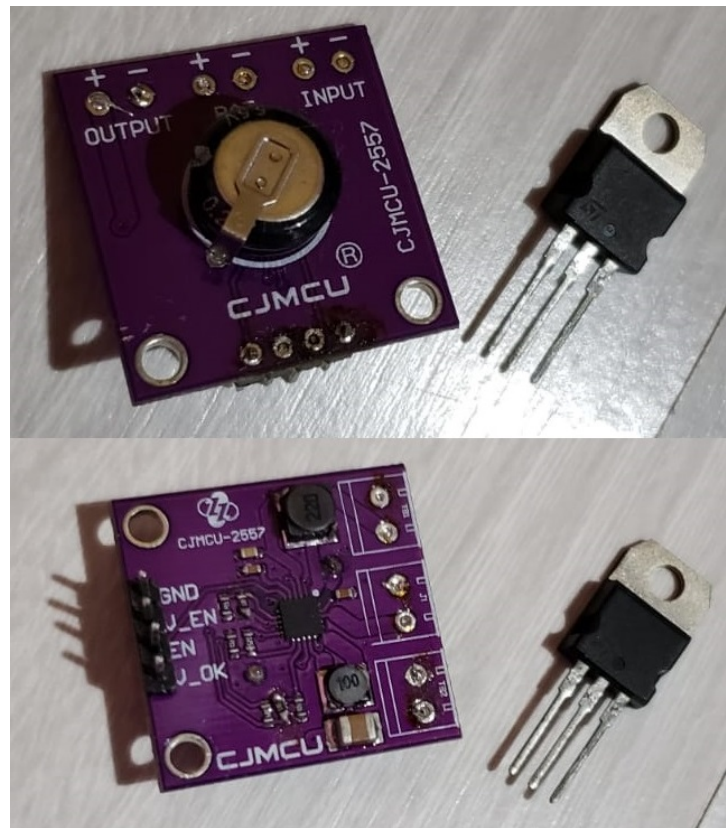
No sentido de carregamento do banco de super capacitores, VBAT_OK_HYST é o valor definido pelo fabricante, que VBAT deve atingir para que a energia comece a ser disponibilizada para a carga. E no sentido de descarregamento do banco de supercapacitores, VBAT_OK é

Tabela 2 – Lista de materiais para Testes.

Material	Quantidade
1 Dev Kit ESP32 ESP-WROOM-32	1
2 Resistores Diversos	3
3 Resistor de Potência 10Ω 10W	1
4 Fonte DC Variável 1A	1
5 Multímetro Digital	2
6 Protoboard	2
7 Cabos	-

Fonte: Aatoria Própria

Figura 9 – Conversor CJMCU-2557.

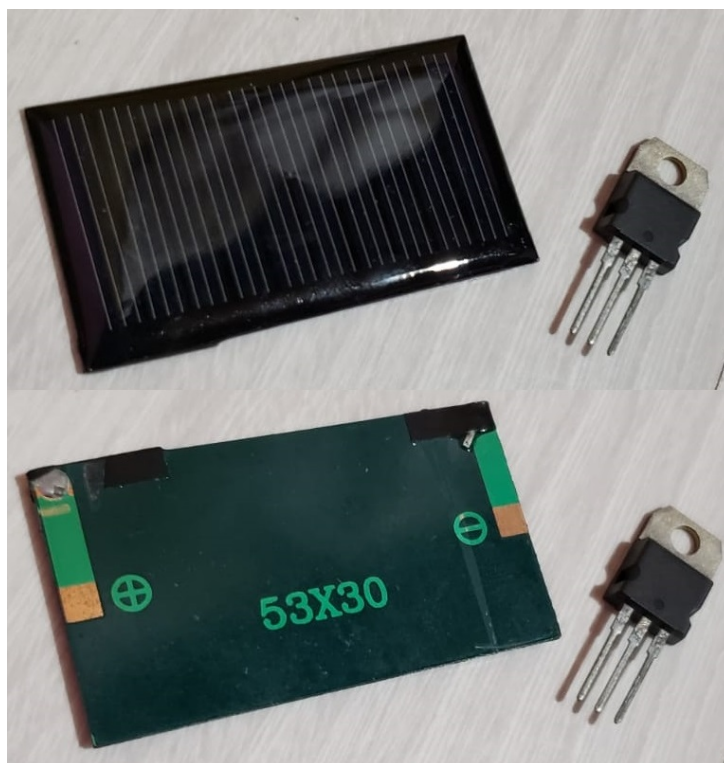


Fonte: Aatoria própria

o valor de referência de VBAT para o desligamento da porta conectada à carga, ou seja, o mínimo valor em que o sinal ainda está ativo, qualquer coisa abaixo disso, não é mais possível obter a alimentação através do VOUT. Ambos os valores podem ser configurados através de resistores. Por padrão, do fabricante do CJMCU, esses valores foram configurados como 3,256V para VBAT_OK_HYST e 2,847V para VBAT_OK (CJMCU, 2018).

Outros dois valores de referência importantes para caracterizar o comportamento do *harvester* podem ser configurados por resistores. O primeiro é VOUT(typ), o valor disponibilizado

Figura 10 – Mini painel fotovoltaico.



Fonte: Autoria própria

Figura 11 – Supercapacitor 500F 2,7V.



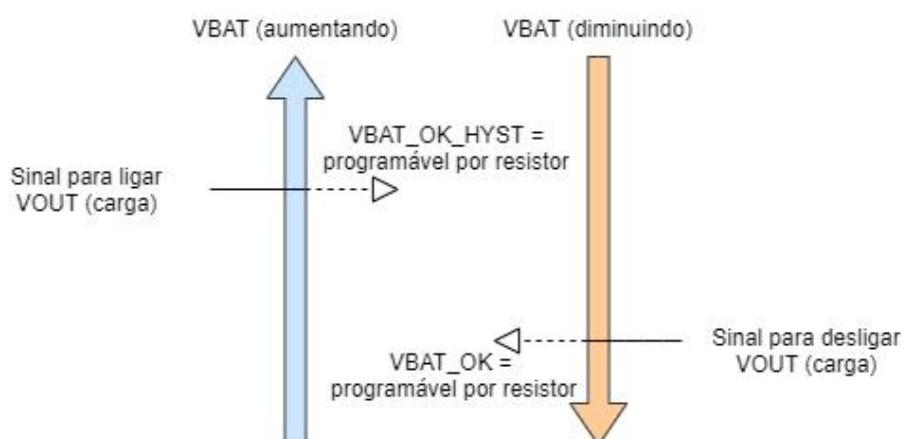
Fonte: Autoria própria

Figura 12 – Kit ESP32 Wifi LoRa 32 (V2).



Fonte: Autoria própria

Figura 13 – Comportamento do sistema de acordo com VBAT.



Fonte: Autoria própria

na saída OUTPUT quando VBAT atinge VBAT_OK_HYST. Esse valor por padrão do fabricante estava configurado como 2,574V, porém como essa porta seria utilizada como alimentação do microcontrolador ESP32, que precisa de 3,3V, a configuração foi modificada. Para isso o

resistor SMD ROUT2 de $1M\Omega$ foi substituído por $1,5M\Omega$, de forma que o valor $V_{OUT}(typ)$ assumisse $3,256V$ depois da reconfiguração. Já o segundo valor é $V_{BAT_OV}(typ)$, o valor de referência para a funcionalidade de controle de sobretensão do chip, em que o carregamento é interrompido para evitar sobrecarga do elemento de armazenamento, ou seja, o valor máximo que V_{BAT} pode assumir antes da interrupção de carregamento. Esse valor por padrão do fabricante foi configurado como $4,066V$.

Todos os valores de *threshold* e de operação apresentados previamente foram calculados através de uma ferramenta em excel disponibilizada pela Texas Instruments, a fabricante do chip BQ25570 (TEXAS INSTRUMENTS, 2019).

Figura 14 – Planilha para design da Texas Instruments.

ROV1	0,887 MΩ			ROK1	0,887 MΩ			ROUT1	0,887 MΩ		
ROV2	1,5 MΩ			ROK2	1,2 MΩ			*+10MEG ²	0,00 MΩ		
	↓			ROK3	0,3 MΩ			ROUT2	1,5 MΩ		
					↓				↓		
$V_{BAT_OV}(typ)$	4,884 V	100,00 % diff		$V_{BAT_OK}(typ)$	2,847 V	100,00 % diff		$V_{OUT}(typ)$	3,256	69,29 % diff	
				$V_{BAT_OK_HYST}(typ)$	3,256 V	100,00 % diff					

Fonte: Texas Instruments (2019)

Além disso, um ambiente de testes foi preparado para possibilitar os testes práticos. Como todos os elementos possuem uma construção bem desacoplada, a ligação de interface entre eles foi feita em *protoboard* para facilitar possíveis modificações e testes independentes de elementos do sistema, como o teste de descarga do banco de supercapacitores em aberto.

Ademais, para realizar todos os testes de carga e descarga do banco de supercapacitores, foi utilizado uma fonte DC para atingir o valor de tensão inicial desejado para cada teste. A fonte DC utilizada é variável com máximo de 12V e 1A. Todos os testes foram feitos na casa dos integrantes desse trabalho, já que o desenvolvimento foi realizado em um cenário de pandemia mundial devido à COVID-19.

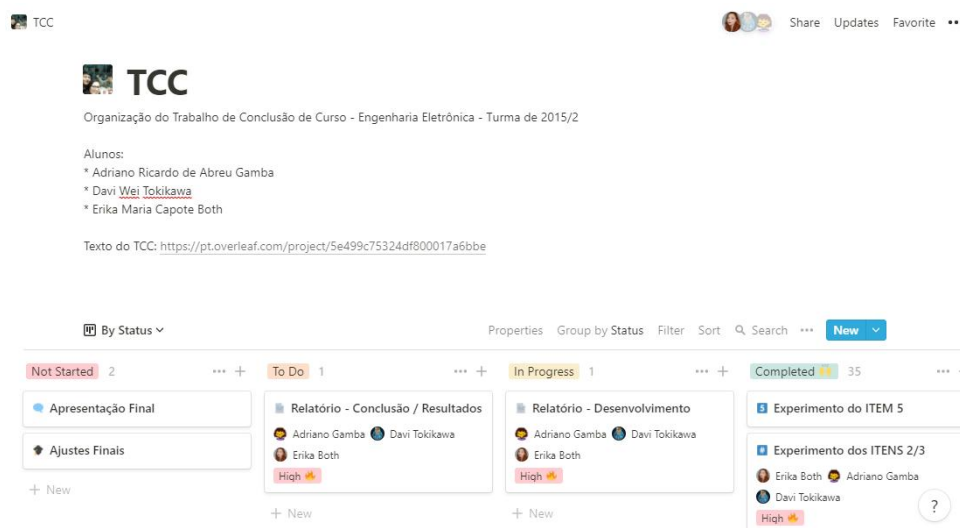
3.4 GERENCIAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO PROJETO

Foi utilizado durante o desenvolvimento desse trabalho o método ágil de desenvolvimento de projetos chamado de Scrum. Assim, as atividades a serem realizadas eram listadas de forma semanal e divididas pelos integrantes por peso, calculado a partir da complexidade e tempo de cada tarefa. De forma que, a cada nova iteração semanal, foi possível replanejar e corrigir o planejamento do desenvolvimento e testes de acordo com os resultados obtidos em cada etapa. As atividades foram criadas baseadas no pré-projeto desenvolvido na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1 da engenharia eletrônica.

A ferramenta utilizada para a implementação desse método foi a plataforma online Notion. Ferramenta que possibilitou a criação de um quadro contendo todas as atividades agrupadas por *status* de 1)A fazer, 2)Em progresso e 3)Concluído, de acordo com o método Scrum. Essa abordagem foi essencial para a organização e divisão de tarefas pela equipe, já que

o contexto, de grande parte do desenvolvimento do projeto, foi à distância como já mencionado previamente nesse trabalho.

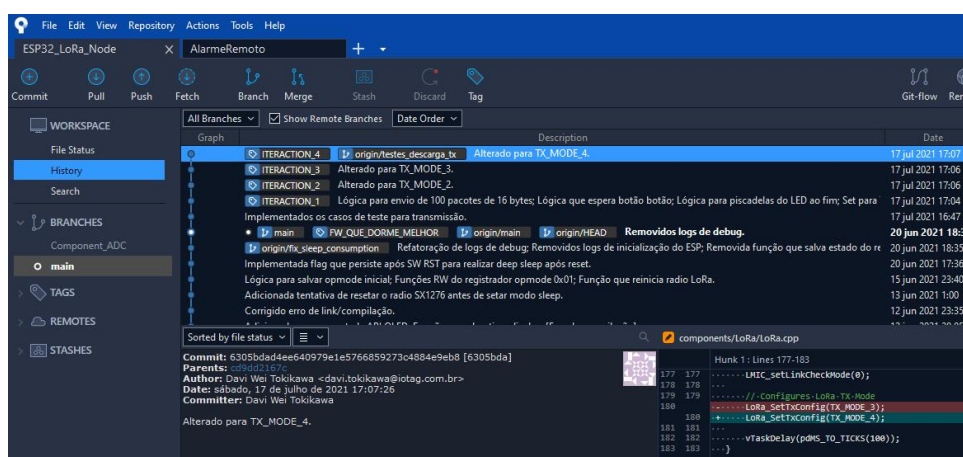
Figura 15 – Quadro Scrum no Notion.



Fonte: Autoria própria

Além disso, para o desenvolvimento do *firmware* do projeto foi utilizada a plataforma GitHub, criando um repositório para organização de versões. A ferramenta gráfica (GUI) escolhida pela equipe para realizar as operações no repositório foi o Sourcetree, a qual possibilita operações padrões de repositório de SW, como *commit*, *push* e *fetch*, de forma mais simples para o usuário.

Figura 16 – Repositório de SW visualizado pelo Sourcetree.



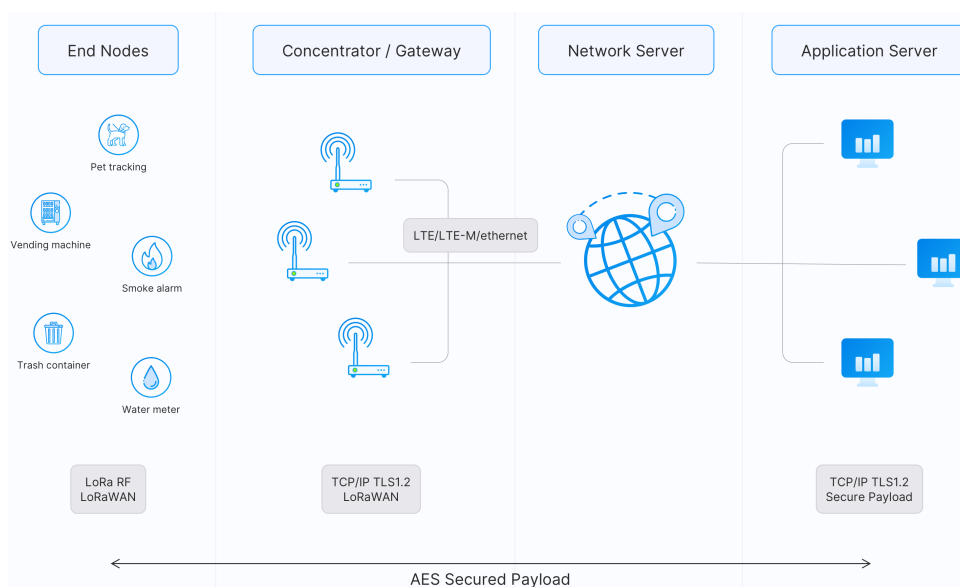
Fonte: Autoria própria

3.5 TRANSMISSÃO SEM FIO

Com o intuito de fornecer informações provenientes de um dispositivo remoto, através de ferramentas especiais de acesso, foram determinadas subetapas para caracterizar o comportamento final desejado.

Inicialmente, foram realizados alguns estudos para desenvolver uma programação que seria executada no microcontrolador dos kits utilizados, com detalhe para as duas categorias de código diferentes, uma do dispositivo nó e outra do *gateway*. Através da aplicação do padrão LoRaWAN na comunicação, foi possível realizar uma integração com os servidores da TTN, responsável pela camada de rede da arquitetura definida, como apresenta a Figura 17.

Figura 17 – Arquitetura da rede LoRaWAN.



Fonte: The Things Network (2021b)

Os dados recebidos pelos servidores da TTN foram acessados através da configuração de um sistema de integração a aplicações externas, já presente no ecossistema de soluções da plataforma.

3.5.1 Desenvolvimento do *firmware*

3.5.1.1 Dispositivo nó

A programação do *firmware* para o dispositivo nó foi realizada em linguagens C e C++, utilizando a IDE Visual Studio Code com a extensão Espressif IDF, permitindo interações com o *hardware* diretamente do ambiente de desenvolvimento sem a necessidade de programas de terceiros para gravação e depuração. De forma a facilitar a manipulação dos componentes do microcontrolador ESP32, a empresa fabricante apresenta uma biblioteca que faz uma interface de baixo-nível com os registradores e com a memória, chamada de ESP-IDF. Neste trabalho foi utilizada a versão 4.0.2 da API da Espressif.

Cada etapa do *firmware* desenvolvido para o dispositivo nó foi estudada e otimizada visando obter o menor uso de processamento e, conseqüentemente, de energia. Um diagrama de estados foi projetado para segmentar o conjunto de rotinas que seriam programadas de acordo com cada propósito funcional, gerando etapas de codificação bem definidas, apresentadas na Figura 18. Através de um multímetro digital de qualidade, uma série de medições do valor de corrente de consumo do kit foram realizadas em caráter qualitativo, a fim de certificar se as otimizações implementadas resultavam em valores de corrente média próximos aos indicados pelo fabricante (HELTEC AUTOMATION, 2021).

Figura 18 – Diagrama de estados do sistema do nó transmissor.



Fonte: Autoria própria

Em um primeiro momento, o desafio maior consistia em estabelecer a interface entre o microcontrolador e o módulo LoRa, presentes no kit integrado, visando compor a etapa correspondente ao envio de dados. Para isso, uma biblioteca de comunicação LoRaWAN de código aberto foi adaptada para executar no ESP32, com algumas modificações em relação à frequência de portadora da transmissão, a qual foi configurada de acordo com o plano de frequência AU915-928, e aos canais de comunicação LoRa, desativados em sua maioria para permitir somente o *uplink* no canal 9 da sub-banda 2. Esta configuração corresponde à uma transmissão realizada em uma portadora de 917MHz (THE THINGS NETWORK, 2021a).

A partir do momento em que o módulo SX1276 e o padrão LoRaWAN estavam devidamente configurados, testes de transmissão foram efetuados para validar a etapa de envio de dados. Foram desenvolvidas funções a nível de aplicação que realizavam a montagem dos pacotes e os repassavam à fila de envio. Juntamente ao estágio da elaboração de pacotes, uma estrutura para leitura do ADC interno do ESP32 foi desenvolvida para possibilitar a verificação da tensão do banco de supercapacitores a cada transmissão realizada.

Para que se atingisse o baixo consumo desejado do módulo transmissor, foi implementado um sistema de controle responsável por manter todos os componentes do kit em modos de operação com o menor consumo possível. Como o kit era composto por três componentes configuráveis principais (ESP32, SX1276 e *display* OLED SSD1306), a etapa de *sleep* foi segmentada e direcionada para cada módulo. Para o ESP32, foi utilizado o seu modo de operação denominado de *deep-sleep*, em que o microcontrolador desliga todos os seus periféricos internos, com exceção do RTC e do ULP, um coprocessador de baixo consumo (ESPRESSIF SYSTEMS, 2021a). Em relação ao módulo LoRa SX1276, uma pequena modificação na biblioteca de interface utilizada possibilitou acesso à função de acionamento do modo de *sleep* do transceptor, realizada através da escrita em um registrador interno através do barramento SPI. Já a tela de OLED, não utilizada neste projeto, exigiu o desenvolvimento de uma estrutura adicional no *firmware* para comunicação no padrão I2C, realizando a escrita em registradores do controlador do *display* a fim de acionar seu modo de baixo consumo, o qual essencialmente consiste no desligamento do módulo por software (SOLOMON SYSTECH, 2008).

Tendo em vista que o caso de estudo do sistema apresentado neste trabalho foi parcialmente inspirado em alarmes para fechamento de armadilhas, o código desenvolvido apresenta a necessidade de duas formas para sair do modo de *sleep*, mais conhecido como procedimento de *wake*. A primeira forma independe do tipo de variável a qual o sistema de alarme é projetado para monitorar, o qual representa o acionamento por estouro de temporização. Dessa forma, o sistema consegue sair do estado de IDLE para realizar o envio de uma mensagem que pode indicar ao usuário final que o alarme continua ativo e com carga na bateria (*keep-alive*), além de realizar medições periódicas de grandezas do interesse rural, como a umidade do solo ou a própria intensidade luminosa. O outro caso de *wake* foi projetado através de interrupções do sistema de GPIO do microcontrolador, permitindo, por exemplo, que um evento de junção de contatos metálicos possa ser detectado de forma similar à um botão sendo pressionado.

Ambos os modos foram configurados através da biblioteca ESP-IDF, como mostra a Figura 28 no Apêndice A.

Em virtude do comportamento de *deep-sleep* do ESP32 implicar que, ao sair do estado de baixo consumo, o sistema é reinicializado, foi imprescindível implementar uma etapa responsável por detectar as razões de saída do modo de *deep-sleep*, a qual está sendo executada a cada vez que o sistema é inicializado. Esta funcionalidade se dá através de um sistema do próprio microcontrolador capaz de identificar a razão da última reinicialização, como em destaque na Figura 29 no Apêndice A. Para o caso em que o sistema é ligado após um corte de energia ou por outras razões consideradas normais, foi implementada a mesma estrutura de mensagens de *keep-alive*, com o objetivo de alertar imediatamente que se recuperou de uma possível queda de energia.

3.5.1.2 Dispositivo *gateway*

A escolha de realizar a programação do *gateway* LoRa veio da indisponibilidade de acesso à uma solução comercial durante o período de desenvolvimento do projeto, além de não haver pontos de acesso públicos disponíveis nas regiões dos testes realizados, logo algumas limitações de hardware foram aplicadas. Ao utilizar o kit da Heltec, o mesmo utilizado para o nó transmissor, o sistema foi limitado à velocidade de processamento do ESP32, além da quantidade reduzida de memória. Em termos práticos, a solução final implementada apresenta somente um canal para comunicação, restringindo a quantidade de informações simultâneas que podem ser tratadas no *gateway*.

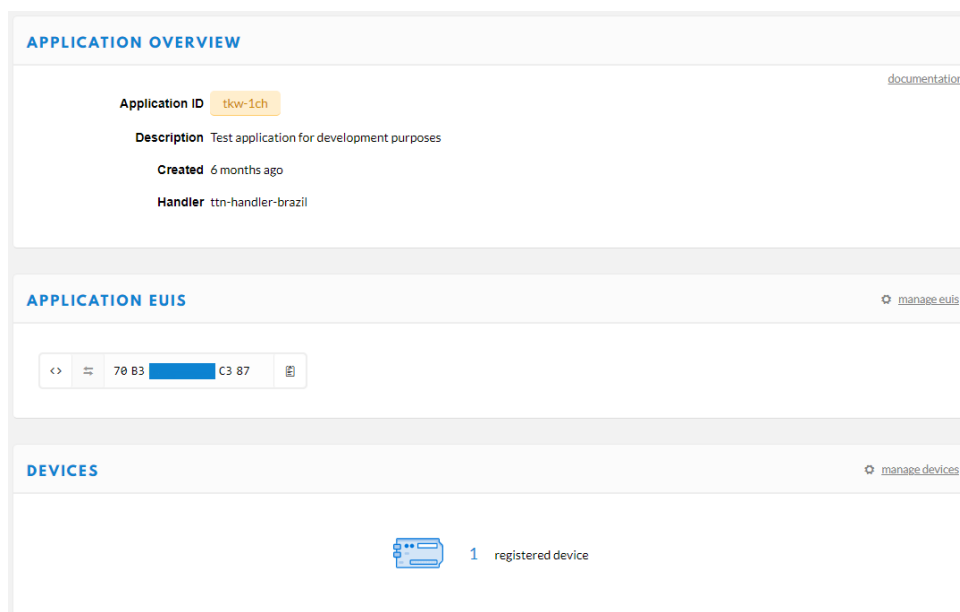
A acessibilidade financeira, aliada à modesta necessidade de processamento que é exigida do *gateway* neste trabalho, foram as principais razões para a escolha do recurso de canal único, apesar de ser uma solução não recomendada pela TTN por fornecer baixa cobertura e não ser totalmente compatível com o padrão LoRaWAN (THE THINGS NETWORK, 2021c). Apesar disso, a solução implementada é mais que suficiente para comprovar o funcionamento do sistema.

A implementação do sistema foi baseada em uma biblioteca de código aberto, com pequenas modificações para alteração de configurações do SF, dos servidores de rede LoRaWAN (TTN) e da frequência do canal monitorado, seguindo as determinações do plano de frequência AU915-928 para respeitar a legislação brasileira. A Figura 30 do Apêndice B apresenta um trecho do código do *gateway* desenvolvido na Arduino IDE.

3.5.2 Servidor de rede LoRaWAN

Com o intuito de utilizar a infraestrutura da rede da The Things Network, foi realizado um cadastro da aplicação dentro da plataforma. A Figura 19 mostra a interface de acesso à aplicação, em que é possível gerenciar os dispositivos da rede e acessar uma interface para observar os dados que chegam ao servidor.

Figura 19 – Interface da aplicação na plataforma de rede LoRaWAN.



Fonte: Autoria própria

Uma vez que a camada de rede do padrão LoRaWAN foi configurada através do uso da plataforma, houve a necessidade de integrar um mecanismo de armazenamento de dados à aplicação, visto que o sistema da TTN apresenta os dados de forma temporária. Através da própria plataforma, foi definida a integração com o serviço Data Storage (v2.0.1), da The Things Industries B.V., permitindo o armazenamento das informações durante um período máximo de sete dias. O serviço possibilita realizar requisições ao banco de dados através do conceito de API REST, permitindo requisições de todos os dados do banco ou de dispositivos nó LoRa específicos que tenham enviado mensagens. A Figura 20 apresenta com mais detalhes técnicos as possibilidades de requisições.

Figura 20 – Requisições permitidas pelo banco de dados através da interface.



Fonte: Autoria própria

3.5.3 Aplicação de acesso aos dados

A fim de possibilitar a visualização das informações armazenadas no banco, algumas aplicações personalizadas podem ser desenvolvidas, estendendo o escopo deste trabalho. O acesso aos dados armazenados no sistema integrado à TTN foi validado através de um *script* desenvolvido em linguagem Python. Por meio de requisições em que se pode filtrar os resultados por tempo e ID do dispositivo, em destaque na Figura 31 do Apêndice C, o *script* permite o envio da requisição e o recebimento das informações já em formato JSON, exemplificado na Figura 32 do Apêndice C. O dado bruto recebido pelo servidor foi decodificado no padrão *base64*.

3.6 GERENCIAMENTO DE ENERGIA

A gerência de energia do nó proposto neste trabalho baseia-se na ideia de colheita de energia (*harvesting*). Assim sendo, a ideia principal do sistema de gerenciamento de energia é coletar a energia aos poucos, para que ela possa ser utilizada somente quando necessário por algum dispositivo que realizará a coleta e a transmissão de dados.

Neste trabalho foram realizados vários testes com o objetivo de determinar o desempenho do sistema do ponto de vista energético, bem como averiguar a quantidade de mensagens que o sistema consegue enviar por dia mesmo sem utilizar baterias. Esses testes visaram responder por quanto tempo o sistema pode operar sem carregar seus capacitores, quantas transmissões podem ser realizadas e por quanto tempo os painéis precisam receber irradiação solar para operar em modo contínuo. Para isso, foram necessárias diversas etapas que serão melhor explicadas nas seções posteriores.

3.6.1 Considerações sobre o sistema de gerência de energia

O sistema de gerenciamento de energia proposto nesse trabalho é composto por um painel solar para coleta, um banco de supercapacitores para armazenamento e um circuito que realiza o controle da coleta de energia, do carregamento do banco e da alimentação dos demais componentes do nó.

A gerência de energia se deu da seguinte forma: os painéis solares coletam a energia do sol com o tempo para que ela vá carregando o banco de supercapacitores aos poucos, principalmente no período que houver sol sobre o sistema. O banco de supercapacitores, por sua vez, armazena a energia provida pelo painel solar, e a utiliza para alimentar os demais componentes do sistema, de tal maneira a lhes fornecer energia mesmo em períodos em que não há sol. E para fazer a ligação desse sistema, o circuito de gerência de energia foi baseado no CI BQ25570, o qual é responsável por repassar a energia coletada pelo painel para o banco e alimentar os demais componentes do nó com essa energia.

Com relação ao BQ25570, este aplica um método de MPPT para obter a máxima potência fornecida possível pelo painel solar, e então converter a tensão obtida pelo painel

em um valor que permita carregar os supercapacitores, ao passo que verifica a tensão dos supercapacitores para que ela não ultrapasse um limiar máximo. Além disso, fazendo uso de um conversor CC, usa a energia provida para gerar uma tensão fixa de aproximadamente 3,3V na saída (modo *pass*), necessária para atender as especificações do microcontrolador e do rádio utilizados.

Com o intuito de melhorar o desempenho do sistema, o microcontrolador e o rádio foram programados para operar de tal maneira a gastar energia somente quando necessário. Isso foi feito deixando-os a maior parte do tempo em modo de baixo consumo de energia, e quando for necessária fazer uma transmissão, fazê-la e já voltar para o modo de baixo consumo. Isso permite um aproveitamento maior de energia, pois o alto consumo associado à transmissão é reduzido pela baixa cadência com que elas ocorrem (uma vez a cada hora) e também pela baixa quantidade de dados enviados, pois isso diminui o tempo de transmissão.

3.6.2 Procedimento de medição de dados

Para realizar as medições de nível de tensão nos testes feitos neste trabalho, foi elaborado um pequeno módulo de registro de dados (*data logger*) para medir e salvar os dados ao longo de todo o tempo de teste. Este módulo é composto por um circuito de condicionamento, para obter o sinal de tensão a ser medido, e de um microcontrolador ESP32 com um *firmware* para realizar a leitura e o registro desses dados em um arquivo.

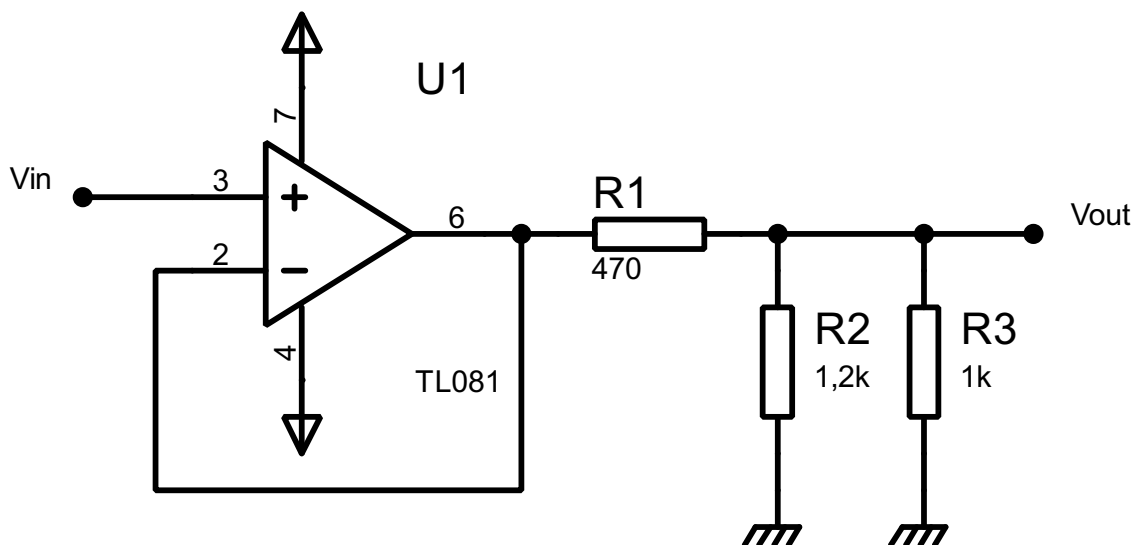
3.6.2.1 Circuito de Condicionamento do *data logger*

O circuito de condicionamento projetado foi feito para converter o nível de tensão presente em algum componente a ser medido (como o banco de supercapacitores, o painel solar ou algum pino do CJMCU) para um nível de tensão compatível com a entrada analógica (ADC) do microcontrolador ESP32. Este circuito, o qual está esquematizado na Figura 21, possui um *buffer* de tensão feito a partir do amplificador operacional TL081 da Texas Instruments, e um conjunto de resistores para realizar a conversão do valor de tensão medido em um valor que possa ser lido pelo microcontrolador.

O *buffer* de tensão tem o propósito de evitar com que haja vazamento de corrente do componente a ser medido na entrada V_{in} pelo *data logger*. Isso é possível devida à alta impedância de entrada do amplificador operacional. Dessa forma, o *data logger* pode medir as tensões do nó causando o mínimo impacto ao consumo de energia do sistema.

Os resistores foram escolhidos para atenuar a tensão de componente a ser medido em uma tensão que é suportada pelo ADC do ESP32. Nessa configuração, a relação entre a saída V_{out} (entrada do ADC) e a entrada V_{in} do circuito é dada aproximadamente por: $V_{out} = 0,537 \cdot V_{in}$. Essa taxa de conversão permite que uma tensão de 4,1V na entrada V_{in} , que é a máxima tensão que foi medida neste trabalho, resulte em uma tensão de 2,2V na entrada do ADC, a qual é uma tensão suportada pelo ADC sem que haja o risco de queimá-lo.

Figura 21 – Circuito de condicionamento.



Fonte: Autoria própria

3.6.2.2 Firmware do data logger

O *firmware* do *data logger*, cujo funcionamento está representado na Figura 22 foi projetado para ler a tensão de entrada do ESP32 e realizar a gravação dela em um arquivo de medições.

O *firmware* possui dois modos de funcionamento: o modo de leitura e o modo de gravação. No modo de gravação o *firmware* realiza a configuração do ADC para funcionar em uma faixa de 0,15V até 2,45V, e então configura o sistema de arquivos para operar na própria flash do ESP32. Após isso, o *firmware* cria o arquivo e começa a gravar os valores de tensão da entrada ADC no próprio arquivo, de modo que cada dado é gravado em uma linha diferente. A frequência com que os dados são lidos é configurável com base em um parâmetro no próprio código do *firmware*, permitindo assim o seu uso em diferentes experimentos.

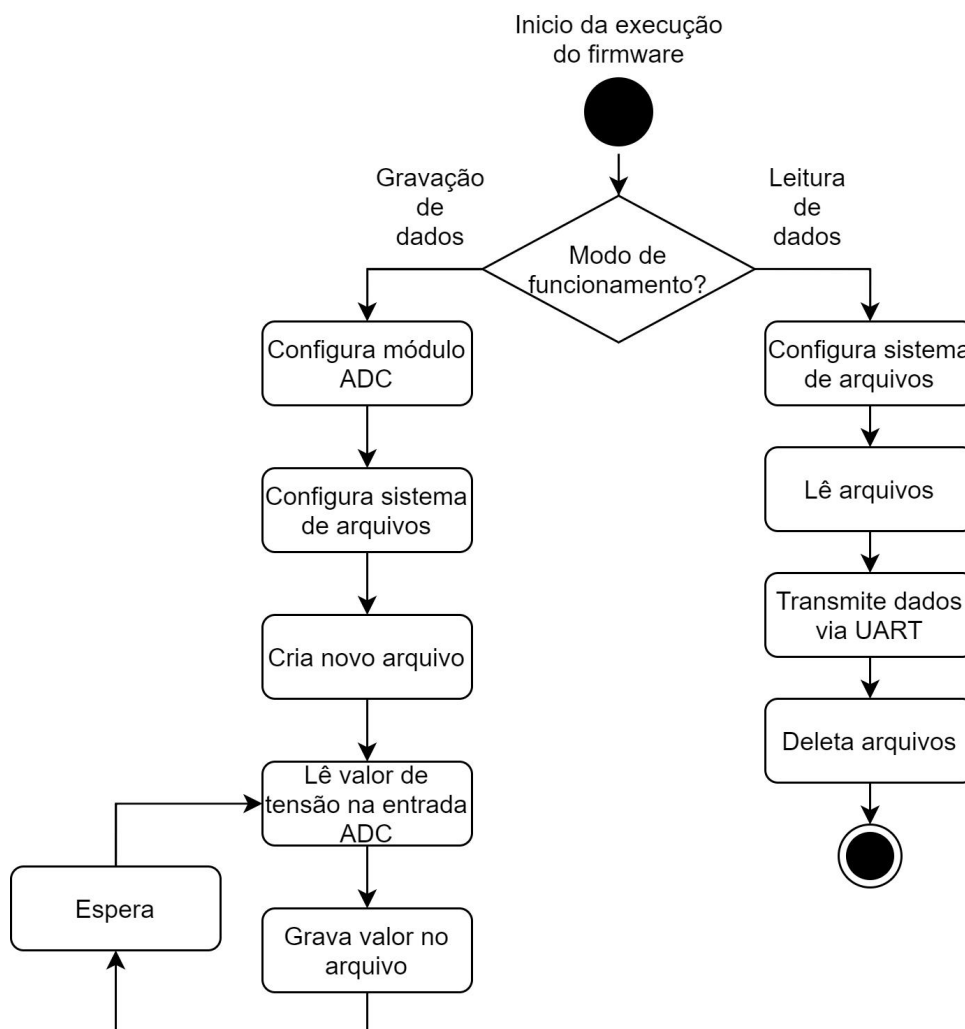
Já no modo de leitura, os arquivos são lidos e o seu conteúdo é transmitido via comunicação UART para o computador. Quando os dados são obtidos, os arquivos são apagados para que novos arquivos possam criados sem esgotar a memória interna do ESP32.

3.6.3 Procedimento do armazenamento do sistema

Como um primeiro passo para se avaliar a eficiência do gerenciamento de energia do nó, foi feita a análise de seu sistema de armazenamento, com o intuito de verificar a quantidade de energia que pode ser armazenada e se o sistema consegue manter essa energia ao longo do tempo.

Com relação ao sistema de armazenamento, este é composto de um banco de supercapacitores com capacitância nominal de 250F e tensão máxima de 5,4V. Esse banco, por sua

Figura 22 – Diagrama representando o funcionamento do *firmware* do data-logger.



Fonte: Autoria própria

vez, é constituído de dois supercapacitores de 500F e 2,7V, que foram ligados em série para permitir uma tensão de operação maior.

O procedimento de teste para se avaliar o banco envolveu carregá-lo e deixá-lo em aberto para verificar a quantidade de energia perdida com o tempo. Este teste envolveu valores de tensão que o banco possuiria se estivesse operando com o CJMCU. Assim, o banco foi inicialmente carregado até a tensão VBAT_OV, que é a mínima tensão que o CJMCU permite ao supercapacitor alimentar os demais componentes do nó, e então foi ligado ao *data logger* explicado na Subseção 3.6.2. O *data logger* foi programado para fazer medições do valor de tensão do supercapacitor a cada 5 minutos. Depois de várias horas de teste, os resultados foram obtidos do *data logger*.

A partir desse teste, foi obtido um conjunto de pontos que representam a tensão do capacitor ao longo do tempo, ajustados em uma curva exponencial. Considerando-se a diferença de tensão do banco, foi possível obter a energia perdida pelo supercapacitor devido

sua corrente de fuga utilizando (1), a qual calcula a diferença de energia de um capacitor com tensão inicial V_i (que nesse caso, é a tensão VBAT_OV) até uma determinada tensão final V_f ;

$$\Delta E = \frac{C}{2}(V_i^2 - V_f^2) \quad (1)$$

A partir da energia perdida e do tempo passado, foi possível calcular a potência média de fuga do sistema de armazenamento através da (2).

$$P_{med} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (2)$$

Esta potência pode ser considerada a energia que o supercapacitor perde inerentemente com o tempo. E por se tratar de um consumo do sistema, ela também foi considerada na análise do desempenho junto com o consumo dos demais componentes.

Para se obter a quantidade máxima de energia útil do sistema, foi utilizado (1) para V_i igual a VBAT_OV e V_f igual a VBAT_OK, sendo esta última a mínima tensão que o banco deve ter para que o CJMCU permita a alimentação dos demais componentes do nó. Esta tensão limiar foi determinada através de ensaios em que se mediu a tensão VBAT no momento em que o VOUT era desligado, obtendo um valor médio dessas medições. Essa potência foi considerada em estimativas que envolvem avaliar a quantidade de tempo que o sistema consegue se manter, considerando gastos de energia tanto no modo IDLE quanto na transmissão de dados, os quais serão melhor abordados na seção seguinte.

3.6.4 Procedimento do consumo do sistema

O consumo de energia de nó é dado pelo somatório do consumo de todos os componentes do nó ao longo do tempo. Este consumo está associado à perda de energia do próprio capacitor e ao consumo do microcontrolador e do rádio. Em relação ao capacitor, o consumo refere-se à potência média devido à sua corrente de fuga. Já em relação ao microcontrolador e ao rádio, o consumo será avaliado de acordo com o funcionamento do sistema. Quando este estiver em modo de baixo consumo de energia (IDLE), o microcontrolador estará em modo de *sleep* e o rádio estará desligado. Já quando o sistema estiver transmitindo dados, o consumo se dará pela soma da energia gasta pelo microcontrolador e pelo rádio. Como o tempo que o sistema permanece em modo IDLE é diferente do tempo que permanece no modo de transmitir dados, isso deverá ser considerado na obtenção do consumo médio ao longo do tempo. Foram realizados testes de consumo do sistema em modo IDLE e no modo de transmissão de dados com a finalidade de se obter o consumo médio total do sistema, o qual pode ser usado para se avaliar a sua eficiência.

3.6.4.1 Consumo do sistema em modo IDLE

O modo IDLE do nó é caracterizado pelo modo onde o nó não está realizando nenhuma ação. O microcontrolador está em *sleep* e o rádio está desligado. Nesse modo, a energia gasta

deve-se ao consumo de energia do kit e à perda de energia do próprio capacitor.

À vista disso, o teste baseou-se em medir a energia gasta pelo supercapacitor da seguinte forma: primeiramente, o supercapacitor foi carregado até a tensão VBAT_OV. Após isso, ele foi ligado no CJMCU junto com o microcontrolador e o rádio. Após isso, o terminal do supercapacitor foi ligado ao *data logger* proposto neste trabalho, e o sistema foi deixado várias horas em modo IDLE. Após esse tempo, os dados foram obtidos do *data logger* para serem analisados.

Após o processo de ajuste da curva exponencial sobre os dados, foi possível obter a energia gasta e a potência média de consumo em IDLE a partir de (1) e de (2). É importante notar que essa potência considera tanto a potência gasta pelo microcontrolador quanto a potência de *leak* do supercapacitor.

Além disso, essa é a potência média gasta ao longo do todo o tempo que o sistema estiver em modo IDLE, o qual é o modo que o sistema permanece mais tempo.

3.6.4.2 Consumo do sistema transmitindo dados

Das duas etapas principais que ocorrem durante o funcionamento do sistema em campo, a etapa de transmissão dos pacotes consome notavelmente mais por exigir maior processamento do módulo LoRa. Logo, foram realizados experimentos para determinar a quantidade de energia que seria necessária para enviar cada *byte* de informação, também permitindo estimar a quantidade de energia por pacote enviado.

Sabendo que cada pacote foi estipulado com tamanho máximo de 16 *bytes* e o *firmware* desenvolvido para o dispositivo nó era facilmente modificável, foi realizada uma rotina de envios constantes de 100 pacotes com 16 *bytes* cada. Dado que o consumo seria variável em relação às diferentes configurações de transmissão LoRa, foram determinados quatro modos de teste, baseados nos valores limiares permitidos pelo plano de frequência AU915, utilizado no Brasil (THE THINGS NETWORK, 2021a). A Tabela 3 apresenta os casos de teste aplicados neste trabalho.

Tabela 3 – Casos de teste para transmissão LoRa.

Caso	SF	Potência de TX	BW	Datarate	CR
1	SF10	14 dBm	125 kHz	DR2	4/5
2	SF7	14 dBm	125 kHz	DR5	4/5
3	SF10	7 dBm	125 kHz	DR2	4/5
4	SF7	7 dBm	125 kHz	DR5	4/5

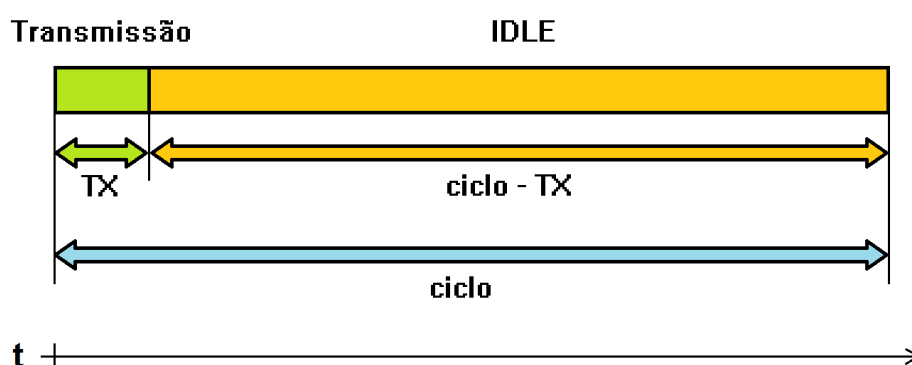
Fonte: Autoria Própria

Partindo da tensão inicial VBAT_OV, o sistema foi inicializado e após a transferência de todos os pacotes uma nova medição da tensão sobre o banco de supercapacitores foi feita. Com a indicação da diferença de energia consumida durante o procedimento, calculada

através de (1), foi possível obter o consumo por pacote pela divisão da energia total consumida pela quantidade de transmissões realizadas. Este procedimento foi aplicado para cada caso apresentando na Tabela 3. Por meio de uma ferramenta *online* para cálculo do tempo no ar (*air-time*) de uma transmissão no padrão LoRaWAN, foram determinadas as durações de transmissão para cada caso (BENTEM, 2020).

Uma vez determinadas as potências médias do sistema em IDLE e transmitindo, foi desenvolvido um *script* em linguagem Matlab para estimar a autonomia do sistema, ou seja, quanto tempo o sistema é capaz de operar sem nenhuma fonte de energia. Para isso, foram realizadas análises com base nas potências médias em IDLE e transmitindo, para cada caso de teste. A estimativa foi feita relacionando a quantidade máxima de energia disponível, no banco de supercapacitores, com a energia necessária para enviar cada ciclo de mensagens, sendo que um ciclo consiste em um grande período do sistema em IDLE e outro pequeno transmitindo. Através da divisão da energia total com a energia de cada ciclo, a quantidade de ciclos de transmissão obtida serviu como base para a estimativa da autonomia, uma vez que se sabe o tempo desejado entre cada transmissão e o seu tempo de duração. A Figura 23 detalha melhor a estrutura de cada ciclo.

Figura 23 – Diagrama temporal de um ciclo de transmissão.



Fonte: A autoria própria

3.6.5 Procedimento do carregamento do sistema

Para possibilitar a avaliação de desempenho do carregamento dos supercapacitores foi feito uma série de testes de carregamento incluindo o banco de painéis solares, o *harvester* e o banco de supercapacitores. O objetivo dos testes foi obter a diferença de tensão final e inicial sobre o banco de supercapacitores durante o dia, para que fosse possível obter quantos joules são adicionados ao banco de supercapacitores quando o *harvester* está conectado ao banco de painéis solares. Nas seguintes condições de contorno:

- Painéis solares virados para o norte;
- Painéis solares com inclinação de 25° graus com relação ao chão;
- Duração de cada medida de 30 minutos;

- Nenhuma obstrução de nuvens ou outras sombras durante a medição;
- No período de 1 dia, obter 4 medidas nos horários distintos de 10:00, 12:00, 14:00 e 16:00;

O teste principal foi realizado no dia 26/07/2021, na cidade de Araucária/PR, dia de inverno no hemisfério sul. A previsão de temperatura para esse dia variou de 14°C à 25°C, com tempo de sol sem nuvens.

Para proteger o banco de supercapacitores e o *harvester* da incidência direta do sol durante os testes, os mesmos foram instalados dentro de uma caixa de papelão rígido com abertura pequena para a passagem dos fios de conexão ao banco de painéis solares. Os painéis solares foram fixados na parte superior da caixa (tampa) inclinados 10° em relação a mesma. Esse valor foi escolhido pois o local em que a caixa repousaria durante a medição já apresentava uma angulação de 15° com relação ao chão. Abaixo (Figura 24) é possível visualizar a caixa descrita e o ambiente dos testes.

Figura 24 – Caixa com a configuração dos testes de carregamento.



Fonte: Aatoria própria

Para a configuração dos testes, foi utilizado um transferidor comum para a medição de ângulo e o aplicativo de celular como bússola para obter corretamente o norte com relação a face dos painéis solares.

O procedimento para cada medição pode ser descrito nos seguintes passos:

- Carregar/Descarregar capacitores até aproximadamente 3,256V (simulando o mínimo valor necessário para que o OUTPUT seja ativo);
- Conectar supercapacitores ao circuito;
- Posicionar a caixa no local de medição sob o sol, com os painéis solares já conectados ao circuito;
- Medir tensão inicial do banco de supercapacitores;
- Cronometrar 30 minutos de medição, sempre conferindo que nenhuma obstrução do sol

ocorreu durante a medição;

- Medir tensão final do banco de supercapacitores;

A partir da diferença de tensão medida foi possível estimar a energia adquirida pelo sistema através do carregamento do banco de supercapacitores feito pelo banco de painéis solares, feito através de (1). Com a informação de energia adquirida e do tempo transcorrido, foi calculada a potência média com auxílio de (2).

Baseado nos valores de potência média para cada medição, foi calculado o valor de potência média que representasse o período de tempo das 10h00 às 16h30, o valor diário com maior incidência de sol para as condições geográficas mencionadas. Esse valor foi calculado pela média dos valores de potência obtidos pelo experimento.

Por fim, foi obtido o tempo necessário para carregar o banco de supercapacitores com a quantidade máxima de energia disponível. Para isso, foi utilizado (3), onde ΔE_{util} corresponde à quantidade máxima de energia disponível no banco de capacitores e P_{dia} a potência média diária fornecida pelos painéis solares.

$$\Delta t = \frac{\Delta E_{util}}{P_{dia}} \quad (3)$$

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A descrição dos resultados referentes à análise energética é feita de acordo com as etapas discutidas na metodologia. Logo, são apresentados e discutidos os resultados referentes ao sistema de armazenamento, ao consumo energético do nó e também à geração de energia do sistema. Após isso, é discutida a eficiência do sistema e demais aspectos relacionados ao seu funcionamento.

4.1 DESEMPENHO DO SISTEMA DE ENERGIA

O sistema de armazenamento, baseado no banco de supercapacitores, foi testado com o objetivo de verificar a sua capacidade de manter a energia armazenada ao longo do tempo, uma vez que isso está fortemente atrelado ao desempenho do sistema.

A Figura 25 mostra os dados obtidos do *data logger* para o teste de medição da tensão do supercapacitor em aberto ao longo do tempo. A figura mostra também uma curva ajustada com base nos dados obtidos.

Ao se notar uma descarga considerável dos capacitores, mesmo sem estarem conectados ao circuito ou a outro elemento, foi realizada uma análise complementar para verificar o valor efetivo do banco de supercapacitores adquirido.

4.1.1 Estimativa da capacitância efetiva

Para que a análise do sistema completo seja feita da maneira mais precisa possível, um valor efetivo da capacitância do banco foi estimado com base no funcionamento geral da descarga de um circuito RC (ALEXANDER; SADIKU; NASCIMENTO, 2013). Esta estimativa possui caráter crucial ao restante da análise do sistema, visto que o valor da capacitância de um capacitor está diretamente relacionado a energia que ele pode armazenar.

Tendo isso em vista, foi realizada uma sequência de medições de tensão do banco conectado à um resistor de potência de valor medido $9,66\Omega$ e $10W$ de potência máxima nominal, através do circuito *data logger* da Subseção 3.6.2.

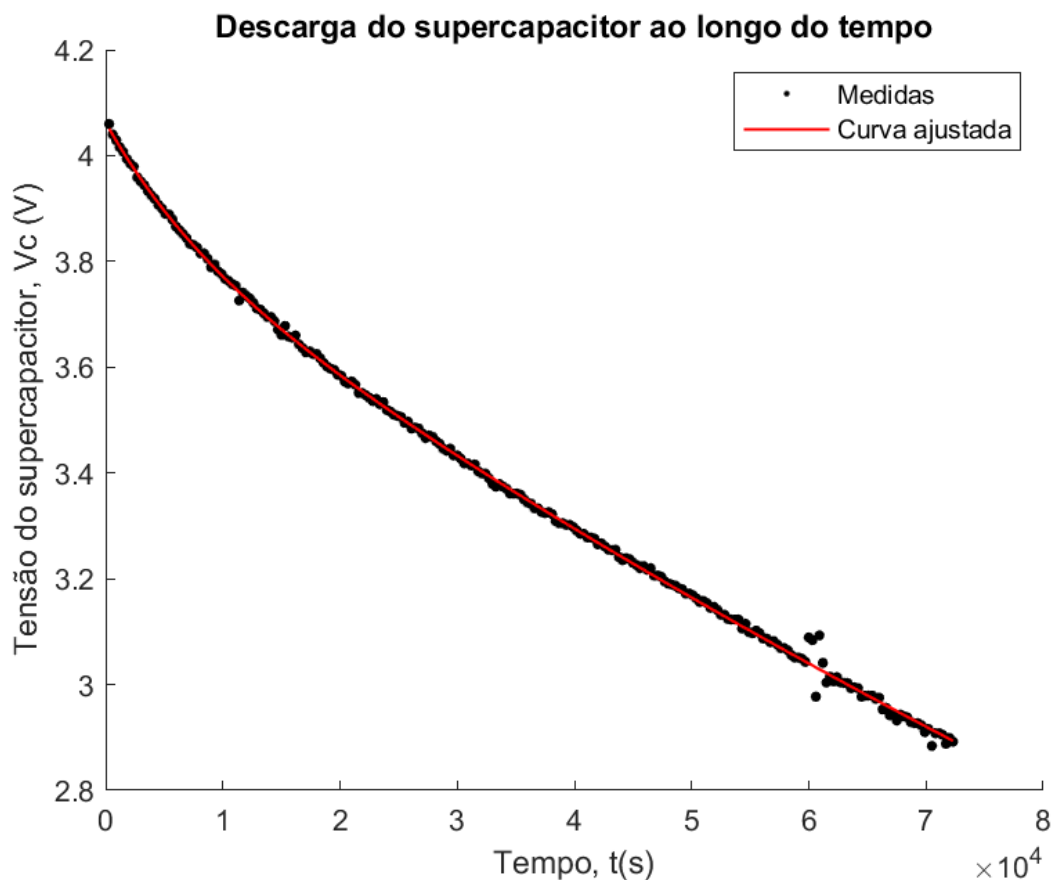
A partir de uma comparação direta entre (4) e (5), as expressões correspondentes às constantes A e B puderam ser determinadas, como apresenta (6) em forma de sistema.

$$V_c(t) = V_c(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (4)$$

$$f(t) = A \cdot \exp(Bt) \quad (5)$$

$$\begin{cases} A = V_c(0) = 3,9909 \\ B = -\frac{1}{RC} = -6,9096 \cdot 10^{-4} \end{cases} \quad (6)$$

Figura 25 – Gráfico com valores medidos de tensão do supercapacitor em aberto



Fonte: Autoria própria

Em (6) é apresentado, também, os valores obtidos para as constantes ao realizar o ajuste exponencial de uma curva sobre as medições. Uma vez que se sabe o valor da constante B e do resistor utilizado na análise, o valor obtido da capacitância efetiva do sistema pode ser representado de acordo com (7).

$$C = -\frac{1}{RB} = 149,76[F] \quad (7)$$

Uma vez que o valor da capacitância obtida em (7) está bem abaixo do valor indicado pelos valores nominais de capacitância fornecidos pelo fabricante, ocorre uma redução notável da quantidade de energia que pode ser armazenada no banco de supercapacitores, afetando diretamente o desempenho do sistema. Em vista disso, as estimativas de autonomia do sistema também foram realizadas utilizando parâmetros técnicos de um supercapacitor de fabricante reconhecido no mercado, como será detalhado em seção posterior.

4.1.2 Avaliação dos supercapacitores em aberto

O presente teste, que consistiu na medição da tensão do banco de supercapacitores em aberto, foi feito com o objetivo de verificar a quantidade de energia que o banco perde com

o passar do tempo, pois, como o banco é responsável por fornecer toda a energia necessária para o sistema quando não há incidência de luz solar, a perda de energia associada ao banco afeta o desempenho do sistema.

Com relação à Figura 25, o tempo de teste foi de aproximadamente 20 horas e 5 minutos. A potência média de fuga do supercapacitor foi obtida tomando-se dois valores de tensão, escolhidos nas extremidades da curva ajustada, e fazendo-se o uso de (1) e de (2). Considerando o valor de capacitância efetiva obtido na Subseção 4.1.1, o valor dessa potência resulta em 8,324mW.

Essa potência de fuga pode ser considerada grande, fazendo com que o supercapacitor não consiga armazenar energia por bastante tempo e, por consequência, não consiga alimentar o sistema por muito tempo. Isso possivelmente deve-se aos aspectos construtivos do supercapacitor utilizado, o qual acredita-se ser de baixa qualidade pelo fato serem de fabricação genérica, sem uma marca específica.

4.2 ENERGIA ÚTIL DO SISTEMA

Dentre os valores de tensão mencionados na Seção 3.3, o mais crítico em questão de impacto no comportamento do sistema é o VBAT_OK, valor de referência para disponibilizar tensão para a saída VOUT. Assim foi realizado, apenas para esse valor, um teste prático para verificar o valor real de VBAT_OK em comparação com o valor teórico. A Tabela 4 apresenta medições de valores de VBAT limiar para o qual VOUT era desligado.

Tabela 4 – Medições do teste de VBAT_OK.

Medição	VBAT (V)
1	2,900
2	2,900
3	2,910
4	2,885
5	2,885
média	2,896

Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, os valores utilizados nos cálculos desse trabalho são 2,896V para VBAT_OK e 4,066V para VBAT_OV. A partir dessa definição, foi possível continuar a análise de energia do banco de supercapacitores.

A energia total do banco foi calculada utilizando o valor nominal máximo de tensão que o banco pode suportar de 5,4V e o valor de 0V (completamente descarregado). Ao utilizar (1) o resultado obtido para a energia total foi de 2183,50J. Porém, o valor relevante para o sistema é a energia útil que deve ser calculada levando em consideração os valores de VBAT_OV (máximo valor que o banco de supercapacitores pode assumir antes do CJMCU parar o carregamento) e

VBAT_OK (mínimo valor que VBAT pode apresentar antes que VOUT seja desativado). Assim, o valor calculado de energia útil foi de 609,94J. Todos os cálculos de energia apresentados foram feitos considerando a capacitância efetiva encontrada na Subseção 4.1.1.

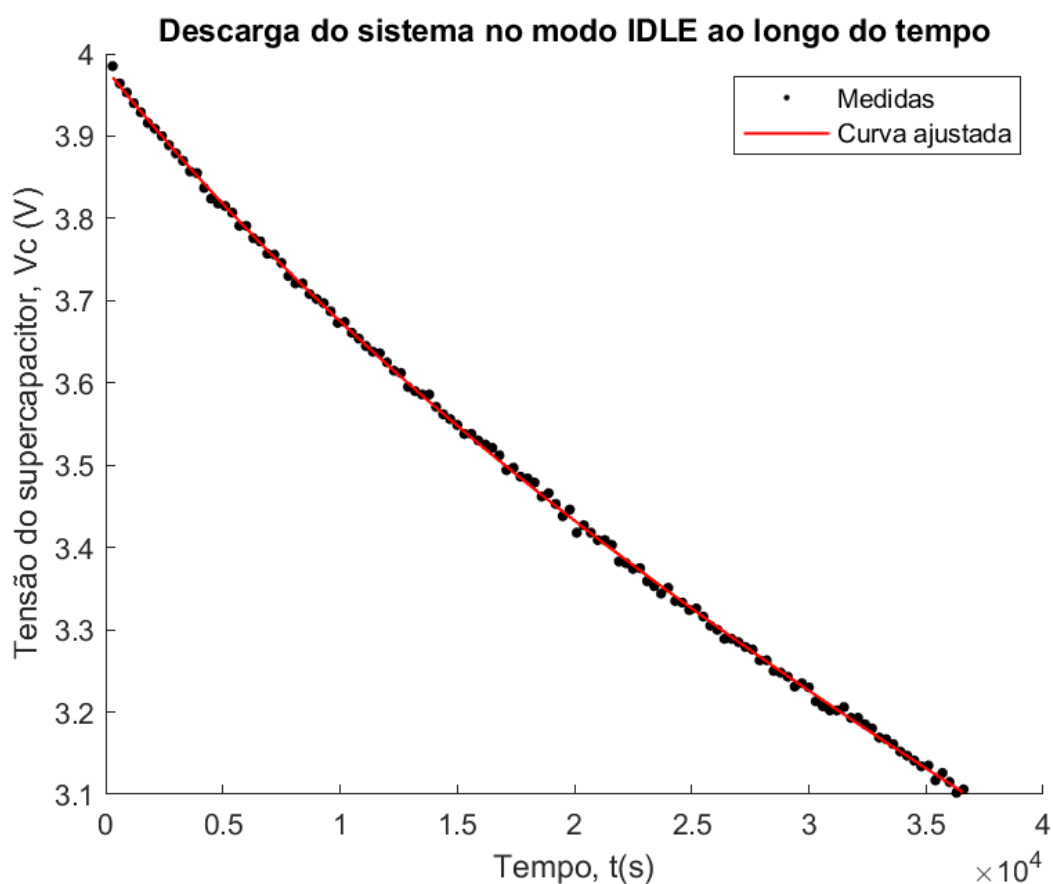
4.3 CONSUMO ENERGÉTICO

Os testes que dizem respeito ao consumo energético do sistema foram realizados com o objetivo de obter parâmetros associados ao consumo tanto na transmissão quanto com o sistema no modo IDLE a fim de estimar a autonomia do sistema.

4.3.1 Sistema em IDLE

Os valores de tensão do supercapacitor medidos no teste de descarga com o sistema operando no modo IDLE estão apresentados na Figura 26. Esse teste, como pode ser observado na figura, teve duração de aproximadamente 10 horas e 10 minutos. A potência média associada ao consumo em IDLE, calculada a partir dos valores do gráfico, foi de 12,13mW.

Figura 26 – Gráfico dos valores medidos de tensão do supercapacitor com o sistema em modo IDLE



Fonte: Autoria própria

Essa potência obtida leva em consideração tanto a potência média de fuga do capacitor quanto a potência de consumo dos demais componentes do sistema. Logo, subtraindo-se ela da potência média de fuga obtém-se o seguinte valor para a potência média de consumo do sistema em IDLE: 3,806mW.

O tempo com que o sistema permanece ligado em modo IDLE pode ser obtido calculando-se a razão entre a energia útil total do sistema e a potência mencionada de 12,13mW. Realizando-se essa conta, o tempo obtido é de aproximadamente 13 horas e 58 minutos.

4.3.2 Sistema transmitindo

A Tabela 5 apresenta o comportamento do sistema ao realizar os testes de transmissão de 100 pacotes de 16 *bytes* cada. Os resultados correspondem aos casos de teste apresentados na Tabela 3.

Tabela 5 – Consumo energético ao transmitir 100 pacotes.

Caso de teste	Tensão Inicial	Tensão Final	ΔE (J)	Energia por Byte (mJ/byte)
1	4,01	3,87	82,61	51,63
2	4,01	3,91	59,30	37,07
3	4,02	3,90	71,17	44,48
4	4,02	3,93	53,58	33,49

Fonte: Autoria Própria

A partir da ferramenta de cálculo de *air-time*, citada na Subseção 3.6.4.2, foi possível determinar que cada transmissão realizada com SF 10 demora 411,6ms segundos para ocorrer, enquanto as realizadas com SF 7 demoram 66,8ms

4.4 ESTIMATIVA DE AUTONOMIA DO SISTEMA

A partir dos resultados apresentados nas seções anteriores, foi realizada a análise, explicada na Subseção 3.6.4.2, para obter a estimativa do tempo de operação para o caso de funcionamento em regime, ou seja, quando seu funcionamento alterna entre estar transmitindo e em IDLE. Para fins de comparação, são apresentados resultados considerando ciclos de transmissão (Figura 23) a cada minuto e a cada hora.

Ao passo que os supercapacitores utilizados apresentaram um funcionamento incoerente com suas especificações, duas análises distintas foram realizadas. A primeira considera os capacitores aplicados ao circuito e outra considera parâmetros especificados em *datasheet* de um capacitor comercial de valor nominal semelhante à capacitância efetiva do banco utilizado.

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise considerando o banco de supercapacitores e os experimentos realizados para determinação da sua potência total de consumo em IDLE, a qual engloba a potência de consumo em IDLE e a potência de fuga.

Tabela 6 – Estimativa do tempo de operação para o caso real.

Caso de teste	Estimativa de operação (TX a cada 1 min.)	Estimativa de operação (TX a cada 1 hora)
1	06h33m36s	13h42m36s
2	07h42m00s	13h46m48s
3	07h05m24s	13h45m00s
4	08h01m48s	13h48m00s

Fonte: Autoria Própria

Ao selecionar o supercapacitor da Maxwell de 150F e 2,7V de especificação nominal, a máxima corrente de fuga informada é de $500\mu\text{A}$ (MAXWELL TECHNOLOGIES, 2018). A partir dessa informação, a potência de fuga pôde ser determinada através da manipulação da relação conhecida entre a corrente e tensão sobre um capacitor.

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (8)$$

$$\Delta t = \frac{C}{I} \Delta V \quad (9)$$

Ao considerar que a corrente de fuga informada é constante, a relação de (8) pode ser reescrita, isolando a diferença de tempo, na forma de (9). Aplicando a diferença de tempo em (2) combinada à (1), e utilizando-se o valor nominal de 150F em conjunto com os mesmos parâmetros de tensão VBAT_OV e VBAT_OK do caso real, obteve-se a potência de fuga estimada para o caso hipotético, de 1,7405mW.

$$P_{AVG_IDLE_total} = P_{AVG_fuga} + P_{AVG_IDLE} \quad (10)$$

Ao aplicar este valor em (10), foi possível estimar para o caso hipotético sua potência total de consumo em IDLE, a partir da sua potência de fuga e considerando o mesmo valor da potência de consumo em IDLE da Subseção 4.3.1, resultando em uma potência equivalente à 5,5462mW.

Aplicando os resultados obtidos para o capacitor hipotético na mesma análise dos capacitores aplicados no circuito, foram estimados seus tempos de operação, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Estimativa do tempo de operação para o caso hipotético.

Caso de teste	Estimativa de operação (TX a cada 1 min.)	Estimativa de operação (TX a cada 1 hora)
1	08h47m24s	29h20m24s
2	10h58m48s	29h40m12s
3	09h45m00s	29h30m00s
4	11h42m36s	29h45m00s

Fonte: Autoria Própria

4.5 CAPTAÇÃO DE ENERGIA DO SISTEMA

Com a finalidade de obter o tempo necessário para carregar completamente o banco de supercapacitores, foram realizados os testes de carregamento do sistema, descritos na Subseção 3.6.5. A seguir, a Tabela 8 apresenta os valores obtidos com as medições realizadas no dia de teste (26/07/2021).

Tabela 8 – Medição do teste de carregamento do sistema.

	Horário Inicial	Horário Final	Tensão Inicial (V)	Tensão Final (V)	ΔV (V)	ΔE (J)	Potência Média (mW)
1	10:00	10:30	3,350	3,555	0,205	105,995	58,89
2	12:00	12:30	3,290	3,545	0,255	130,510	72,51
3	14:00	14:30	3,290	3,550	0,260	133,167	73,98
4	16:00	16:30	3,280	3,505	0,225	114,314	63,51

Fonte: Autoria Própria

De acordo com a tabela, é possível notar que os maiores valores de potência obtidos foram dos horários correspondentes mais próximos do meio dia, horário com a maior incidência solar. O valor calculado para a média de potência diária, referente a faixa de horário das 10:00 às 16:30, foi de 67,22mW.

Considerando o valor já apresentado da energia útil do banco de 609,94J, pode-se calcular, através de (3), o tempo necessário para carregar completamente o banco de supercapacitores. Esse valor resulta em 9073,769s que representam, aproximadamente, 2 horas e 32 minutos.

5 CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos através dos experimentos realizados comprova a viabilidade de funcionamento do sistema mesmo em dias com pouca incidência solar. Ademais, operar o sistema de armazenamento com supercapacitores ao invés da solução tradicional com baterias eletroquímicas se demonstrou possível.

Mesmo considerando os aspectos de baixa qualidade dos capacitores envolvidos nos testes, o sistema apresenta autonomia de operação de cerca de 13 horas, transmitindo pacotes a cada hora. Esse tempo pode ser considerado minimamente suficiente para manter o sistema alimentado durante o período da noite, em que não há luz solar. Já ao considerar as especificações de um capacitor comercial, essa autonomia aumenta para cerca de 29 horas, possibilitando o sistema operar durante um período noturno inteiro e mais um diurno com sol totalmente encoberto.

Os painéis solares utilizados são capazes de carregar o sistema por completo em poucas horas, permitindo que este funcione por mais um período de 13 horas mesmo em dias com incidência solar intermitente, desde que em sua totalidade os períodos com sol somem cerca de 2 horas e 30 minutos.

Nota-se que a autonomia do sistema é fortemente associada à periodicidade das transmissões, devido ao fato que essa operação consome muito mais energia em relação à operação em IDLE, como evidenciado nas tabelas da Seção 4.4.

Através do tempo de autonomia resultante das análises realizadas neste trabalho, aliada à utilização da tecnologia LoRa para a transmissão de dados, considera-se que a solução pode ser aplicada em ambientes rurais remotos sem cobertura da rede móvel.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

De maneira a complementar o escopo deste trabalho, algumas etapas adicionais podem ser levantadas. A prova de conceito da solução poderia ser aplicando-a em regiões rurais, com as condições de contorno especificadas, durante um período longo e avaliando possíveis obstáculos e imprevistos não previamente considerados. Adicionalmente, há a validação prática da solução levantada utilizando supercapacitores de melhor qualidade, possibilitando atingir tempos de autonomia de operação maiores.

Outra etapa adicional consiste no desenvolvimento de uma plataforma (móvel ou *web*) de interface amigável, a qual deve realizar requisições ao banco de dados da rede, citado na Subseção 3.5.2, e apresentar os alarmes de modo a facilitar a visualização das informações pelo usuário final.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desse trabalho foi uma oportunidade de aplicar os conhecimentos aprendidos ao longo do curso. Algumas áreas do conhecimento foram essenciais para a elaboração deste projeto, como transmissão sem fio, sistemas embarcados e eletrônica básica. Além disso, houve a oportunidade de adquirir conhecimentos a respeito de tópicos complementares, como energia renovável, as estruturas dos painéis solares e as propriedades dos supercapacitores.

Referências

- ALCANTUD, M. B.; ROSA, P. R. Aplicação de redes de sensores sem fio na agricultura de precisão: Uma reflexão teórica. In: **Colloquium Exactarum**. [S.l.: s.n.], 2017. v. 9, p. 36–41. Citado na página 14.
- ALEXANDER, C.; SADIKU, M.; NASCIMENTO, J. D. **Fundamentos De Circuitos Elétricos**. [S.l.]: MCGRAW HILL - ARTMED, 2013. ISBN 9788580551723. Citado na página 46.
- BENTEM, A. v. **Airtime calculator for LoRaWAN**. 2020. Disponível em: <<https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/au915/16>>. Acesso em: 11 de agosto de 2021. Citado na página 43.
- BERRUETA, A. et al. Supercapacitors: Electrical characteristics, modeling, applications, and future trends. **IEEE Access**, v. 7, p. 50869–50896, 2019. Citado na página 19.
- CJMCU. **CJMCU-2557**. 2018. Disponível em: <<https://github.com/Edragon/Datasheet/blob/master/TI/CJMCU-2557.pdf>>. Acesso em: 10 de agosto de 2021. Citado na página 27.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP-IDF Programming Guide API Reference**. 2021. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/index.html>>. Acesso em: 12 de agosto de 2021. Citado na página 34.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series**. [S.l.], 2021. Versão: v3.7. Citado na página 23.
- GALDINO, M.; PINHO, J. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- HASSANALIERAGH, M. et al. Solar-supercapacitor harvesting system design for energy-aware applications. In: **2014 27th IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 280–285. Citado na página 18.
- HELTEC AUTOMATION. **WIFI LoRa 32 (v2)**. 2021. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>>. Acesso em: 04 de agosto de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 33.
- LIN, E. R. **LoRa protocol. Evaluations, limitations and practical test**. Dissertação (Mestrado) — Universitat Politècnica de Catalunya, 2016. Citado na página 21.
- LORA DEVELOPER PORTAL. **What are LoRa® and LoRaWAN®?** 2021. Disponível em: <<https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2021. Citado na página 22.
- MAIER, A.; SHARP, A.; VAGAPOV, Y. Comparative analysis and practical implementation of the esp32 microcontroller module for the internet of things. In: **2017 Internet Technologies and Applications (ITA)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 143–148. Citado na página 22.
- MARTINS, K. F.; RUBIN, J. C.; LONGHIN, S. R. Impactos ao meio ambiente e a saúde decorrentes do descarte de pilhas e baterias portáteis em goiânia–goiás. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, v. 15, n. 27, 2018. Citado na página 14.
- MAXWELL TECHNOLOGIES. **2.7V 1F, 100F, 150F ULTRACAPACITOR CELL**. [S.l.], 2018. Document number: 1013793.10. Citado na página 51.

PETRARIU, A. I. et al. Hybrid power management system for lora communication using renewable energy. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 10, p. 8423–8436, 2021. Citado na página 14.

PIMENTEL, D. et al. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 84, n. 1, p. 1–20, 2001. ISSN 0167-8809. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016788090000178X>>. Citado na página 15.

RIBEIRO, L. E. et al. Comparison between lora and nb-iot coverage in urban and rural southern brazil regions. **Annals of Telecommunications**, v. 75, n. 11, p. 755–766, Dez 2020. ISSN 1958-9395. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12243-020-00774-3>>. Citado na página 21.

SANISLAV, T. et al. Energy harvesting techniques for internet of things (iot). **IEEE Access**, PP, p. 1–1, 03 2021. Citado na página 14.

SEMTECH. **SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver**. [S.l.], 2020. Rev. 7. Disponível em: <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276#download-resources>>. Acesso em: 15 de julho de 2021. Citado na página 22.

SINGH, M. et al. Efficient autonomous solar energy harvesting system utilizing dynamic offset feed mirrored parabolic dish integrated solar panel. In: **2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1825–1829. Citado na página 17.

SOLOMON SYSTECH. **SSD1306 – Advance Information 128 x 64 Dot Matrix OLED / PLED Segment / Common Driver with Controller**. [S.l.], 2008. Rev. 1.1. Disponível em: <[https://resource.heltec.cn/download/oled/SSD1306-Revision_1.1_\(Charge_Pump\).pdf](https://resource.heltec.cn/download/oled/SSD1306-Revision_1.1_(Charge_Pump).pdf)>. Acesso em: 31 de julho de 2021. Citado na página 34.

TEXAS INSTRUMENTS. **bq25570 nano power boost charger and buck converter for energy harvester powered applications**. [S.l.], 2019. Rev. G. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 30.

THE THINGS NETWORK. **Frequency Plans**. 2021. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans/>>. Acesso em: 05 de agosto de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 42.

THE THINGS NETWORK. **Network Architecture**. 2021. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/network/architecture/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 32.

THE THINGS NETWORK. **Single-channel gateways**. 2021. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/start/single-channel/>>. Acesso em: 05 de agosto de 2021. Citado na página 35.

Apêndices

APÊNDICE A – Seções do código implementado para o dispositivo nó transmissor

Figura 27 – Função-exemplo da abstração ao enviar pacotes LoRa.

```

99
100 bool LoRa_SendMessageToApplication()
101 {
102     char packetStr[100] = "";
103     LoRa_MakePayloadMsg(packetStr);
104
105     if(!LoRa_SendPacket((uint8_t *)packetStr, strlen(packetStr)))
106     {
107         ESP_LOGE(TAG, "Failed to send message to application!");
108         return false;
109     }
110
111     ESP_LOGI(TAG, "SENT: %s", packetStr);
112     return true;
113 }

```

Fonte: A autoria própria

Figura 28 – Configuração dos casos que podem acordar o sistema.

```

76
77 /**
78  * @brief Config wake up sources
79  *
80  * @param microsecondsToWakeUp
81  */
82 static void SetWakeUpConfig(uint64_t microsecondsToWakeUp)
83 {
84     // Set wake up pin and enable INT GPIO wakeup (ext0)
85     esp_sleep_enable_ext0_wakeup(GPIO_NUM_0, WAKE_ON_LOW_LEVEL);
86
87     // Set wake up by timer
88     if(microsecondsToWakeUp != NO_TIMER_WAKEUP)
89         esp_sleep_enable_timer_wakeup(microsecondsToWakeUp);
90 }
91

```

Fonte: A autoria própria

Figura 29 – Identificação das razões de wake e montagem do pacote de envio.

```
192
193 static void LoRa_MakePayloadMsg(char *strPayload)
194 {
195     if(strPayload == NULL)
196     {
197         ESP_LOGE(TAG, "Failed to set payload message");
198         return;
199     }
200
201     // Get current battery voltage
202     uint32_t vBat = ADC_GetVoltage();
203
204     // Check last reset reason
205     esp_reset_reason_t resetReason = esp_reset_reason();
206     if(resetReason != ESP_RST_DEEPSLEEP)
207     {
208         ESP_LOGI(TAG, "Normal boot. Keep-alive message.");
209         sprintf(strPayload, "%d|%u|", MSG_TYPE_KEEP_ALIVE, vBat);
210         return;
211     }
212
213     // Check last wake-up reason
214     esp_sleep_wakeup_cause_t wakeUpReason = esp_sleep_get_wakeup_cause();
215     switch(wakeUpReason)
216     {
217         case ESP_SLEEP_WAKEUP_TIMER:
218             ESP_LOGI(TAG, "Timer wakeup. Keep-alive message.");
219             sprintf(strPayload, "%d|%u|", MSG_TYPE_KEEP_ALIVE, vBat);
220             break;
221         case ESP_SLEEP_WAKEUP_EXT0:
222             ESP_LOGI(TAG, "Ext GPIO wakeup. Alarm message.");
223             sprintf(strPayload, "%d|%u|", MSG_TYPE_INFORM_PIN, vBat);
224             break;
225         default:
226             ESP_LOGE(TAG, "Failed to set payload message because of unexpected wake-up reason");
227             break;
228     }
229 }
```

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B – Seção do código implementado para o dispositivo gateway

Figura 30 – Trecho de arquivo de configuração do código do *gateway*.

```

ESP-sc-gway - configGway.h | Arduino 1.8.13
Arquivo  Editar  Sketch  Ferramentas  Ajuda
Carregar
configGway.h$  _WiFi  _gatewayMgt  _loraFiles  _loraModem  _oLED  _otaServer  _repeater  _sensor

// Define the frequency band the gateway will listen on. Valid options are
// EU863_870  Europe
// US902_928  North America
// AU915_928  Australia
// CN470_510  China
// IN865_867  India
// CN779-787  (Not Used!)
// EU433     Europe
// AS923     (Not Used)
// You can find the definitions in "loraModem.h" and frequencies in
// See https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans.html
#define AU915_928

// Define the CLASS mode of the gateway
// A: Baseline Class
// B: Beacon/Battery Class
// C: Continuous Listen Class
#define _CLASS "A"

// Define whether to use the old Semtech gateway API, which is still supported by TTN,
// but is more lightweight than the new TTN tcp based protocol.
// NOTE: Only one of the two should be defined! TTN Router project has stopped
//
#define _UDPROUTER 1
// #define _TTNROUTER 1

#if !defined _CHANNEL
# define _CHANNEL 9
#endif

// The spreading factor is the most important parameter to set for a single channel
// gateway. It specifies the speed/datarate in which the gateway and node communicate.
// As the name says, in principle the single channel gateway listens to one channel/frequency
// and to one spreading factor only.
// This parameters contains the default value of SF, the actual version can be set with
// the webserver and it will be stored in SPIFF
// NOTE: The frequency is set in the loraModem.h file and is default 868100000 Hz.
#if !defined _SPREADING
# define _SPREADING SF9
#endif

```

Fonte: Aatoria própria

APÊNDICE C – Interface e exemplo de requisição de dados da The Things Network

Figura 31 – Filtros adicionais para requisições e estrutura da resposta.

query/{device-id} Show/Hide List Operations Expand Operations

GET /api/v2/query/{device-id} Query data for a specific device

Implementation Notes
Query the data for a specific device

Response Class (Status 200)
An array of data

Model **Example Value**

```
[
  {
    "device_id": "string",
    "raw": "string",
    "time": "string",
    "field1": "string",
    "field2": "string"
  }
]
```

Response Content Type application/json

Parameters

Parameter	Value	Description	Parameter Type	Data Type
device-id	(required)	The ID of the device for which we want to get the data	path	string
last		Duration on which we want to get the data (default 1h). Pass 30s for the last 30 seconds, 1h for the last hour, 2d for the last 48 hours, etc	query	string

[Try it out!](#)

Fonte: A autoria própria

Figura 32 – Exemplo de uma resposta tratada pelo *script* Python.

RAW JSON ANSWER:

```
[
  {
    "device_id": "tkw-nodel",
    "raw": "SGVsbG8sIHdvcmxkIQ==",
    "time": "2021-02-17T02:36:50.428235912Z"
  }
]
```

RAW DATA: SGVsbG8sIHdvcmxkIQ==

DECODED DATA: Hello, world!

Fonte: A autoria própria