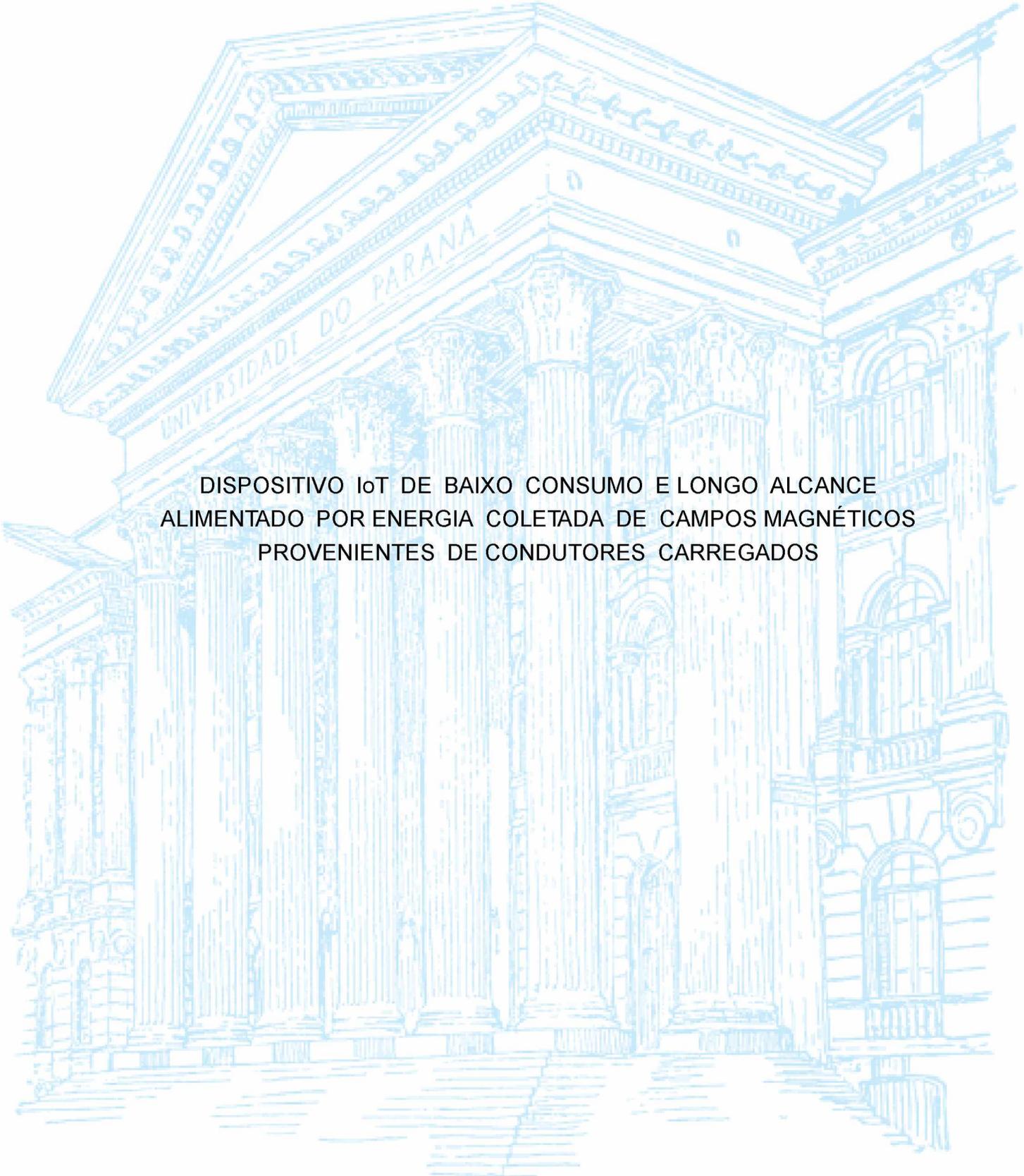


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL DA SILVA FERRAZ



DISPOSITIVO IoT DE BAIXO CONSUMO E LONGO ALCANCE
ALIMENTADO POR ENERGIA COLETADA DE CAMPOS MAGNÉTICOS
PROVENIENTES DE CONDUTORES CARREGADOS

Curitiba

2023

RAFAEL DA SILVA FERRAZ

DISPOSITIVO IoT DE BAIXO CONSUMO E LONGO ALCANCE ALIMENTADO
POR ENERGIA COLETADA DE CAMPOS MAGNÉTICOS PROVENIENTES DE
CONDUTORES CARREGADOS

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Horacio Tertuliano dos Santos Filho, PhD.

Curitiba

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Ferraz, Rafael da Silva

Dispositivo IOT de baixo consumo e longo alcance alimentado por energia coletada de campos magnéticos provenientes de condutores carregados / Rafael da Silva Ferraz. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Horacio Tertuliano dos Santos Filho

1. Campos magnéticos. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Engenharia Elétrica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Santos Filho, Horacio Tertuliano dos. IV. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **RAFAEL DA SILVA FERRAZ** intitulada: **DISPOSITIVO IoT DE BAIXO CONSUMO E LONGO ALCANCE ALIMENTADO POR ENERGIA COLETADA DE CAMPOS MAGNÉTICOS PROVENIENTES DE CONDUTORES CARREGADOS**, sob orientação do Prof. Dr. HORACIO TERTULIANO DOS SANTOS FILHO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 28 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica

05/06/2023 15:22:05.0

HORACIO TERTULIANO DOS SANTOS FILHO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

08/05/2023 22:14:09.0

PAULO HENRIQUE PORTELA DE CARVALHO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)

Assinatura Eletrônica

10/05/2023 13:38:31.0

EVELIO MARTÍN GARCÍA FERNÁNDEZ
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/05/2023 13:36:47.0

PAULO CESAR PELLANDA
Avaliador Externo (INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA,
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - RJ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador, Prof. PhD. Horacio Tertuliano, pela orientação e o companheirismo nesta longa caminhada. Aos vários colegas que conheci durante todos esses anos de UFPR, em especial, Raiff Sales, Ana Paula Torres e Cláudio Bastos e Sóstenes Oliveira tendo papel fundamental no sucesso deste trabalho de pesquisa. A minha mãe, Marta Gonçalves, por toda a ajuda e por sempre me incentivar a insistir mesmo nos momentos mais difíceis. O meu muito obrigado também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por todo o suporte financeiro, sem o qual não teria sido viabilizado este trabalho de pesquisa.

"Quanto mais alto voamos, menores parecemos aos olhos daqueles que não sabem voar."

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de dispositivo IoT autossuficiente, que utiliza energia coletada de campo magnético como fonte de energia principal e tecnologia de comunicação LoRa. A abordagem adotada é inovadora, uma vez que dispensa o uso de sistemas ativos de gerenciamento de energia, fazendo uso apenas de um super capacitor como redundância de energia e conversores CC-CC para adequação dos níveis de tensão. Os resultados da pesquisa demonstraram que o protótipo se apresentou como uma alternativa promissora, comprovando sua capacidade de manter-se em funcionamento por mais de 20 dias, mesmo em condições prolongadas de interrupção da fonte de energia. A utilização de dispositivos mais eficientes e autônomos tem se tornado cada vez mais relevante, sobretudo em locais remotos ou em condições adversas, visando à redução da necessidade de substituição de baterias ou até mesmo o seu uso. Dessa forma, o estudo apresentado neste trabalho contribui significativamente para o avanço de dispositivos IoT mais eficientes, autônomos e economicamente viáveis, com grande potencial de aplicação em diversos contextos comerciais e industriais. As descobertas obtidas nesse estudo podem ser úteis para futuras pesquisas e estudos na área de IoT e fontes alternativas de energia.

Palavras-chave: Energia Coletada, Energia de Campos Magnéticos, IoT.

ABSTRACT

The present study aims to develop a prototype of a self-sufficient IoT device that uses magnetic field-collected energy as the main energy source and LoRa communication technology. The approach adopted is innovative as it eliminates the need for active energy management systems, using only a supercapacitor as energy redundancy and CC-CC converters for voltage level adjustment. The research results demonstrated that the prototype presented itself as a promising alternative, proving its ability to remain operational for more than 20 days, even under prolonged conditions of energy source interruption. Furthermore, using more efficient and autonomous devices has become increasingly relevant, especially in remote locations or adverse conditions, aiming to reduce the need for battery replacement or even their use. Thus, the study presented in this work contributes significantly to the advancement of more efficient, autonomous, and economically viable IoT devices, with great potential for application in various commercial and industrial contexts. The findings obtained in this study may be helpful in future research and studies in IoT and alternative energy sources.

Keywords: IoT, Harvested Energy, Energy from Magnetic Fields.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Previsão global de mercado de IoT para 2025.	15
Figura 2 – Alcance do sinal das principais tecnologias sem fio.	16
Figura 3 – Comparação entre técnicas de captação de energia existentes.	20
Figura 4 – Arquitetura básica de rede LoRaWAN e exemplos de aplicação.	24
Figura 5 – Campo fora e dentro de um fio, gerado por sua corrente.	30
Figura 6 – Diagrama elétrico simplificado de um coletor de campo magnético.	31
Figura 7 – Coletor de energia fixado em condutores de linhas de transmissão.	31
Figura 8 – Diagrama elétrico simplificados de um TC.	34
Figura 9 – Circuito simplificado de um TC.	35
Figura 10 – Diagrama e operação do circuito dobrador de tensão em onda completa.	37
Figura 11 – Tensão durante carga e descargas de baterias e super capacitores.	38
Figura 12 – Operação básica de conversores $CC-CC$ elevador e rebaixador de tensão.	41
Figura 13 – Funcionamento dos fusíveis rearmáveis.	42
Figura 14 – Princípio básico de operação de uma Carga Eletrônica.	43
Figura 15 – Gráfico da região triodo dos MOSFETs.	44
Figura 16 – (a) Uma forma de onda linear de <i>chirp</i> crescente. (b) Sinal no domínio da frequência com <i>chirp</i> crescente.	45
Figura 17 – Símbolos transmitidos em modulação LoRa em SF2.	46
Figura 18 – Espectrograma de uma transmissão LoRa.	46
Figura 19 – Composição do pacote LoRa.	48
Figura 20 – Topologia da estrutura construída para a pesquisa.	51
Figura 21 – Modelos de TCs inicialmente testados da fabricante YHDC.	52
Figura 22 – Diagrama interno dos TCs com saída de tensão.	53
Figura 23 – Diagrama interno dos TCs com saída de corrente.	53
Figura 24 – Diagrama interno dos TCs com saída de corrente.	54
Figura 25 – Diagrama elétrico do teste aplicado ao TC coletor de campo magnéticos.	55
Figura 26 – Transformador aparelho micro-ondas modificado e utilizado.	55
Figura 27 – Múltiplas espiras através do núcleo do TC coletor de campo magnético.	56
Figura 28 – Diagrama elétrico da carga eletrônica.	56
Figura 29 – Diagrama de resposta em frequência do filtro passa baixas passivo.	58
Figura 30 – Circuito gerador de tensão negativa.	58
Figura 31 – Carga eletrônica construída e utilizada para o trabalho de pesquisa.	59
Figura 32 – Amperímetro medindo uma bobina com 10 voltas de fio.	60
Figura 33 – Bobina com 10 espiras sendo colocada dentro núcleo magnético aberto antes dos testes.	61

Figura 34 – Resultado da potência obtida do TC 500A/5A atuando como coletor de campos magnéticos.	62
Figura 35 – Diagrama de blocos básico do sistema desenvolvido.	63
Figura 36 – Fluxograma da Fonte de Alimentação com redundância de energia. . .	63
Figura 37 – Resultado do teste da bateria 3,6 V e 200 mA.	64
Figura 38 – Gráfico do teste da bateria Li-Ion de 3,6 V e 2000 mA, ao ser demandada 500 mA.	66
Figura 39 – Fluxograma da Fonte de Alimentação com super capacitor.	67
Figura 40 – Diagrama do circuito dobrador de tensão de onda completa simulado e testado.	68
Figura 41 – Ensaio de queda de tensão nos diodos 1N4007 e 1N5822.	69
Figura 42 – Diagrama elétrico de operação do circuito integrado TL431.	70
Figura 43 – Simulação do circuito construído para regular e limitar a tensão. . . .	70
Figura 44 – Diagrama elétrico recomendado pelo fabricante e o gráfico de eficiência. 72	
Figura 45 – Diagrama elétrico recomendado pelo fabricante e o gráfico de eficiência. 73	
Figura 46 – Resultado do teste da tensão do super capacitor e da atuação do elevador de tensão sob demanda de 100 mA.	73
Figura 47 – Fluxograma da fonte de alimentação com ajustes de tensão.	74
Figura 48 – Modelos comerciais de fusíveis rearmáveis.	74
Figura 49 – Diagrama de blocos detalhando toda a fonte de alimentação construída. 75	
Figura 50 – Imagem do ESP32 com funcionalidade disponível em cada pino.	75
Figura 51 – Separação entre a camada de modulação e a camada de aplicação como o LoRaWan.	76
Figura 52 – Placa de saque rápido para testes em campo com os módulos LoRa. . .	77
Figura 53 – Interface do <i>software</i> fornecido pela Semtech Corporation para cálculo de enlaces LoRa e LoRaWan.	77
Figura 54 – Interface <i>software</i> com resultados para situação de apenas preâmbulo e carga de dados.	78
Figura 55 – Método de medição de corrente.	79
Figura 56 – Medida feita para o transceptor LoRa Ebyte E32 433T30D(TTL-1W). 80	
Figura 57 – Super capacitores 500 F e 100 F, ambos 2,7 V.	82
Figura 58 – Tensão no super capacitor de 100 F ao ser demanda 500 mA.	83
Figura 59 – Tensão no super capacitor de 500 F ao ser demanda 500 mA.	83
Figura 60 – Imagem do protótipo construído.	85
Figura 61 – Antenas utilizadas para os testes de alcance.	88
Figura 62 – Percursos utilizados para os testes.	89
Figura 63 – Tempo e consumo de corrente do dispositivo em cada modo de operação. 92	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de potências entre as técnicas de coleta de energia.	21
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens entre as técnicas de captação de energia. . .	22
Tabela 3 – Trabalhos utilizando coletores de campos magnético fixado em cabos. .	32
Tabela 4 – Características técnicas de cada modelo de TC.	52
Tabela 5 – Características técnicas dos TCs para medição de 300 A e 500 A. . . .	54
Tabela 6 – Dados técnicos fornecidos pelos fabricantes das baterias.	64
Tabela 7 – Características técnicas das baterias adquiridas.	65
Tabela 8 – Resultados dos testes para cada uma das baterias.	66
Tabela 9 – Comparativo entre capacidades e densidades de energia com dados nominais e de testes.	67
Tabela 10 – Modelos transceptores LoRa e suas características técnicas.	77
Tabela 11 – Resultados dos testes aplicados ao super capacitores demandados 500 mA.	83
Tabela 12 – Comparativo entre dados nominais e dados a partir de testes.	84
Tabela 13 – Resultados das medições de consumo dos módulos de rádio LoRa. . . .	87
Tabela 14 – Características nominais das antenas utilizadas para os testes de alcance.	89
Tabela 15 – Alcance máximo de sinal dos módulos LoRa para variados modelos de antenas.	90
Tabela 16 – Resultado comparativo entre o alcance de sinal e o consumo de energia.	91
Tabela 17 – Energia consumida por segundo no protótipo para cada tipo de antena.	91

SUMÁRIO

I	INTRODUÇÃO	13
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	A tecnologia IOT	15
1.1.1	Comunicação sem fio de dispositivos IOT	16
1.1.2	Alimentação de dispositivos IOT	17
1.2	Energia coletada	19
1.2.1	Energia coletada de campos magnéticos	21
1.3	Tecnologias de comunicação LoRa	23
1.4	Dispositivos IOT em sistemas de alta potência	25
1.5	Objetivos	26
1.5.1	Objetivos gerais	26
1.5.2	Objetivos específicos	26
1.6	Estrutura do Trabalho	27
II	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Coletores de campo	29
2.1.1	Coletores magnéticos	30
2.1.2	Transformadores de corrente	33
2.2	Circuitos e eletrônica	36
2.2.1	Circuitos multiplicadores de tensão	36
2.2.2	Super capacitores	38
2.2.3	Conversores	40
2.2.4	Fusíveis rearmáveis	42
2.2.5	Carga eletrônica	43
2.3	LoRa para IOT	45
2.3.1	Características da tecnologia LoRa	45
2.3.2	Pacote de dados do protocolo LoRa	47
2.3.3	Vantagens da tecnologia LoRa	48
III	METODOLOGIA	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	Proposta de Arquitetura	51

3.2	Simulação do Campo Magnético	51
3.2.1	Transformadores de corrente comerciais	51
3.2.2	Metodologia de testes aplicados ao coletor de campo	54
3.2.3	Transformadores de corrente como coletor de campos magnéticos	59
3.3	Construção da fonte	62
3.3.1	Redundância na fonte	63
3.3.2	Ajustes de tensão	67
3.3.2.1	Dobrador de tensão	68
3.3.2.2	Conversores CC-CC	71
3.3.3	Segurança	74
3.4	Avaliação dos módulos LoRa	75
3.4.1	Modelos dos módulos LoRa	76
3.4.2	Parametrização dos módulos LoRa	77
3.4.3	Consumo de energia	79
IV	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1	Análise de desempenho do super capacitor	82
4.2	Construção do protótipo	85
4.3	Consumo de energia dos módulos LoRa	87
4.3.1	Alcance dos módulos LoRa	88
4.4	Autonomia do protótipo	90
4.5	Discussões dos resultados	92
5	CONCLUSÃO	94
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	95
	Referências	97

Parte I

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A implantação de sensores IoT (Internet das Coisas) na infraestrutura elétrica, tanto nas linhas de transmissão como nas de distribuição, vem sendo reconhecida como uma necessidade crescente no setor elétrico. Esses dispositivos de sensoriamento são capazes de fornecer informações precisas sobre o desempenho das linhas, tais como temperatura, tensão, corrente e outras variáveis críticas. A disponibilidade desses dados permite aos operadores de redes elétricas tomar decisões mais assertivas e precisas em relação à manutenção preventiva, previsão de falhas e otimização do desempenho geral da rede.

Além disso, os sensores IoT instalados nas linhas de transmissão também podem auxiliar na detecção de condições anormais, tais como sobrecargas ou falhas de isolamento, as quais podem resultar em interrupções no fornecimento de energia. Desse modo, a utilização desses sensores na infraestrutura elétrica pode contribuir significativamente para o aumento da confiabilidade e eficiência das redes elétricas.

Contudo, a utilização de sensoriamento nos sistemas de distribuição de energia elétrica é acompanhada por uma série de desafios relacionados à sua efetivação. Um desses desafios se refere à localização remota e inacessível das linhas de transmissão, o que dificulta a instalação e manutenção de dispositivos de monitoramento. Dessa forma, é necessário buscar tecnologias confiáveis de comunicação de longo alcance e sistemas com alta autonomia energética para superar essas dificuldades.

Para enfrentar esses obstáculos, é essencial contar com tecnologias que permitam a transmissão de dados a longas distâncias, sem comprometer a confiabilidade das informações obtidas. Além disso, é preciso garantir que os dispositivos de monitoramento tenham alta eficiência energética, para que possam operar por longos períodos sem a necessidade de manutenção constante.

Em suma, a aplicação de sensoriamento nos sistemas de distribuição de energia elétrica é um desafio técnico que requer o desenvolvimento de soluções inovadoras para superar as dificuldades impostas. A busca por tecnologias de comunicação de longo alcance confiáveis e sistemas com alta autonomia energética é fundamental para garantir o sucesso dessa empreitada.

Este capítulo introdutório tem como propósito apresentar os principais conceitos relacionados aos meios que permitem a implantação de tecnologias IoT no contexto das linhas de transmissão, abrangendo desde os procedimentos de coleta até as diferentes tecnologias de comunicação sem fio empregadas para efetuar a transferência de dados. Ademais, ao término, são enunciados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

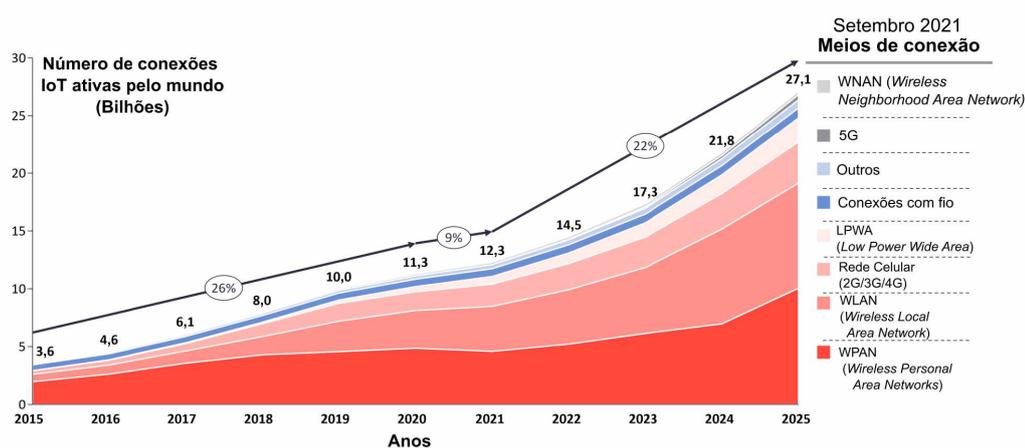
1.1 A TECNOLOGIA IoT

A Internet das Coisas pode ser definida como uma rede de objetos físicos eletrônicos embarcados com sensores, *softwares* e outras tecnologias conectadas pela internet.

O primeiro uso documentado da frase “*Internet of Things*” é citado por Kevin Ashton em 1999 durante uma apresentação na Procter & Gamble (P&G) (Weber e Weber (2010), Sundmaeker et al. (2010), Ashton et al. (2009)). Na apresentação, Ashton correlacionou o novo conceito de *RFID Radio-Frequency Identification* usado na cadeia de suprimentos da P&G a tópicos envolvendo a conexão com a internet (Ashton et al. (2009)). Na sequência, Ashton viria a criar no MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts) o Auto-ID Center, que hoje é um grupo de pesquisa no campo da identificação de radiofrequências em rede, bem como de tecnologias emergentes. Tais laboratórios, nos dias atuais, estão sediados em sete universidades, localizadas em quatro continentes diferentes.

Objetos físicos inteligentes são as “coisas” na IoT, compostos por vários sensores, tais como GPS (*Global Positioning System*) para posicionamento, sensores de proximidade, detecção de parâmetros ambientais, conectividade de rede para transferência de dados, dentre outros recursos. As aplicações de IoT estão em contínuo processo de crescimento nos mais diversos campos da atividade humana, tal como resumido na Figura 1.

Figura 1 – Previsão global de mercado de IoT para 2025.



Fonte: Adaptado de Sinha (2021).

Conforme apresentado pela empresa de análises de mercado *IoT Analytics*, houve um crescimento de 9 % no número de dispositivos conectados entre os anos de 2020 e 2021, alcançando um total de 12,3 bilhões em setembro de 2021 (Sinha (2021)). Ademais, há uma previsão de que o número de conexões IoT atinja 27 bilhões em todo o mundo até o ano de 2025.

A conectividade dos dispositivos é um fator preponderante para o fomento da geração de dados, análises subsequentes e tomadas de decisões autônomas, contribuindo

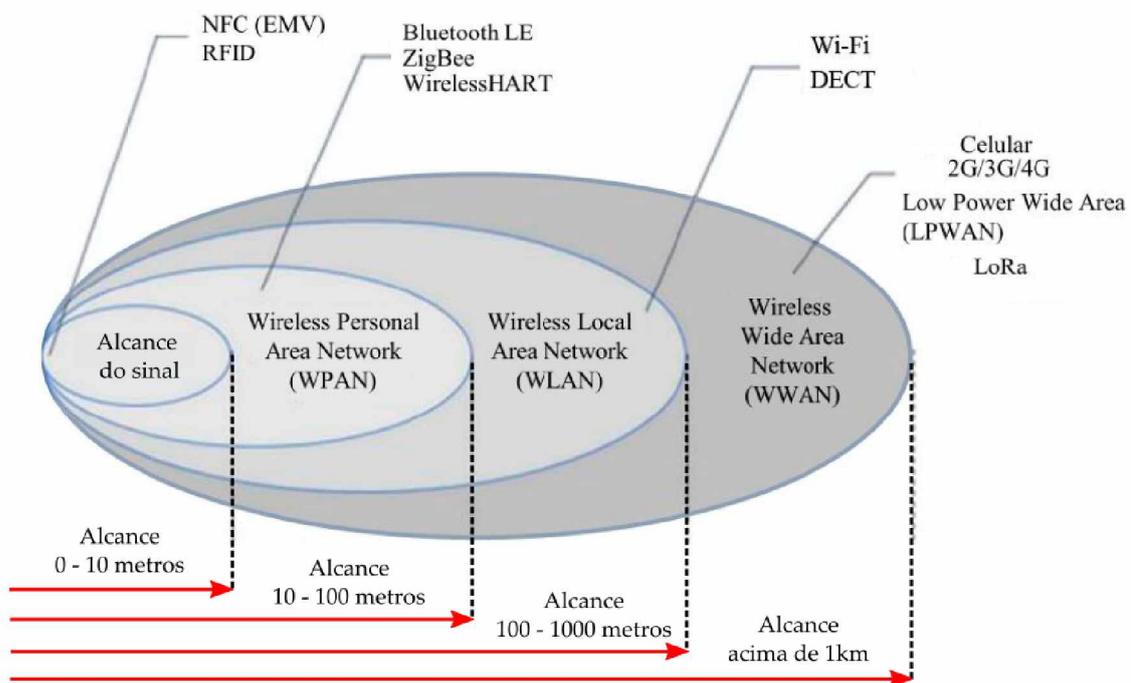
para aprimorar a eficiência dos algoritmos e das redes integradas. Esse atributo fundamenta-se na capacidade das máquinas de atuarem de forma inteligente e intuitiva, constituindo-se, portanto, no motor propulsor da Internet das Coisas (IoT). Nessa perspectiva, a IoT consiste na concepção de objetos ou coisas utilizadas no dia a dia, que, por meio da interconexão, adquirem inteligência, consciência e interatividade.

1.1.1 Comunicação sem fio de dispositivos IoT

A Internet das Coisas se baseia principalmente em uma rede de módulos com identidade única que monitoram valores de variáveis específicas e os enviam para a internet por meio de comunicação sem fio. Algumas tecnologias consolidadas como *RFID*, *Bluetooth*, *Wi-Fi*, *Zigbee*, *3G*, *4G*, *5G* têm sido amplamente utilizadas dentro desse conceito. A interconectividade presente no contexto da IoT acarreta, inevitavelmente, um considerável consumo energético, o qual requer o uso de fontes cada vez mais eficientes.

Há uma relação direta entre a tecnologia de rede IoT selecionada e o tipo de topologia de conectividade a ser empregada, sendo que cada uma delas é concebida para atender a critérios específicos, tais como o alcance do sinal, o número de dispositivos conectados, a densidade de informações a serem transportadas, o intervalo de envio de dados e o consumo de energia. A Figura 2 mostra o comparativo de alcance entre as principais tecnologias de comunicação sem fio disponíveis no mercado.

Figura 2 – Alcance do sinal das principais tecnologias sem fio.



Fonte: O Autor (2023).

Na Figura 2 são apresentados as estimativas do alcance fornecidas pelos fabricantes agrupadas por nomes que as categorizam pelos seguintes grupos:

- WPAN (*Wireless Personal Area Network*; Rede de Área Pessoal Sem Fio)
Escala de alguns metros. Este é o espaço pessoal em torno de uma pessoa. Um exemplo dessa tecnologia sem fio é o *Bluetooth*.
- WLAN (*Wireless Local Area Network*; Rede Local Sem Fio)
Escala de até 100 m. O termo WLAN é comumente utilizado para redes de internet convencionais, portanto, também aplicável ao contexto do IoT quando tecnologias de rede padrão (como Ethernet ou IEEE 802.11) são usadas.
- WWAN (*Wireless Wide Area Network*; Rede de Longa Distância Sem Fio)
Com alcance de mais que alguns quilômetros), também são comumente usadas por IoT. Exemplos são 2G, 3G, 4G, 5G, LoRa.

Conforme mencionado, as tecnologias sem fio apresentam diferentes níveis de consumo energético, sendo um fator crucial na avaliação da tecnologia mais apropriada para cada aplicação prática. Dentre as diversas opções de meios de comunicação para IoT, uma que tem se destacado é a tecnologia LoRa (*Long Range Radio*), que será discutida posteriormente.

1.1.2 Alimentação de dispositivos IoT

No decorrer do tempo, houve avanços tecnológicos dentro do cenário da IoT, como a ampla miniaturização dos *chips* com fabricação em 40 nm, a incorporação de todos os sistemas de um computador dentro dos microcontroladores com a tecnologia SoC (*System on a chip*) (Radovici e Culic (2022)), frequências de *clock* da ordem de 240 MHz, incorporação de rádio comunicação *Wi-Fi* e *Bluetooth*. A partir desse momento, houve a possibilidade de os microcontroladores entrarem em modo de hibernação, onde o consumo de energia pôde ser reduzido para microwatts, recurso importante para o aumento da vida útil de pilhas e baterias. Os sensores também passaram a ser construídos diretamente a partir de ligas semicondutoras, reduzindo bastante seu tamanho e o consumo de energia, aumentando assim sua eficiência.

Mesmo com significativos avanços nas tecnologias que viabilizam os sistemas embarcados, as fontes de energia aplicáveis a dispositivos IoT permanecem como um desafio, em particular para aqueles projetados com ênfase em alta disponibilidade e confiabilidade. De maneira coerente com esse contexto, as pilhas e baterias ainda representam uma das principais fontes de energia para dispositivos IoT.

O avanço das pilhas e baterias também tem sido considerável, em grande parte impulsionado pela popularização dos *smartphones* e pela competitividade entre os fabricantes, que tem fomentado a produção de baterias com maior autonomia e a custos reduzidos (Maier, Sharp e Vagapov (2017)). Contudo, o elevado volume de utilização de baterias tem gerado uma expressiva demanda para a gestão adequada dos resíduos correlatos.

Não obstante, outro componente que tem ganhado destaque como alternativa ao armazenamento de energia são os super capacitores, que se distinguem dos capacitores convencionais por possuir alta capacidade de armazenamento (Hua (2018)). Dentre suas desvantagens, destacam-se a baixa densidade de energia¹ e baixa tensão de operação.

Entretanto, entre as vantagens, é possível citar sua longa vida útil em ciclos de uso e tempo de carregamento extremamente rápido, quando comparados às baterias comuns. Isso os torna uma solução viável para aplicações específicas na área de redes IoT de baixo consumo, oferecendo estabilidade e segurança energética, além de permitir a integração com fontes alternativas de energia elétrica menos exploradas.

As desvantagens de baterias e super capacitores, quando usados isoladamente, é que estes componentes em algum momento necessitarão ser recarregados. Usualmente, utiliza-se a rede elétrica de distribuição local como fonte primária para as recargas, no entanto este processo acarreta custos que vão desde a tarifa de energia, a mão de obra para os funcionários responsáveis por essa tarefa de recarga.

Diante desse fato, as fontes alternativas de energia se destacam por utilizar fontes distintas das convencionais a partir de energias usualmente disponíveis, com a desvantagem de geralmente oferecerem baixa quantidade de potência. Algumas das fontes alternativas de geração de energia elétrica são: energia solar, eólica, maremotriz, geotérmica etc. (Gilbert e Balouchi (2008)).

Ainda que algumas fontes de energia alternativas apresentem baixa densidade energética, é possível aprimorar consideravelmente a eficiência do processo de coleta de energia por meio da utilização de equipamentos e circuitos especialmente otimizados para essa finalidade. A literatura acadêmica se refere a essas tecnologias e aos processos envolvidos no sistema de coleta de energia como "Energia Coletada" (Priya e Inman (2009)).

¹ Densidade de energia é a relação entre a quantidade de energia contida em um dado sistema ou região do espaço e o volume ou a massa, dependendo do contexto, deste sistema/região (Drake e Drake (2006)).

1.2 ENERGIA COLETADA

A energia coletada pode ser definida como aquela que é obtida a partir do ambiente ao redor do dispositivo. O conceito de "Energia Coletada" (ou *Energy Harvesting*) tem sido estudado há anos, tendo a piezoeletricidade sido criada pelos irmãos Curie em 1880 (Moussa, Ismaeel e Solban (2022)).

Apesar das fontes de energia elétrica em grande escala serem predominantemente obtidas a partir de diesel, carvão, fissão nuclear e energia cinética do armazenamento de água, as fontes de energia coletada incluem, entre outras, energia de campos elétricos, campos magnéticos e altos níveis de ruído, todas com baixa densidade de energia em comparação com fontes de energia convencionais (Murti (2022)). De modo geral, o procedimento básico desses sistemas consiste em coletar a energia, armazená-la e, por fim, disponibilizá-la para uso.

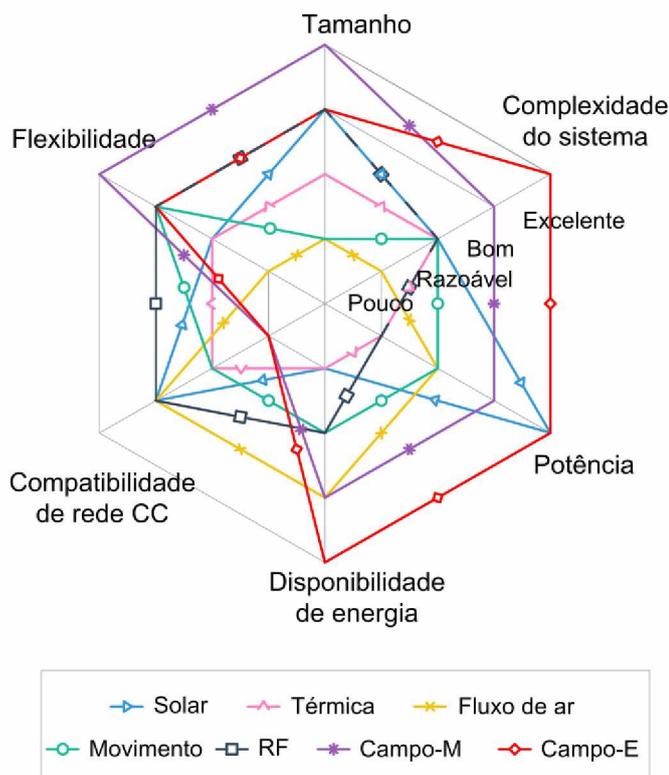
Embora a operação intermitente seja comum em dispositivos de sensores sem fio, nos quais o envio de dados é alternado com o modo de hibernação de baixo consumo, a vida útil típica de uma bateria pode durar em média apenas um ano (Maddikunta et al. (2020)). Isso cria a necessidade de uma fonte de energia auxiliar ou primária que possa atender às demandas desses dispositivos.

Nesse sentido, a utilização de energia coletada em sistemas IoT apresenta a vantagem de reduzir a necessidade de substituição frequente de baterias, o que pode ser um desafio em aplicações com instalações remotas, como áreas rurais ou florestais. Os sistemas que combinam métodos de energia coletada com tecnologias de baixo consumo de energia (*Low Power*) têm se mostrado robustos, confiáveis e até mesmo dispensam a necessidade de uso de baterias como redundância Cetinkaya e Akan (2017). Eliminando a exigência de substituição de bateria, a durabilidade do dispositivo é prolongada. Acrescenta-se que o processo de troca de baterias pode ser oneroso, especialmente em cenários que envolvem múltiplos dispositivos.

No trabalho de Michalski e Watral (2021) é feito um vasto estudo dos vários tipos de energia coletada, incluindo solar, radiação eletromagnética, cinética e termoelétrica para substituir fontes tradicionais, como as baterias. Apesar de concluir que esse tipo de energia é promissora, ainda não houve nada satisfatório em termos de como armazenar a energia coletada. Em (Sanislav et al. (2018)), adotou-se energia coletada de Rádio Frequência (RF) e as conclusões foram semelhantes ao pontuar que dispositivos IoT com energia coletada ainda não conseguem dispensar totalmente a utilização de uma fonte secundária.

A Figura 3 ilustra de forma comparativa as características das diversas técnicas de captação de energia existentes.

Figura 3 – Comparação entre técnicas de captação de energia existentes.



Conforme apresentado na Figura 3, ao considerar a utilização de fontes de energia coletada, é de suma importância a avaliação da fonte disponível em cada ambiente, bem como outros critérios qualitativos que irão definir a viabilidade do projeto.

As arquiteturas de coleta de energia existentes são normalmente categorizadas em dois grupos (Cetinkaya e Akan (2017)), a saber:

- **Coleta e Utiliza**

Em inglês "*Harvest-Use*". Este grupo é definido pela demanda energética do dispositivo.

- **Coleta, Armazena e Utiliza**

Em inglês "*Harvest-Store-Use*". Este grupo se refere a técnicas de redução da alta dependência da disponibilidade da fonte de energia.

De acordo com Cetinkaya e Akan (2017), as técnicas de coleta de energia mais amplamente pesquisadas podem ser categorizadas também a partir de critérios da densidade de energia gerada, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação de potências entre as técnicas de coleta de energia.

Fontes	Características	Densidade de energia	Ano das referências
Solar	Meio Ambiente Não controlável Previsível	15 – 100 mW/cm^2	2010, 2009, 2009, 2009, 2013
Térmica	Meio Ambiente Não controlável Imprevisível	$\simeq 50$ $\mu W/cm^2$	2010, 2009, 2013
Fluxo de ar	Meio Ambiente Não controlável Imprevisível	1 $\mu W/cm^2$	2010, 2009, 2013
Movimento	Não ambiental Controlável Imprevisível	330 $\mu W/cm^2$	2010, 2009, 2013
RF	Não ambiental Não controlável Previsível	1 $\mu W/cm^2$	2010, 2009, 2009
Campo Magnético	Não ambiental Controlável Previsível	150 $\mu W/cm^3$	2009, 2009, 2009, 2013
Campo Elétrico	Não ambiental Controlável Previsível	<i>Não detalhado</i>	2014, 2014, 2013 2012, 2014, 2009 2015, 2017, 2009

Fonte: (Cetinkaya e Akan (2017)).

1.2.1 Energia coletada de campos magnéticos

A energia coletada em campos magnéticos provenientes de equipamentos e dispositivos elétricos é uma forma de energia limpa e renovável que tem atraído a atenção de pesquisadores e empresas nos últimos anos. Esta forma de energia é gerada a partir de campos magnéticos e sua coleta é possível por meio de bobinas que capturam a energia induzida.

Conforme evidenciado na Tabela 1, é possível observar que as fontes de energia provenientes de campos magnéticos possuem densidade energética consideravelmente superior em comparação com a maioria das outras fontes de energia. Ademais, outra vantagem significativa reside em suas características específicas, incluindo a capacidade de ser controlável e previsível, em virtude de não ser uma variável natural do meio ambiente, como é o caso da energia solar.

Outra vantagem da energia coletada em campos magnéticos é a sua capacidade de operar em ambientes hostis, como em lugares com altas temperaturas ou pressões extremas, ambientes isolados ou até mesmo embaixo d'água. Isso torna essa forma de energia uma opção atraente para aplicações em setores industriais, como exploração de petróleo e gás, mineração, ou em linhas de transmissão.

Em (Gupta, Kandhalu e Rajkumar (2010)), os autores discutem energias coletadas que são eficientes em ambientes fechados, mas ressalta como a coleta de energia de campos

magnéticos, especialmente em linhas de transmissão, se tornava bem promissora.

No entanto, uma das desvantagens da energia coletada em campos magnéticos é que sua coleta pode exigir tecnologias modernas que eventualmente tem custo mais elevado, além da necessidade da aplicação de boas práticas envolvendo critérios de compatibilidade eletromagnética (EMC). Isso pode torná-la uma opção mais cara do que outras formas de energia coletada, como a energia solar ou eólica. No estudo compreensivo sobre energias coletadas de (Riba, Moreno-Eguilaz e Bogarra (2022)), menciona-se a necessidade de se ter em circuitos altamente eficientes para melhor aproveitamento da coleta, além de que em alguns casos pode não ser prático.

De maneira concisa, os atributos qualitativos são apresentados na Tabela 2. A técnica de coleta de energia proveniente de campos magnéticos pode ser caracterizada pela implementação de menor complexidade e pela capacidade de operação autônoma sem requerer qualquer fonte de energia adicional.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens entre as técnicas de captação de energia.

Fontes	Vantagens	Desvantagens	Ano das referências
Solar	Ambiental, independente da rede, alta tensão de saída.	Nem sempre disponível, estrutura sensível, restrições de implantação	2010, 2009, 2009, 2009, 2013
Térmica	Ambiental, independente da rede, alta escalabilidade.	Nem sempre disponível, requer dissipação de calor eficiente	2010, 2009, 2013
Fluxo de ar	Ambiental, independente da rede disponível dia e noite.	Densidade flutuante, complexo de implementar, requer construção	2010, 2009, 2013
Movimento	Sem fonte de alim. externa, configuração compacta, pouco peso.	Vazamento de carga, despolarização saída altamente variável	2010, 2009, 2013
RF	Muito abundante em áreas urbanas, permite a mobilidade.	Escasso nas áreas rurais, baixa densidade de energia, dependente da distância	2010, 2009, 2009
Campo Mag.	Nenhuma fonte de alimentação externa, menor complexidade de implementação, estrutura mais simples.	Requer fluxo mínimo de corrente e sempre disponível, requer cuidados com segurança	2009, 2009, 2009, 2013
Campo Elét.	Sem necessidade de fluxo de corrente contínuo, menor complexidade de implementação, alta disponibilidade.	Sendo capacitivo, restrições mecânicas, requer maiores cuidados com segurança	2014, 2014, 2013, 2012, 2014, 2009, 2009, 2009, 2017, 2015, 2009, 2009

Fonte: (Cetinkaya e Akan (2017))

Conforme Tabela 2, como desvantagem, é necessário garantir um fluxo mínimo de corrente elétrica, a qual pode ser minimizada através da previsibilidade da corrente nos condutores de energia que geram o campo magnético.

1.3 TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO LORA

O constante avanço dos microcontroladores e dos sistemas embarcados tem sido determinante para a evolução de novas tecnologias de conectividade, ganhando bastante espaço nos ecossistemas IoT. Um desses avanços foi sem dúvida a tecnologia de comunicação sem fio LoRa (*Long Range Radio*). A tecnologia de comunicação de longo alcance e baixa potência, LoRa, tem se mostrado uma solução eficiente para aplicação também em sistemas de energia coletada uma vez que ela consome pouca energia (Gruber (2000)).

LoRa®², *Long Range Radio*, é uma tecnologia que permite comunicação a longas distâncias (em áreas urbanas 3 - 4 km de alcance e em áreas rurais até 12 km ou mais), com consumo mínimo de energia. Suas principais aplicações são para operação de sensores e monitores remotos (pressão, luz, temperatura, acionamento remoto, luminosidade, umidade, entre outros), sobretudo aqueles alimentados por bateria, com mensagens curtas (usualmente apenas poucos *bytes* proveniente de sensores) e em alguns casos em locais de difícil acesso. É direcionado principalmente para redes de Internet das Coisas (IoT) e redes M2M (*Machine to Machine*)(Haxhibeqiri et al. (2018)).

A tecnologia LoRa também oferece uma ampla gama de possibilidades de conexão em sistemas de energia coletada. Por exemplo, sensores de monitoramento de qualidade do ar, sensores de temperatura e umidade e sistemas de rastreamento podem ser implantados em áreas remotas para coletar dados e transmiti-los para um centro de controle usando a tecnologia LoRa (Paredes-Parra et al. (2019)). Isso permite que as informações coletadas sejam utilizadas para tomar decisões importantes, como o gerenciamento de recursos naturais e o monitoramento do clima.

A LoRa é particularmente atraente em áreas rurais ou em locais remotos onde a infraestrutura de comunicação é limitada ou inexistente. Por exemplo, em fazendas, a tecnologia LoRa pode ser usada para monitorar a produção agrícola, o consumo de água e o uso de fertilizantes, permitindo que os agricultores tomem decisões mais bem embasadas (Murdyantoro et al. (2019)). Além disso, em parques eólicos ou solares, a LoRa pode ser usada para monitorar a produção de energia, identificar falhas e garantir que a manutenção seja realizada de forma eficiente (Choi et al. (2018), Jeong, Shin e Lee (2018)).

Dentre as aplicações de longa distância, a LoRaWAN™³, *Long Range Wide Area Network*, é o nome dado ao protocolo que define a arquitetura do sistema bem como os parâmetros de comunicação usando a tecnologia LoRa mantido pela LoRa Alliance⁴. O

² LoRa® é uma técnica de modulação sem fio derivada da tecnologia de espalhamento espectral, com alta robustez contra interferências, longo alcance e baixo consumo.

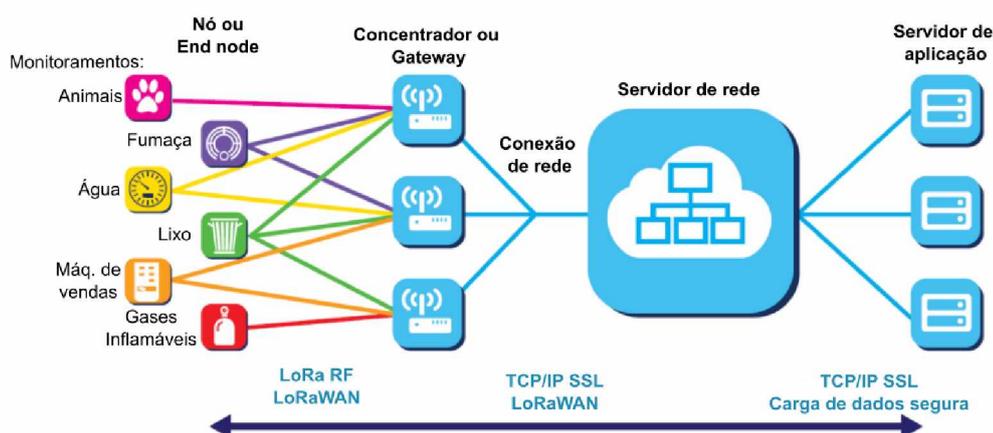
³ LoRaWAN™ é um protocolo de rede WAN, de baixa potência construído sobre a técnica de modulação de rádio LoRa. Ele conecta dispositivos sem fio à Internet e gerencia a comunicação entre dispositivos "nós" e o "concentrador" de rede.

⁴ A LoRa Alliance® é uma associação aberta e sem fins lucrativos que se tornou uma das maiores e de mais rápido crescimento no setor de tecnologia desde sua criação em 2015. Seus membros colaboram

protocolo LoRaWAN implementa os detalhes de funcionamento, segurança, qualidade do serviço e ajustes de potência, visando maximizar a eficiência energética para maior duração da bateria nos módulos, e os tipos de aplicações tanto do lado do módulo quanto do servidor (Haxhibeqiri et al. (2018)).

A tecnologia LoRa e o protocolo LoRaWAN permitem que aplicativos inteligentes contribuam para amenizar alguns dos maiores desafios que nosso planeta enfrenta: redução do uso de recursos naturais, controle de poluição, prevenção de desastres, gerenciamento de energia, eficiência da infraestrutura, entre outros (Haxhibeqiri et al. (2018)). A Figura 4 apresenta a arquitetura da tecnologia LoRaWAN com alguns exemplos de aplicação.

Figura 4 – Arquitetura básica de rede LoRaWAN e exemplos de aplicação.



Fonte: Adaptado de (Sardar et al. (2018))

Como ilustrado na Figura 4, dentro da arquitetura LoRa existem elementos específicos, como o concentrador ou *gateway* que possui a capacidade individual de lidar com até milhões de nós e é o responsável pelo direcionamento dos dados para a internet. Os sinais podem ter alcances relativamente longos, o que significa que há menos estrutura necessária, tornando a construção de uma rede mais rápida e de baixo custo de implementação.

O LoRa também possui algoritmos de taxa de dados adaptável para otimização de uso da rede e até mesmo do consumo de energia. O protocolo LoRa inclui várias camadas diferentes, tais como aplicativos e dispositivos para comunicações seguras e criptografia na rede (Lavric e Popa (2017)).

Neste trabalho, o LoRa é utilizado como interface de comunicação entre o nó e o concentrador (*gateway*). A opção por esta tecnologia se deu pelo baixo custo dos componentes, arquitetura e protocolo acessíveis, baixo consumo de energia, alcance de cobertura, confiabilidade, estabilidade e versatilidade de parametrização. As descrições técnicas do equipamento, facilidades, vantagens e limitações dessa tecnologia são discutidas no decorrer do trabalho.

1.4 DISPOSITIVOS IoT EM SISTEMAS DE ALTA POTÊNCIA

Vários trabalhos discutem as aplicações de IoT em sistemas de distribuição e transmissão de energia, tais quais linhas de transmissão (Zhai et al. (2012), Ou et al. (2012), Alhebshi et al. (2018)). Pode-se destacar entre as vantagens:

- Monitoramento em tempo real: a IoT permite o monitoramento em tempo real das linhas de transmissão, identificando problemas e falhas antes que se tornem críticos, o que reduz o tempo de reparo e aumenta a eficiência da manutenção.
- Detecção de falhas: com sensores e dispositivos conectados à rede IoT, é possível detectar com precisão e rapidez falhas em equipamentos e linhas de transmissão, permitindo ações imediatas para corrigir os problemas antes que ocorram quedas de energia.
- Redução de custos: a IoT pode ajudar a reduzir os custos de manutenção, uma vez que o monitoramento contínuo permite a manutenção preventiva, evitando gastos com reparos emergenciais e prolongando a vida útil dos equipamentos.
- Aumento da segurança: a IoT também ajuda a aumentar a segurança nas linhas de transmissão, permitindo a detecção precoce de problemas de segurança e ações imediatas para prevenção de acidentes.
- Melhoria da eficiência energética: com o monitoramento em tempo real e a detecção de falhas, é possível otimizar o uso da energia elétrica nas linhas de transmissão, reduzindo o desperdício e aumentando a eficiência energética.
- Integração com outras tecnologias: a IoT pode ser integrada a outras tecnologias, como inteligência artificial e análise de dados, permitindo análises mais precisas e soluções mais eficientes para problemas nas linhas de transmissão.

Sendo a IoT uma tecnologia desejável para sistemas de transmissão e distribuição de energia, surge então a necessidade de otimizar a alimentação desses dispositivos. Como muitas vezes as linhas de transmissão ficam em áreas remotas, o ideal é que os sistemas sejam autossustentáveis, sem a necessidade de reposição de baterias. Além disso, elas pela sua própria natureza criam campos magnéticos abundantes devidos à quantidade de energia que passa pelos seus condutores nas instalações elétricas.

Para Riba, Moreno-Eguilaz e Bogarra (2022), que analisaram criteriosamente o estado da arte de energia coletada em linhas de transmissão, apesar da abundância de campo magnético, esse tipo de energia coletada é mais difícil de ser trabalhado pois exige circuitos mais elaborados para coleta, tratamento e armazenamento dessa energia. Além disso, os dispositivos IoT devem focar em baixa potência para se adequarem aos níveis

baixos extraídos do ambiente. Ainda assim, deve-se ter em mente que o sistema poderá ser lento para iniciar, pois, em sistemas autônomos, há algum tipo de redundância de energia, como um capacitor, e ele precisa ser carregado antes de o sistema começar a operar.

Ji et al. (2018) citam a da necessidade de se otimizarem recursos em casos de sistemas com pouca energia em IoT. No caso, ele estuda maneiras de fazer com que o sistema de comunicação demande a menor quantidade possível de energia a partir de seus nós.

Vários trabalhos, como os de La Rosa et al. (2019), Saraereh et al. (2020), Kawar, Krishnan e Abugharbieh (2021), apostam na ideia de incluir um circuito extra apenas para gerenciamento de energia. Esse circuito pode funcionar como um rastreador do ponto de máxima potência MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) ou apenas como um alocador de recursos inteligente. O problema dessa abordagem é que esse circuito por si só consumirá energia. Por isso, alguns preferem adotar sistemas híbridos e continuar utilizando baterias e a energia coletada apenas para ampliar sua vida útil.

No âmbito do uso de LoRa, o estudo conduzido por Paredes-Parra et al. (2019) investiga aplicações de baixo custo para estações de energia de alta tensão, destacando a eficiência da tecnologia em termos de alcance e ciclo de trabalho de curta duração, exigindo menos de 1 % de energia.

Nesse contexto, surge a necessidade de desenvolver um dispositivo IoT que possa aproveitar a disponibilidade abundante de campo magnético em sistemas de alta potência, tais como linhas de transmissão, e que seja autossuficiente para executar tarefas de medição e comunicação/transferência de dados sem a necessidade de intervenção humana constante.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivos gerais

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa consiste em demonstrar, por meio da construção de um protótipo, a viabilidade do desenvolvimento de um dispositivo IoT aplicado ao contexto de linhas de transmissão e distribuição capaz de realizar comunicação em distâncias médias/longas utilizando a tecnologia LoRa. Além disso, o dispositivo deve ser alimentado exclusivamente pela energia dos campos magnéticos gerados pelas correntes nos cabos condutores de energia elétrica.

1.5.2 Objetivos específicos

O protótipo desenvolvido deve incluir, adicionalmente, sensores para medição de corrente elétrica e condições meteorológicas. Além disso, com o intuito de avaliar a

autonomia do modelo proposto, serão conduzidos testes para avaliar o consumo de energia do dispositivo utilizando diferentes módulos sem fio de comunicação LoRa.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste Capítulo 1, são apresentados os principais conceitos que envolvem o cenário da IoT, seus avanços, suas vantagens e suas limitações.

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica que a viabiliza toda a metodologia e análise dos resultados.

No Capítulo 3 são descritos os meios e materiais utilizados e toda a metodologia aplicada para avaliação da viabilidade do desenvolvimento deste projeto de pesquisa, baseado nas fontes de energia coletadas.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, tanto para parte de eficiência energética, quanto para eficiência dos meios de comunicação sem fio e em como eles se comparam com o que se tem atualmente no estado da arte.

No Capítulo 5 é discutida a pertinência dos resultados, bem como sugestões de trabalhos futuros e a continuidade da pesquisa.

Parte II

Fundamentação Teórica

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos que envolvem a teoria necessária para a melhor compreensão de como são gerados os campos eletromagnéticos bem como as tecnologias utilizadas para sua coleta e posterior utilização em dispositivo IoT. Também é detalhada a tecnologia de comunicação sem fio LoRa, justificando sua escolha.

2.1 COLETORES DE CAMPO

Devido aos altos níveis de tensão e corrente, nas proximidades de equipamentos de distribuição (como transformadores, cabos de energia, interruptores etc.), são gerados intensos campos eletromagnéticos (Yuan (2016)).

A relação entre esses campos magnéticos e a corrente elétrica que o origina pode ser descrita pela lei de Ampère. Ela estabelece que um campo magnético é sempre produzido por uma corrente elétrica ou por um campo elétrico variável. Essa segunda maneira de se obter um campo magnético foi prevista pelo próprio Maxwell, com base na simetria de natureza: se um campo magnético variável induz uma corrente elétrica, e conseqüentemente um campo elétrico, então um campo elétrico variável deve induzir um campo magnético (Halliday, Resnick e Walker (2000)). A lei de Ampère, para este caso, pode ser definida como:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i \quad (2.1)$$

em que:

B - campo magnético em Tesla (T);

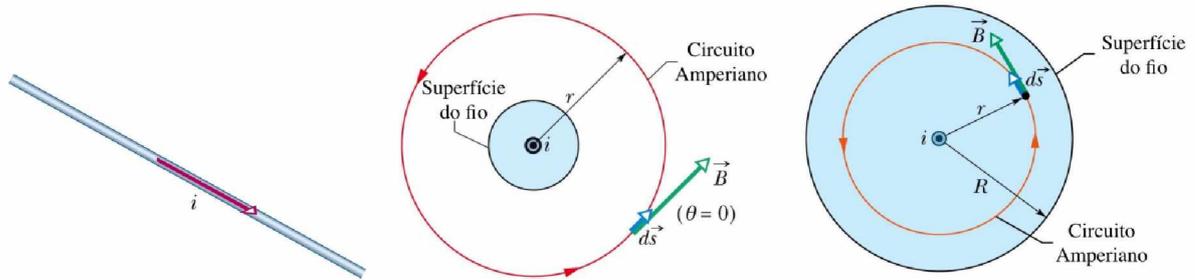
μ_0 - permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi \times 10^{-7} T.m/A$);

i - corrente através do condutor (A);

s - superfície de análise.

Assim, a integral de linha é calculada considerando uma circunferência concêntrica com raio menor do que o raio do condutor, conhecida como *amperiana*, pela qual fluem linhas de fluxo magnético \vec{B} . Dessa forma se obtém a corrente i , que é uma corrente total delimitada pela circunferência *amperiana*, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Campo fora e dentro de um fio, gerado por sua corrente.



Fonte: (Halliday, Resnick e Walker (2000)).

Em síntese, a Lei de Ampère relaciona a corrente que atravessa um circuito \vec{S} com a circulação sobre este circuito do campo \vec{B} criado pela corrente.

De uma forma geral, pode-se dizer que a intensidade do campo magnético é proporcional à corrente que atravessa um condutor associado a esse campo sendo inversamente proporcional à distância do ponto (onde consideramos o campo magnético) ao condutor. Estes conceitos são a base dos sistemas coletores de campos magnéticos.

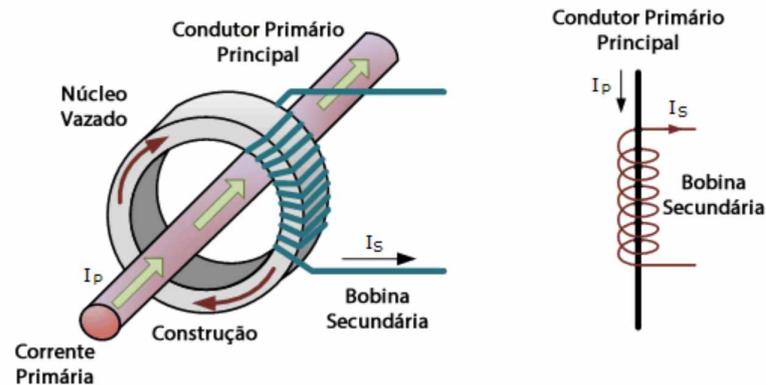
De acordo com os dados do UK National Grid (Yuan (2016)), o campo elétrico médio e o campo magnético dentro de uma subestação típica são de cerca de 10 kV/m e 32 A/m, respectivamente. Estes campos elétrico e magnético são relativamente intensos podendo ser fontes de energia consistentes e confiáveis para sensores sem fio implantados próximos a equipamentos de alta potência.

2.1.1 Coletores magnéticos

Dispositivos baseados em indução magnética são amplamente utilizados há anos, como os fogões a indução, celulares com carregadores sem fio, trancas magnéticas entre vários outros. Para o contexto das novas tecnologias, os coletores de campos magnéticos utilizam dos mesmos princípios, o da indução eletromagnética. A indução eletromagnética ocorre quando a variação de um campo magnético nas proximidades de um condutor causa-lhe o surgimento de uma força eletromotriz induzida.

Dessa forma, os coletores de campos magnéticos são basicamente uma bobina submetida a um campo magnético decorrente do fluxo de corrente, semelhantemente como ocorre nos transformadores de energia utilizados na rede de distribuição ou dentro da fonte dos equipamentos eletroeletrônicos. Em geral, os coletores de campos magnéticos utilizam materiais ferromagnéticos para que se possa direcionar o fluxo aumentando significativamente sua eficiência. A Figura 6 ilustra o diagrama de um dispositivo coletor de campo magnético.

Figura 6 – Diagrama elétrico simplificado de um coletor de campo magnético.



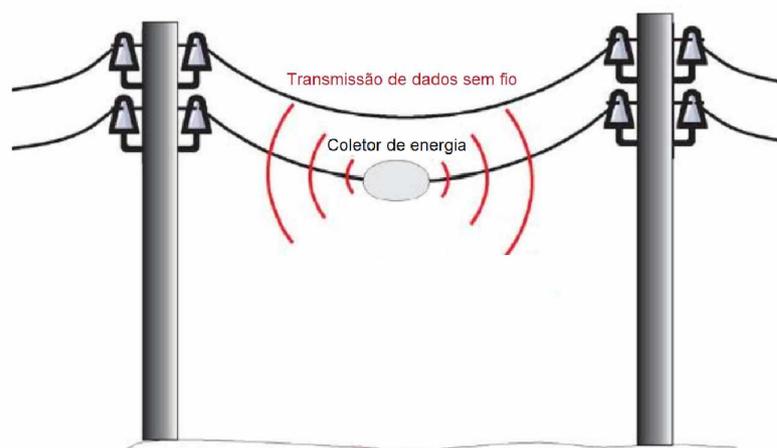
Fonte: O Autor (2023).

Como pode ser visto na Figura 6, similarmente aos transformadores, a passagem da corrente elétrica primária induz no núcleo um campo magnético oscilante devido a corrente alternada. Esse campo magnético variável propaga-se com maior facilidade no interior do núcleo ferromagnético, por isso é conduzido em direção ao enrolamento secundário, induzindo assim a formação de uma corrente elétrica alternada nesse enrolamento.

Como resultado, o coletor de energia de campo magnético é capaz de coletar quantidade de energia maior em comparação com o coletor de energia de campo elétrico, especialmente quando não há condutores de alta tensão e até mesmo para condutores com correntes baixas na ordem de 50 A.

Existem dois tipos de coletores de energia de campo magnético trabalhando para diferentes propósitos. O primeiro é o coletor de energia preso a cabos como mostrado na Figura 7. Este tipo de coletor fixo é usado principalmente para alimentar os sensores que medem a corrente da linha e a temperatura dos cabos condutores.

Figura 7 – Coletor de energia fixado em condutores de linhas de transmissão.



Fonte: O Autor (2023).

Existem vários resultados publicados focados em coletores de energia provenientes de campos elétricos em cabos de energia ou linhas aéreas, como os de Zangl, Bretterklieber e Brasseur (2009), que alcançou 45 mW para uma linha de 50 kV, 200 mW para 100 kV, e 370 mW para 150 kV. Porém, foi necessária a construção de um coletor de campo elétrico capacitivo cilíndrico com 30 cm de diâmetro e 55 cm comprimento para maior obtenção de energia.

Em contrapartida, também foram analisados alguns trabalhos que utilizam o princípio de energia coletada de campos magnéticos. Trabalhos estes resumidos na Tabela 3 em termos de tamanho físico, condições de teste e potência de saída.

Tabela 3 – Trabalhos utilizando coletores de campos magnético fixado em cabos.

Quant. Núcleos	Externo (mm)	Interno (mm)	Largura (mm)	Condição teste	Potência (mW)	Densidade ($\mu W/cm^3$)
1	33,5	27,5	4	5 A - 60 Hz	9	7,8
2	22	17	6	50 A - 50 Hz	170	92,4
1	24,5	16,5	9	11,8 A - 60 Hz	78,6	33,9
2	16,3	14,4	50	13,5 A - 60 Hz	14,3	6,37

Fonte: (Santos et al. (2014), Roscoe, Judd e Fitch (2009), Moon e Leeb (2014), Moon et al. (2013), Moon e Leeb (2015), Moon e Leeb (2015), Bhuiyan, Dougal e Ali (2010), Yuan (2016))

Nota-se que o tamanho desses coletores de energia presos a cabos é muito menor que os de campo elétrico anteriormente citados. De acordo com os resultados experimentais (Tabela 3), mais de 100 mW podem ser coletados quando suas bobinas são fixadas nos condutores com uma corrente de 50 A. Outra vantagem, se deve ao fato de o núcleo ferromagnético envolver totalmente o condutor concentrando o fluxo magnético no mesmo meio, formando um circuito magnético que aumente significativamente a potência de saída da bobina. Sua principal desvantagem decorre do fato de ser altamente recomendável sua instalação no momento da construção das linhas de transmissão, caso contrário o processo de instalação pode acarretar altos custos dependendo do porte da linha de transmissão.

O segundo tipo de coletor, é o coletor de energia móvel. Ao contrário dos coletores fixados em cabos de linha de transmissão, este coletor pode ser instalado em praticamente qualquer lugar, desde que haja um condutor de campo magnético alternado e níveis de corrente mínimos. Devido à grande flexibilidade, esse tipo de coletor de energia é capaz de alimentar diversos sensores para diferentes finalidades. Até mesmo estações meteorológicas sobre postes de energia podem ser alimentadas para coletar dados em tempo real. Porém ele tem aberturas no núcleo magnético, o que acarreta perdas, pois há diminuição do fluxo magnético (Olivares-Galván, Georgilakis e Ocon-Valdez (2009)). Portanto, o coletor de energia móvel necessita ser otimizado para aumentar a potência de saída.

2.1.2 Transformadores de corrente

Medições de tensão e corrente são necessárias em praticamente todos os sistemas de energia, seja na geração, transmissão, distribuição e até mesmo para medição de consumo do usuário final, feito normalmente pela concessionária de energia elétrica. Em cada ponto do sistema, são padronizados níveis de tensão e corrente, todas colaborando para a composição dos Sistema Interligado Nacional (SIN), coordenado e controlado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que é uma entidade brasileira de direito privado sem fins lucrativos sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) do Brasil (Brasil e Público (2008)).

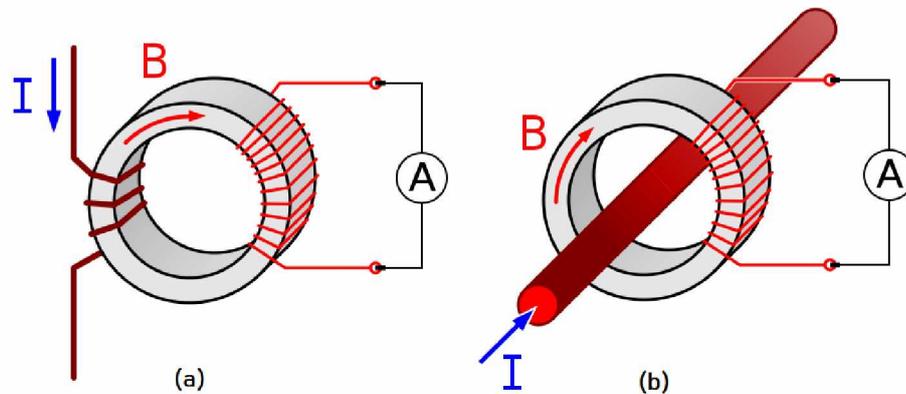
As tensões e correntes elevadas, observadas em sistemas de potência, impossibilitam o uso de medidores e instrumentos convencionais de exercerem suas funções conectados diretamente à rede. Com a intenção de contornar esse problema, surgiram os TI's - Transformadores de Instrumentos, para reduzirem os níveis de tensão ou corrente no secundário, permitindo a conexão dos instrumentos e medidores. Além disso, são responsáveis por isolar o chamado "circuito de força", conectado ao seu enrolamento primário, dos circuitos de proteção, medição e controle, conectados ao seu secundário. Operando em tensão e corrente reduzidas, se torna viável a fabricação de instrumentos e medidores de tamanhos reduzidos, com vistas ao seu isolamento. Pode-se ainda citar a possibilidade de padronização e normalização da tensão e corrente de operação desses dispositivos com a utilização de Transformadores de Instrumentos (Filho (2013)).

Os TI's podem ser classificados, quanto à sua finalidade em Transformadores de Potência (ou Força), de Distribuição e de Instrumentos. Transformadores de Instrumentos têm como objetivo principal a reprodução proporcional das tensões e correntes, impostas ao seu enrolamento primário pelo sistema de potência ao qual ele está conectado, em seu enrolamento secundário, sem provocar grandes alterações na posição fasorial da grandeza. Dessa forma, permite-se a monitoração das grandezas elétricas (tensão e corrente) dos sistemas de potência pelos relés, medidores e instrumentos conectados ao secundário do Transformador de Instrumentos. Segundo Filho (2013), ao mesmo tempo, a redução dos níveis de corrente e tensão possibilita a fabricação de instrumentos e medidores em dimensões mais reduzidas, por demandar menor isolação.

Os Transformadores de Corrente são Transformadores de Instrumentos que promovem a redução proporcional da corrente do circuito primário para suprir os dispositivos conectados ao circuito secundário. Seu enrolamento primário é colocado em série com o circuito de potência e a relação entre as espiras do enrolamento primário e do enrolamento secundário tem o papel de produzir a 'imagem' da corrente primária (I_P) que será induzida no enrolamento secundário. Normalmente, utiliza-se a padronização da corrente secundária (I_S) em 5 A, podendo assumir também os valores de 1 A ou 2 A, segundo a NBR 6856-2015 (ABNT, 2015) (Mardegan (2010)), que trata da especificação de TCs.

Na prática, os transformadores de corrente normalmente são construídos a partir de um núcleo de aço silício que pode ser construído de várias formas. O TC possui um furo central onde passará o condutor a ser medido, e seu enrolamento secundário é construído basicamente de espiras de fios de cobre. Existem basicamente dois tipos de transformadores de corrente que são: Invasivos Figura 8(a) e Não invasivos Figura 8 (b).

Figura 8 – Diagrama elétrico simplificados de um TC.



Fonte: O Autor (2023).

- **Invasivos**

Os transformadores de corrente consistem em um enrolamento primário que é inserido em série com o condutor que transporta a corrente a ser medida.

- **Não invasivos**

Os transformadores de corrente utilizam núcleos toroidais ou em forma de rosca que contêm um enrolamento primário. Em vez disso, o fio que transporta a corrente passa através de uma janela no transformador.

Os TCs possuem muitas especificações de desempenho, incluindo corrente primária, corrente secundária, tensão de isolamento, precisão e carga máxima.

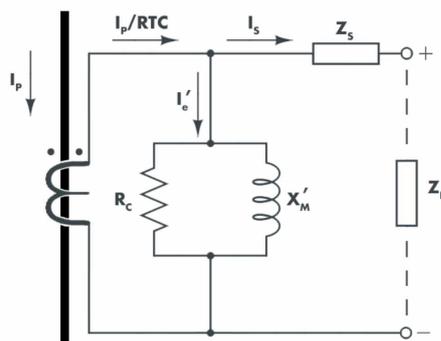
- A corrente primária é a corrente a ser medida, e decorre da carga que o condutor está submetido.
- A corrente secundária é a faixa de corrente de saída.
- A tensão de isolamento representa o isolamento máximo que os transformadores de corrente fornecem quando conectados a uma fonte de alimentação.
- Precisão é o grau de certeza com o qual a corrente medida está de acordo com o valor ideal.

- A carga máxima pode ser definida como o limite que o dispositivo pode suportar enquanto opera dentro de suas classificações de precisão. Normalmente, a carga é expressa em volt-ampere (VA), o produto da tensão aplicada a um circuito e a corrente.

Dessa forma o TC, consiste basicamente em um transformador cujo primário tem apenas uma "espira". O enrolamento primário pode ser uma parte permanente do transformador de corrente, ou seja, um condutor induzindo campo magnético através do núcleo. Transformadores de corrente do tipo janela são os mais comuns, os quais podem ter cabos de circuito passando pelo meio de uma abertura no núcleo para fornecer um enrolamento primário de uma volta. Para ajudar na precisão, o condutor primário deve ser centralizado na abertura.

Em boa parte das aplicações envolvendo a utilização de Transformadores de Corrente agregam-se apenas as grandezas inerentes ao transformador de corrente, desprezando características reais do circuito primário, visto que muitas vezes esses parâmetros mudam muito durante o uso. Dessa forma, é possível utilizar um circuito equivalente simplificado, como apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Circuito simplificado de um TC.



Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2018).

Para isso, pode-se desprezar a resistência e reatância do primário, visto que, na maioria das vezes, o enrolamento primário é formado por um condutor ao qual o TC está conectado.

Segundo a NBR 6856, os TCs são projetados para operar respeitando alguns limites para o ambiente no qual o equipamento está instalado, tais como:

- Altitude de até 1000 m.
- Temperatura máxima ambiente de até 40° C.

- Temperatura mínima ambiente de até -10°C .
- Temperatura média de até 30°C para um período de 24 horas.

Em relação às aplicações, os TCs podem ser classificados pela operação para o qual foram designados da seguinte forma: TCs para serviço de medição e TCs para serviços de proteção (Nascimento et al. (2018)).

Transformadores de Corrente para serviço de medição

O objetivo desses equipamentos é a medição de correntes em circuitos de alta tensão. Para tal, deve apresentar alta precisão, com erros de medição de 0,3 % a 0,6 % e baixa corrente de saturação de quatro vezes a corrente nominal (Mamede e FILHO (2013)).

Durante curtos-circuitos, o ideal é que o TC entre em saturação, protegendo os equipamentos de medição do circuito secundário. Construtivamente, seu núcleo apresenta seção menor do que os TCs para serviço de proteção, de modo a promover a saturação do núcleo do equipamento.

Transformadores de Corrente para serviços de proteção

Esses equipamentos têm como objetivo a proteção de circuitos de alta tensão e, para isso, trazem em seu circuito secundário relés de proteção. Para esse serviço, não é necessária elevada precisão, podendo o equipamento apresentar até 10 % de medição, mas é necessário apresentar elevada corrente de saturação, da ordem de vinte vezes a corrente nominal, para que não saturem durante a ocorrência de curtos-circuitos (Mamede e FILHO (2013)).

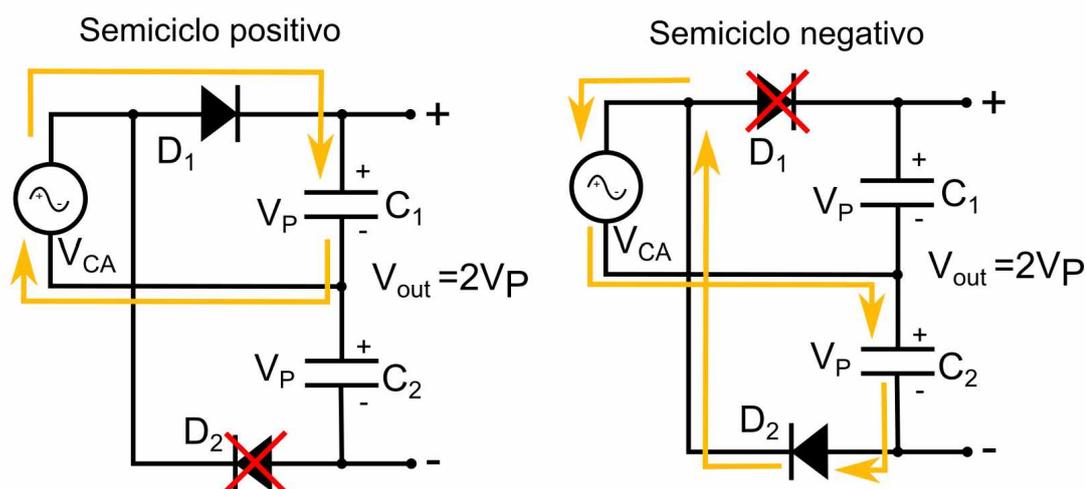
Para TCs de proteção em operação em sistemas com religamento, como alimentadores com religadores ou com disjuntores com relé de religamento, há de se ter ainda cuidado com o magnetismo residual. Na ocorrência de eventos de religamento, ao magnetismo residual, fenômeno que provoca a preservação de um magnetismo residual no núcleo, pode provocar a saturação do TC antes do ponto previsto.

2.2 CIRCUITOS E ELETRÔNICA

2.2.1 Circuitos multiplicadores de tensão

Os circuitos multiplicadores de tensão são amplamente utilizados em aplicações especiais, como aceleradores de partículas, amplificadores de imagem, ionizadores de ar e até mesmo aparelhos micro-ondas Hayes e Horowitz (1999). A Figura 10 ilustra o funcionamento do circuito dobrador de tensão.

Figura 10 – Diagrama e operação do circuito dobrador de tensão em onda completa.



Fonte: O Autor (2023).

Os circuitos dobradores de tensão possuem a característica de serem alimentados por correntes alternadas e subsequentemente fornecerem saída em corrente contínua devido ao processo de retificação. Sua operação consiste basicamente, durante o semiciclo positivo da corrente alternada ocorre o carregamento do capacitor C_1 pela polarização direta do diodo D_1 e o bloqueio de corrente para o capacitor C_2 devido a polarização inversa do diodo D_2 . Durante o semiciclo negativo da corrente, ocorre exatamente o contrário. Conseqüentemente, para a carga, é disponibilizada a soma da tensão de ambos os capacitores C_1 e C_2 , que são carregados permanentemente em período determinado pela frequência da fonte V_{AC} . Sua tensão de saída em corrente contínua V_{CC} pode ser calculada pelas Equações (2.2) e (2.3).

$$V_{cc} \approx 2 \times V_{AC(pkpk)} \quad (2.2)$$

$$V_{cc} \approx 2\sqrt{2} \times V_{AC(RMS)} \quad (2.3)$$

em que:

V_{cc} - tensão de saída em corrente contínua (V);

$V_{AC(pkpk)}$ - tensão alternada pico a pico de entrada (V);

$V_{AC(RMS)}$ - tensão alternada RMS de entrada (V).

Uma das questões envolvendo a utilização dos circuitos dobradores de tensão é que se houver grandes variações da tensão alternada na entrada, também ocorrerá variações de tensão na saída em corrente contínua, podendo alcançar valores que danificam os componentes na sequência do circuito. Para isso, será necessário a adição de um estágio de proteção.

2.2.2 Super capacitores

A crescente demanda de energia para equipamentos eletroportáteis contribuiu muito para o avanço das baterias que vêm evoluindo, ganhando várias formas e tamanhos, desde células em miniatura usadas para alimentar aparelhos auditivos e relógios de pulso, até enormes bancos de baterias como redundância para *data centers*.

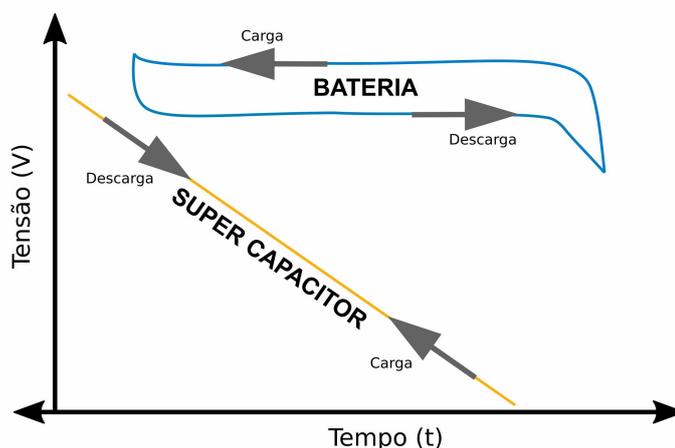
A busca por fontes de energia elétrica com cada vez mais capacidade de armazenamento é uma solução bastante premente. Nesse contexto, um dispositivo que vem ganhando espaço como armazenadores de energia são os super capacitores.

Os super capacitores, também chamados de ultra capacitores, são dispositivos de alta capacidade com valores de capacitância muito maior do que outros capacitores, mas com limites de tensão mais baixos, preenchendo uma lacuna entre os capacitores eletrolíticos e as baterias recarregáveis (Peng et al. (2017)).

Baterias normalmente armazenam de 10 a 100 vezes mais energia por unidade de volume ou massa do que os capacitores eletrolíticos e possuem ciclo de carga e descarga muito mais rápido.

A armazenagem de energia em baterias e super capacitores é realizada através de métodos distintos. Essa distinção é notável quando se observa o comportamento elétrico desses dispositivos durante o processo de descarga, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Tensão durante carga e descargas de baterias e super capacitores.



Fonte: O Autor (2023).

De acordo com a prática, uma bateria pode ser considerada como uma fonte de tensão, mantendo sua tensão constante em uma ampla gama de correntes de carga, para a descarga ela também mantém sua tensão até que sofre uma queda abrupta somente no final do processo de descarga. Durante o processo de carregamento, a energia elétrica é convertida em energia química e armazenada como tal. Posteriormente, na descarga, a energia armazenada é novamente liberada como energia elétrica. O cálculo da energia

armazenada pode ser obtido através da utilização da Equação (2.4):

$$E = \frac{C}{3600} \times V \quad (2.4)$$

em que:

E - energia em Wh;

C - capacidade da bateria em Amper hora (Ah) (3600 é o fator de conversão para segundos);

V - tensão nominal (V).

A Equação 2.5 permite o cálculo da duração da bateria:

$$T = C/I \quad (2.5)$$

em que:

T - tempo em horas;

C - capacidade da bateria em Ah;

I - corrente drenada (A).

Dependendo da tecnologia da bateria, a conversão de energia atinge uma eficiência de aproximadamente 50 a 90 %. As baterias oferecem vantagem sobre os capacitores em relação à sua quantidade de energia armazenada. Suas desvantagens são a sensibilidade a altos picos de corrente, que pode danificar permanentemente as baterias, e há também questões envolvendo as faixas de temperatura de operação limitada a aproximadamente 0 a 45 °C. Valores acima ou abaixo desses limites podem afetar significativamente a vida útil das baterias devido à sua composição química.

Um parâmetro bastante importante ao se analisar baterias é sua densidade de energia. A densidade de energia é a relação entre a quantidade de energia contida em um dado sistema ou região do espaço e o volume ou a massa, dependendo do contexto, deste sistema/região. A densidade de energia pode ser calculada usando a Equação (2.6):

$$Wh/kg = \frac{V \times Ah}{kg} \quad (2.6)$$

em que:

V - tensão nominal da bateria (V);

Ah - capacidade nominal da bateria (Ah);

kg - massa da bateria (kg);

(Wh/kg) - energia específica ou densidade de energia.

Por outro lado, os capacitores armazenam energia na forma eletrostática. Ao ser requisitado pela carga, sua tensão cai a medida que a corrente flui com um comportamento essencialmente linear. Assim, eles são classificados como uma fonte de energia baseada em corrente.

Os super capacitores podem atingir uma eficiência de conversão de energia de cerca de 98 % e operam sem problemas dentro de uma faixa de temperatura de -40 a + 65 °C; inclusive em baixas temperaturas sua capacidade pode ser levemente melhorada (Masarapu et al. (2009)). Graças a uma ESR (resistência equivalente em série) na faixa dos miliohm, são possíveis picos de fornecimento de corrente variando entre centenas até milhares de Amperes. A desvantagem é que sua densidade de energia é muito menor em comparação com as baterias. A quantidade de energia pode ser calculada pela Equação (2.7):

$$W = 0,5(C \times \Delta V^2) \quad (2.7)$$

em que:

W - energia armazenada no capacitor em W.s;

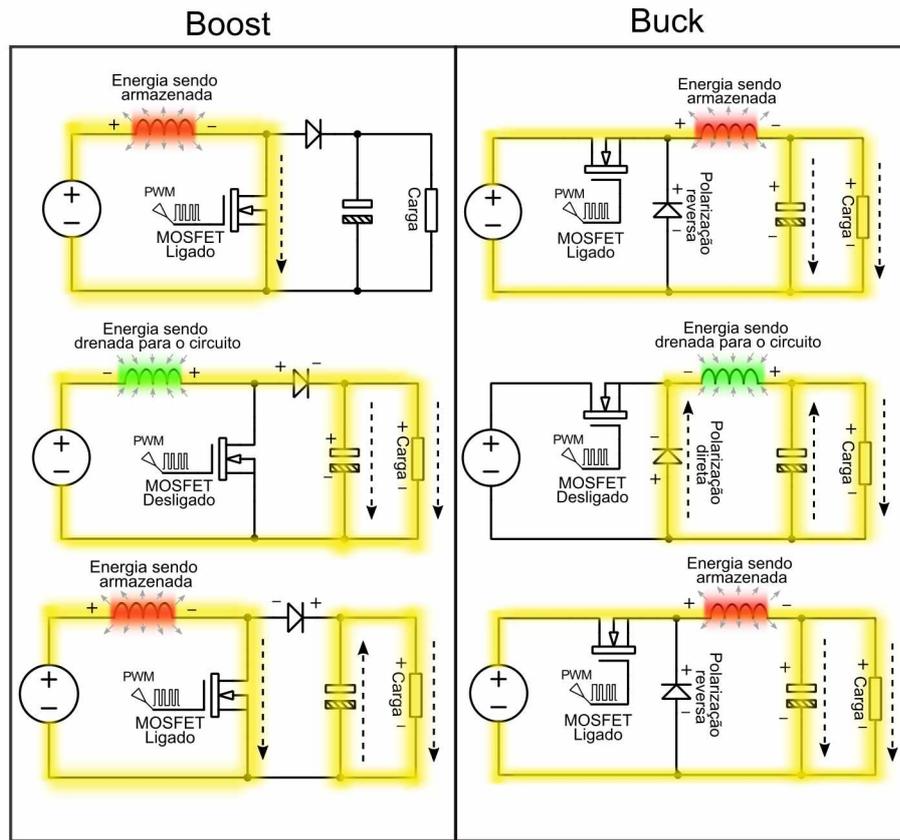
C - capacitância em Farads (F);

ΔV - intervalo entre a tensão máxima e mínima utilizável do super capacitor ao ser demandado pela carga (V).

2.2.3 Conversores

Os conversores $CC - CC$ são dispositivos eletrônicos utilizados para converter uma tensão ou corrente contínua de entrada em uma tensão ou corrente contínua de saída com um valor médio diferente da entrada, proporcionando uma interface entre uma fonte de energia e sua carga. Esses conversores são amplamente empregados em diversas aplicações de potência, tais como reguladores de tensão para alimentação de circuitos eletrônicos, controle de tração de motores e processamento de energia em sistemas de geração fotovoltaicos, entre outras aplicações (Rashid (2017)).

Existem várias topologias para construir estes circuitos, porém, será abordada aqui apenas as mais elementares. A Figura 12 exemplifica o processo de conversão, tanto para o conversor elevador de tensão (*Boost*), como para o do tipo rebaixador (*Buck*).

Figura 12 – Operação básica de conversores $CC - CC$ elevador e rebaixador de tensão.

Fonte: O Autor (2023).

Um conversor *Step Up* ou *Boost* é destinado a aumentar a tensão de saída em relação à entrada. Quando o transistor se comporta como chave fechada, a corrente percorre apenas a primeira malha do circuito (corrente elétrica em amarelo na Figura 12), passando pelo indutor e pelo transistor, sendo que a energia é acumulada no indutor. Em seguida, quando o transistor age como uma chave aberta, o diodo passa a conduzir, e o indutor e a fonte fornecem energia para a carga, aumentando assim a tensão de saída, com o capacitor agindo como um filtro.

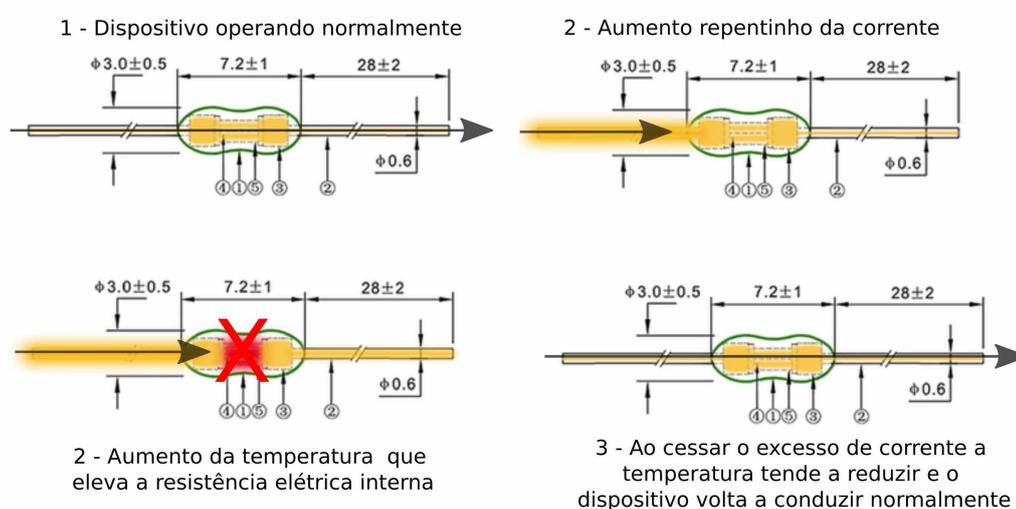
Em conversor de topologia *Step-Down* ou *Buck*, seu objetivo é realizar reduções na tensão. Ao se analisar o circuito, pode-se compreender que quando o transistor se comporta como uma chave fechada, a corrente flui, passa pelo filtro LC (indutor e capacitor) e chega à carga como tensão contínua. O filtro é do tipo passa baixa e sua função é reduzir as harmônicas da onda, sendo que o indutor é magnetizado nessa etapa. Quando a chave está aberta, o indutor é desmagnetizado, valendo mencionar que o diodo ajuda a dissipar a energia que ficou armazenada no indutor na etapa anterior.

2.2.4 Fusíveis rearmáveis

O princípio de funcionamento de fusíveis rearmáveis é baseado em estruturas cristalinas; quando o polímero está em temperatura ambiente seu estado é cristalino, formando muitas cadeias condutoras. Por ser um bom condutor, a "resistência inicial" tende a atender à maioria dos níveis de corrente demandada pelos dispositivos eletrônicos.

Dessa forma, ao serem demandadas correntes mais elevadas o componente começa a aquecer e, à medida que aquece o polímero se expande, mudando de um estado semicristalino para um amorfo (um estado sem organização espacial das moléculas, sem forma geométrica definida). A dilatação separa as partículas de Carbono e quebra as vias condutoras, fazendo com que o dispositivo aqueça mais rápido e se expanda ainda mais, aumentando a resistência elétrica (Shauly (2022)), o que reduz substancialmente a corrente no circuito. Uma pequena corrente ainda flui através do dispositivo e é suficiente para manter a temperatura em um nível que o manterá no estado de alta resistência. A Figura 13 ilustra estes fenômenos.

Figura 13 – Funcionamento dos fusíveis rearmáveis.



Fonte: O Autor (2023).

Quando o excesso de corrente é cessado, o aquecimento devido à corrente de fuga irá parar e o dispositivo terá a temperatura reduzida para o valor do ambiente. Conforme o componente esfria, o polímero retrai e retorna a um estado de baixa resistência, onde poderá manter a corrente conforme especificado para o dispositivo. Esse resfriamento geralmente leva alguns segundos, embora um dispositivo desarmado retenha uma resistência um pouco mais alta por algumas horas.

2.2.5 Carga eletrônica

A carga eletrônica, ou carga dinâmica, é um equipamento eletrônico desenvolvido para testes, por exemplo, teste de fonte de alimentação de tensão contínua, baterias, carregadores de bateria, conversores CC-CC, painéis solares etc. (Rashid (2017)).

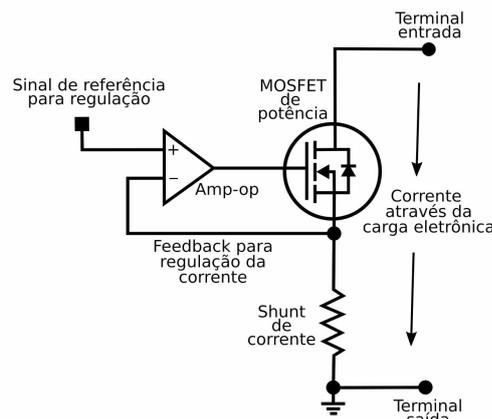
Estes equipamentos têm a principal finalidade de simular o consumo que seria drenado destas fontes de energia. A carga eletrônica se comporta como uma resistência, porém com valores que podem variar ao longo do tempo como se fosse um circuito real que as fontes a serem testadas devem alimentar (Hart (2016)).

Então, com a carga eletrônica, é possível simular inúmeras condições de testes para verificação do funcionamento de uma fonte de alimentação. As cargas eletrônicas em geral podem atuar em modos diferentes de operação:

1. **Modo de corrente constante:** Uma corrente contínua será drenada pela carga independente da tensão aplicada nos seus terminais. Esse modo é usado, por exemplo, para caracterizar o comportamento de descargas de baterias.
2. **Modo de resistência constante:** A carga se ajustará para permitir que a corrente seja drenada de forma inversa às variações de tensão, mantendo assim os valores de resistência de acordo com as leis de ohm. Esse teste é muito utilizado nos testes em driver de alimentação para painéis de LED.
3. **Modo de potência constante:** Permite que seja regulado o valor de potência em Watts, que se manterá uniforme regulando a corrente e a tensão consumida. Útil, por exemplo, para traçar curva de potência pela eficiência.

Os principais elementos de uma carga eletrônica elementar são os transistores MOSFET's de potência, e os amplificadores operacionais, como mostrado na Figura 14.

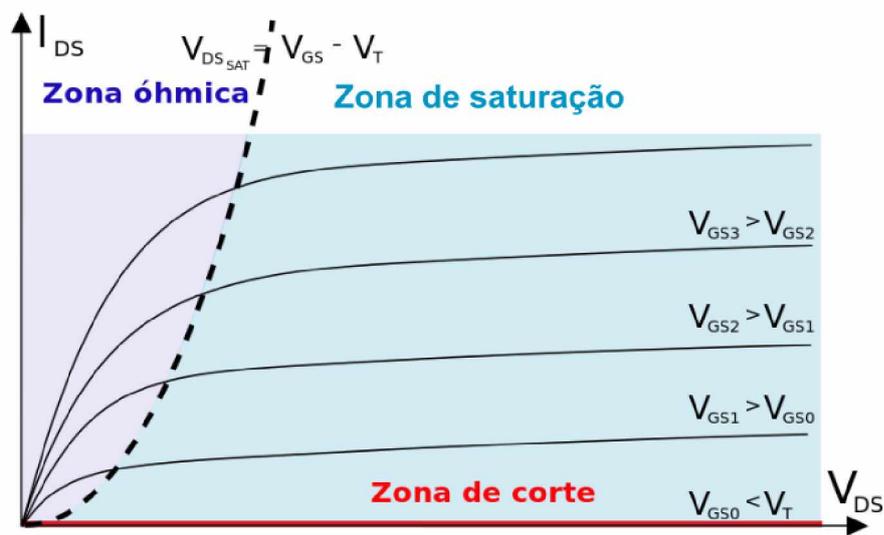
Figura 14 – Princípio básico de operação de uma Carga Eletrônica.



Fonte: O Autor (2023).

Para o circuito da Figura 14, operando em modo de corrente constante, a carga eletrônica drenará da fonte um nível fixo de corrente; este processo só é possível graças a uma característica intrínseca dos transistores do tipo MOSFET, conhecida como Região Triodo. Nessa região, o transistor já está em modo de condução, porém, o canal que é criado permite que o fluxo de corrente entre o dreno (*Drain*) e a fonte (*Source*) seja de forma semelhante a um resistor, onde o MOSFET opera controlado pela tensão na porta (*Gate*), quando $V_{GS} > V_t$ e $V_{ds} < V_{GS} - V_t$. O gráfico que representa este comportamento é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Gráfico da região triodo dos MOSFETs.



Fonte: Sze (1994).

A corrente proveniente do dispositivo fonte de energia, objeto de ensaio, fluirá pelo terminal de entrada e, após atravessar o MOSFET de potência e chegar ao resistor de derivação (*shunt*), estará sujeita a uma queda de tensão a qual será a referência de *feedback* para o amplificador operacional. Os amplificadores operacionais são dispositivos eletrônicos que podem operar de várias maneiras. Um dos modos mais utilizados é em operações em malha fechada. Tomando como referência uma tensão de entrada na porta não inversora do amplificador operacional, este buscará reduzir o erro, visto que o sinal de tensão na porta não inversora é a própria queda de tensão gerada no resistor.

Dessa maneira, o amplificador operacional aplicará no pino porta *gate* do transistor MOSFET a tensão necessária para que flua no circuito corrente igual ao valor de tensão aplicada como referência. Nesta situação, mesmo que haja variações de tensão, a carga eletrônica insistirá ao máximo para manter a corrente fixa fluindo pelo circuito.

Um dos fatores limitantes deste tipo do circuito está exatamente em suas características físicas, de modo que quanto maior a capacidade de dissipação do transistor, maior será a capacidade de drenar corrente. Outro fator importante a ser mencionado é

a possibilidade de testes apenas em fontes que forneçam corrente contínua, visto que a inversão de polaridade no circuito promoveria a polarização do diodo de proteção interno do transistor e acarretaria curto-circuito e até mesmo danos ao transistor.

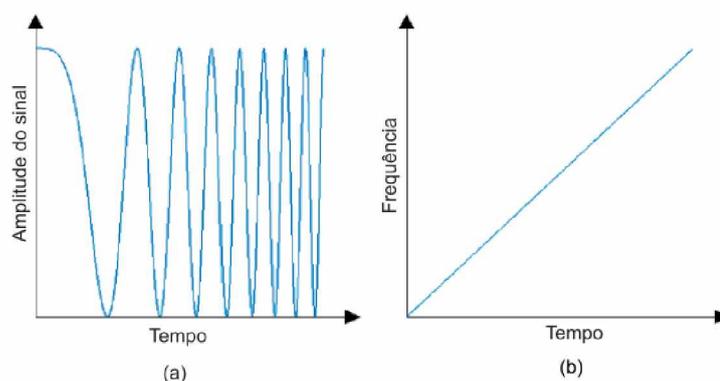
2.3 LORA PARA IoT

2.3.1 Características da tecnologia LoRa

A tecnologia de comunicação sem fio LoRa é uma arquitetura derivada da técnica de modulação por espalhamento espectral CSS (*Chirp Spread Spectrum*) é, portanto, uma técnica implementada na camada física do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) (Dias e Grilo (2018)).

A modulação CSS é uma técnica que codifica um sinal em uma faixa de frequência mais ampla do que o necessário. Isso pode ser feito de duas formas: sequenciamento direto de banda larga; e salto de frequência de banda estreita (Ortiz (2018)). A Figura 16 mostra o sinal mudando de forma crescente sua frequência.

Figura 16 – (a) Uma forma de onda linear de *chirp* crescente. (b) Sinal no domínio da frequência com *chirp* crescente.



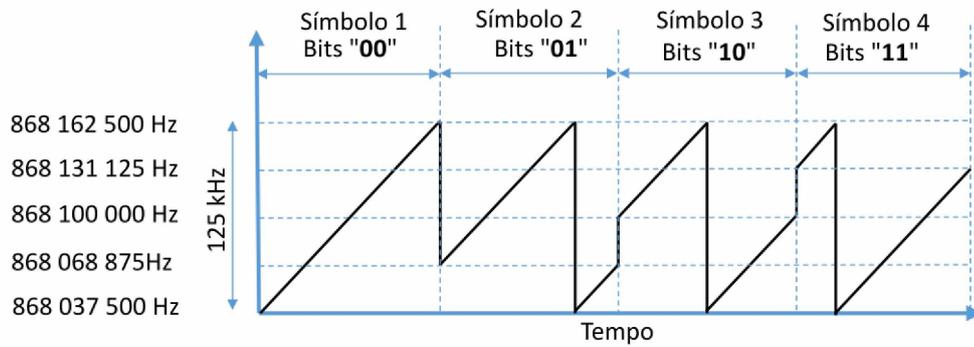
Fonte: O Autor (2023).

Estas mudanças de amplitude representam a frequência na qual um sinal está sendo transmitido. O LoRa substitui um *bit* por múltiplos *chips* de informação, fazendo com que o fator de espalhamento tenha influência na duração de tempo no ar de um pacote (Ortiz (2018)). Os múltiplos *chips* de informação precisam ser transmitidos tão rápido quanto a taxa de *bits* original.

Dessa forma, os dados são enviados com uma taxa de *chips* (*chips per second - cps*) igual à largura de banda ($125 \text{ kHz} = 125 \text{ kcps}$). Os *chirps* são deslocados ciclicamente, isto é, quando se atinge a frequência mais alta, retorna-se para a frequência mais baixa. Com isso, a informação que qualquer sinal carrega é dada pelos saltos de frequência.

Se a frequência de mudança de amplitude for constante, o sinal também estará em uma frequência constante, mas se essa taxa de oscilação mudar ao longo do tempo, a frequência do sinal mudará. Alterar a frequência de um sinal para cima ou para baixo em uma taxa constante ao longo do tempo é o mesmo que criar esse espalhamento linear. A Figura 17 apresenta um exemplo teórico de modulação SF2 (Espalhamento Espectral) em 868,1 MHz, com largura de banda de 125 kHz, onde cada símbolo representa 2 bits.

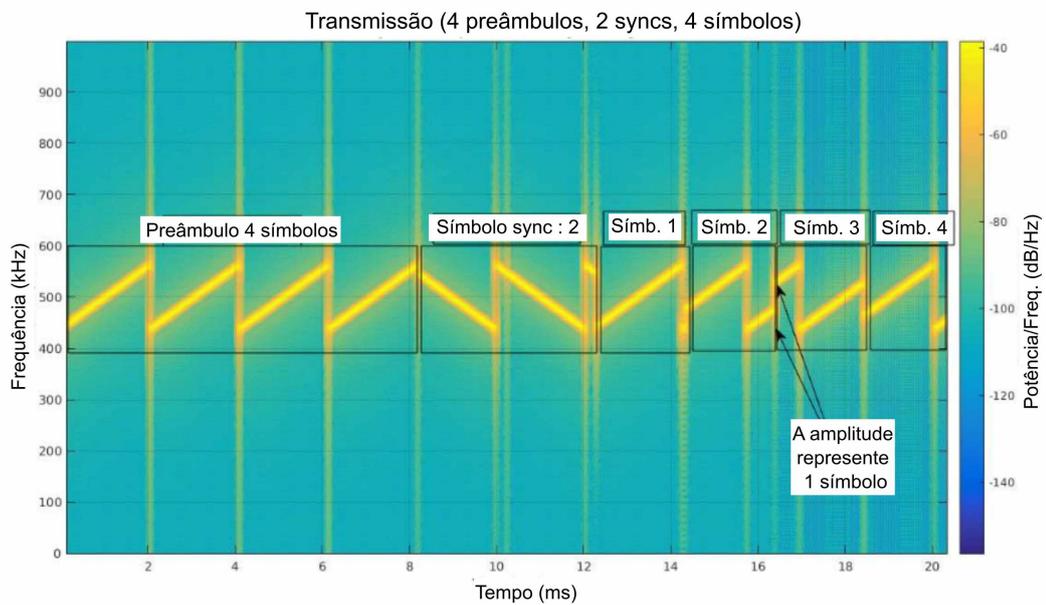
Figura 17 – Símbolos transmitidos em modulação LoRa em SF2.



Fonte: O Autor (2023).

O LoRa utiliza dessa técnica para criar variações lineares aumentando ou diminuindo a frequência de um sinal a uma taxa conhecida. A Figura 18 ilustra vários *chirps* lineares coletados de uma transmissão de dados Ortiz (2018)). Uma mudança positiva na frequência ao longo do tempo representa um *chirp* para cima, enquanto o oposto representa um *chirp* para baixo.

Figura 18 – Espectrograma de uma transmissão LoRa.



Fonte: Adaptado de (Ortiz (2018)).

A Figura 18 mostra uma transmissão LoRa com quatro *chirps* de preâmbulo e dois *chirps* para baixo para indicar o final da parte do preâmbulo da transmissão. Isto é seguido pelos dados desejados. Os últimos quatro símbolos começam em frequências variadas, indicando um símbolo especificamente codificado.

Esse método permite que o LoRa transmita por longas distâncias devido a características de alta robustez a ruído de *chirps* lineares. Como um *chirp* linear usa toda a largura de banda com uma característica linear, ele se torna facilmente distinguível do ruído, mesmo quando o sinal foi bastante atenuado.

Uma transmissão também pode ser criada usando essa tecnologia combinando vários *chirps* para representar dados, pois cada um pode ser interpretado como um símbolo e, portanto, um valor. Trabalhos como de Phung et al. (2018) demonstraram que esta é uma tecnologia de transmissão muito robusta, com a capacidade de decodificar com sucesso transmissões em até -20 dB abaixo do nível de ruído.

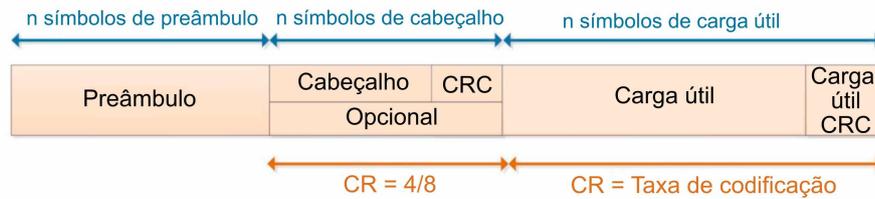
2.3.2 Pacote de dados do protocolo LoRa

Para a tecnologia LoRa os pacotes de dados são compostos basicamente por três elementos, (I) um preâmbulo, um (II) cabeçalho opcional e (III) a carga útil. O cabeçalho e a carga útil de cada pacote podem ser verificados quanto à integridade com o uso de verificações de redundância cíclica CRC's (*Cyclic Redundancy Check*), os quais são anexados ao cabeçalho e à carga útil do pacote, respectivamente (Walmsley (2021)).

Um CRC é um mecanismo de detecção de erros comumente usado com base em um número predefinido de *bits* de verificação, geralmente chamado de soma de verificação. O CRC permite a detecção de pequenas alterações nos dados de acompanhamento com base no resto de uma divisão polinomial do conteúdo dos dados.

Quando o CRC não corresponde ao valor esperado, o pacote é considerado corrompido e o receptor o descarta. Para melhorar a robustez dos pacotes LoRa, a carga útil de cada pacote é codificada com codificação cíclica de erros para permitir a correção antecipada. A taxa de codificação pode ser definida para um mínimo de 4/5, o que significa que para cada quatro *bits* de informação, um *bit* é adicionado. A taxa máxima é 4/8, dobrando a quantidade de *bits* de carga útil, o comprimento máximo do pacote é de 256 *bytes* (Walmsley (2021)). A Figura 19 apresenta a composição do pacote transmitido pelo LoRa.

Figura 19 – Composição do pacote LoRa.



Fonte: O Autor (2023).

O segmento de carga útil contém os dados reais, codificados com a taxa de codificação especificada no cabeçalho ou manualmente no lado receptor do *link* de rádio. Um CRC de carga útil de 16 *bits*, conforme mostrado na Figura 19, é opcional para dispositivos finais LoRa padrão, mas é sempre usado no protocolo LoRaWAN.

2.3.3 Vantagens da tecnologia LoRa

As redes LoRa apresentam diversas vantagens em relação à utilização da rede 4G ou 5G das operadoras de telefonia móvel, isso se deve principalmente aos seus mecanismos eficientes contra a degradação do sinal, o que promove significativo aumento de alcance, sendo os principais (Ortiz (2018)):

- *Multipath*: Ocorre quando um sinal transmitido chega a um receptor de vários caminhos.
- *Fading*: A variação de como a potência de um sinal se degrada pelo percurso.
- *Jamming*: Bloqueio de transmissões por interferência.
- Efeito Doppler: Mudanças no padrão de frequência do receptor devido a um transmissor ou receptor em movimento.

Ademais, vale salientar que a implantação das redes LoRa não depende de grandes mudanças em estruturas já existentes, o que resulta em um baixo custo de implantação. O fato de possuírem um longo alcance e de demandarem baixo consumo de energia em dispositivos alimentados por pequenas baterias é um aspecto relevante, tendo em vista que a manutenção de vários dispositivos no campo, que precisam de recarga ou troca de baterias, inviabilizaria diversos projetos.

Entretanto, é imprescindível mencionar que as redes LoRa apresentam algumas características, como a baixa taxa de transmissão de dados, embora permitam uma maior distância de alcance. Contudo, é importante destacar que essa limitação não afeta a maioria das aplicações de Internet das Coisas (IoT). Isso se deve principalmente ao fato de que a

maioria dos dispositivos IoT opera em regime de hibernação durante a maior parte do tempo, além de demandar uma baixa taxa de dados, já que enviam mensagens bastante pequenas provenientes de seus sensores (Trasviña-Moreno et al. (2016)).

Parte III

Metodologia

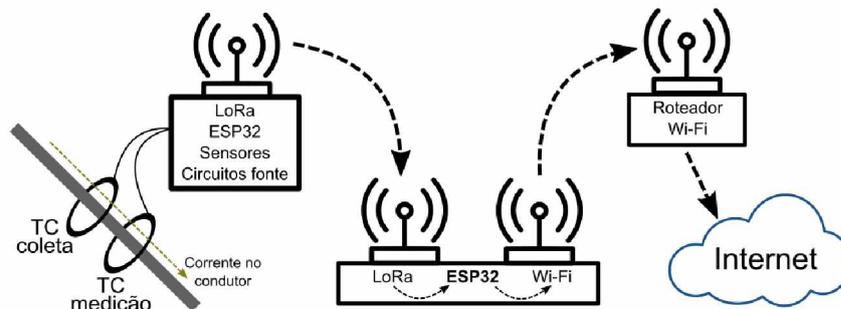
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo detalhar todos os dispositivos utilizados e construídos no decorrer do projeto de pesquisa, bem como toda a metodologia desenvolvida para construção e avaliação do protótipo.

3.1 PROPOSTA DE ARQUITETURA

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa consiste em demonstrar, por meio da construção de um protótipo, a viabilidade do desenvolvimento de um dispositivo IoT autossuficiente alimentado a partir da extração de energia de campos magnéticos disponíveis em torno de condutores corrente elétrica. A Figura 20 ilustra o funcionamento da arquitetura de aplicação no qual o mesmo pode ser inserido.

Figura 20 – Topologia da estrutura construída para a pesquisa.



Fonte: O Autor (2023).

Além disso, propôs-se testar o consumo de energia do dispositivo com diferentes módulos sem fio de comunicação LoRa para avaliação da autonomia do modelo proposto.

3.2 SIMULAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Esta seção dedica-se a apresentar os procedimentos e técnicas empregados para simular, em laboratório, a coleta de campo magnético em um sistema de transmissão e distribuição de energia, como ilustrado anteriormente na Figura 20.

3.2.1 Transformadores de corrente comerciais

Os Transformadores de Corrente (TC) são equipamentos amplamente utilizados para medições em variados níveis de corrente. Seu princípio de operação é basicamente o mesmo de um transformador, porém com linearidade conhecida e fornecida pelo fabricante.

Sua construção pode variar em tamanho, qualidade e aplicações, porém, em todos os casos, eles são construídos a partir de materiais ferromagnéticos.

Nesse sentido, para viabilizar o presente estudo, foi estabelecido como ponto de partida a investigação dos níveis de potência disponibilizados pelo secundário de um transformador de corrente comercial, bem como sua capacidade de operar como coletor de campo magnético em condutores carregados, devido à sua maior estabilidade. Com isso, foram selecionados os TCs ilustrados na Figura 21 Tabela 4 descreve minuciosamente as características técnicas de cada modelo utilizado.

Figura 21 – Modelos de TCs inicialmente testados da fabricante YHDC.



Fonte: O Autor (2023).

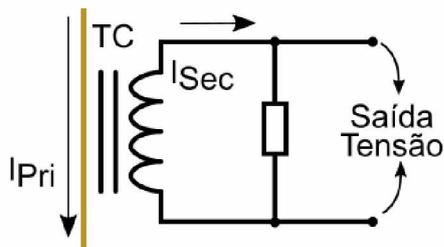
Tabela 4 – Características técnicas de cada modelo de TC.

Modelo TC	Corrente de entrada	Tipos de saída
SCT-013-020	0 - 10 A	0 - 1 V
SCT-013-050	0 - 50 A	0 - 1 V
SCT-013-000	0 - 100 A	0 - 50 mA

Fonte: O Autor (2023).

Conforme apresentado na Tabela 4, foram realizadas medições nos sinais de saída dos TCs comerciais selecionados. A partir dessa análise preliminar, foram identificados alguns fatores limitantes para sua utilização como coletores de campo magnético. Os modelos de saída de tensão (razão corrente/tensão) apresentam um resistor interno para a conversão da corrente em tensão, o que implica uma limitação no valor máximo da tensão de saída, não excedendo 1 V. Tal valor representa um patamar muito baixo para operar qualquer dispositivo. O diagrama interno desse componente é apresentado na Figura 22.

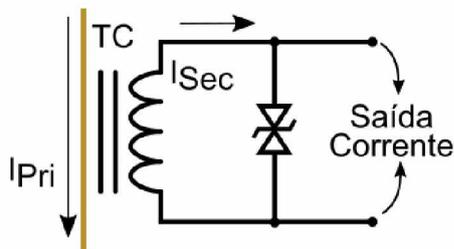
Figura 22 – Diagrama interno dos TCs com saída de tensão.



Fonte: O Autor (2023).

O modelo de saída de corrente (relação corrente/corrente) internamente também possui um dispositivo limitador de tensão, porém neste caso é utilizado um diodo Zener bipolar para que não exceda a tensão de saída, facilitando aplicar diretamente a ADC (Conversor Analógico - Digital) de um microcontrolador. A Figura 23 ilustra o diagrama interno deste componente.

Figura 23 – Diagrama interno dos TCs com saída de corrente.

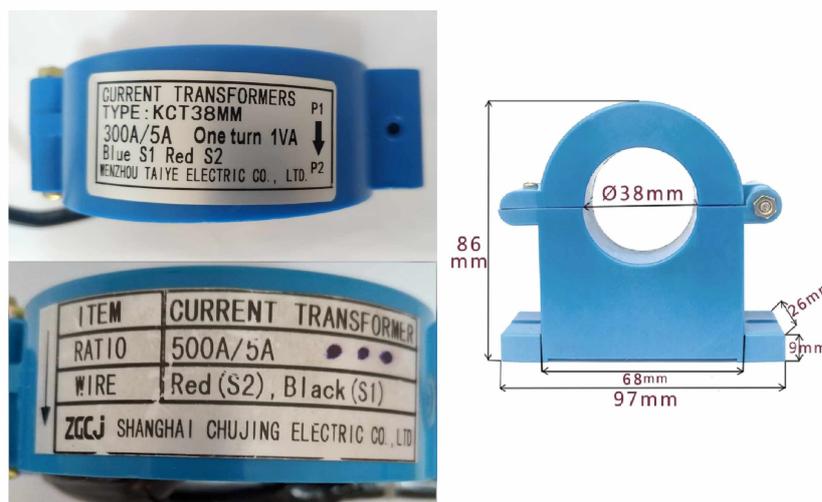


Fonte: O Autor (2023).

Após o período de testes preliminares, constatou-se que os transformadores de corrente (TCs) de menor dimensão seriam impróprios para a aplicação em questão, uma vez que não conseguiram prover os níveis mínimos de tensão requeridos para a alimentação adequada dos dispositivos IoT, mesmo quando submetidos a níveis de corrente próximos aos seus limites superiores. Diante desse cenário, optou-se pela adoção de TCs de maior porte, tendo sido empregados TCs com capacidade de medição de corrente de 300 A e 500 A.

A Tabela 5 apresenta todos os valores informados pelo fabricante e a Figura 24 apresenta características físicas dos modelos adquiridos, bem como imagens da placa de informações contida no corpo do equipamento.

Figura 24 – Diagrama interno dos TCs com saída de corrente.



Fonte: O Autor (2023).

Tabela 5 – Características técnicas dos TCs para medição de 300 A e 500 A.

Entrada	Saída	Precisão	Carga	Isolamento	Temp. Operação	Umidade
0 - 300 A	0 - 5 A	0,5%	1 VA	3 kV	-25 até 75° C	≤ 85%
0 - 500 A	0 - 5 A	0,5%	2,5 VA	3 kV	-25 até 75° C	≤ 85%

Fonte: O autor (2023).

Os TCs KCT38MM 300A/5A e ZGCT 500A/5A são construídos em polímero ABS, e possuem certificação IEC60044-1 e ANSI c12.20. Os modelos em questão são categorizados como TCs de núcleo dividido em formato toroidal em ferrosilício, característica esta que visa a facilidade na instalação. O tamanho de janela com 38 mm também colabora, visto que possibilita a passagem de condutores de grande bitola e para esta pesquisa permitem possíveis modificações.

A suposição primordial dizia respeito à potência gerada no secundário dos transformadores de corrente (TCs) em análise e se esta seria suficiente para alimentar dispositivos IoT. Com o propósito de investigar essa conjectura, fez-se necessário empregar um equipamento amplamente utilizado no campo de testes em fontes, conhecido como Carga Eletrônica.

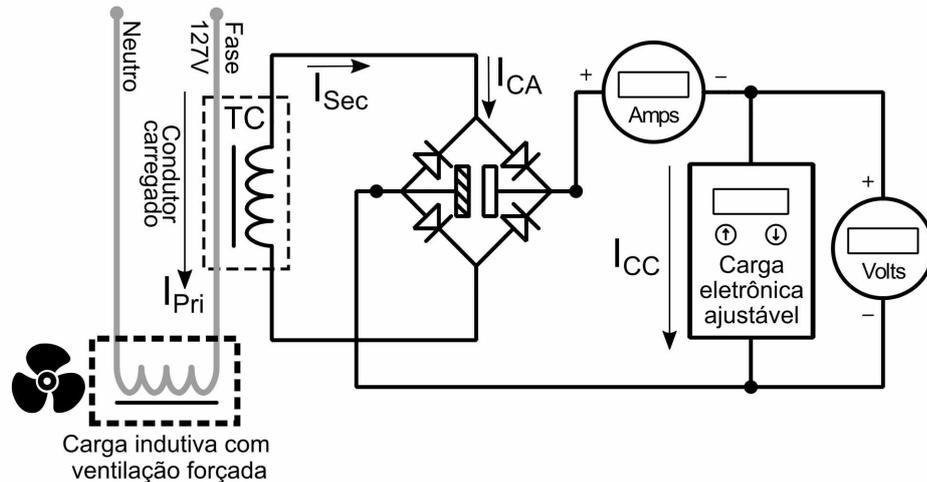
3.2.2 Metodologia de testes aplicados ao coletor de campo

Com base no conhecimento prévio de testes em fontes, realizou-se uma avaliação similar no TC com o intuito de identificar seus parâmetros e verificar se ele atenderia às exigências do projeto, desempenhando a função de coletor de campo eletromagnético para alimentação de dispositivos IoT.

Conforme mencionado na Seção 2.2.5, os equipamentos designados como carga

eletrônica funcionam exclusivamente com corrente contínua, enquanto o TC opera tanto com corrente alternada no primário quanto no secundário. Com o objetivo de contornar essa questão, utilizou-se um circuito retificador de onda completa em ponte e um capacitor para reduzir o *ripple* (ou ondulação de sinal). Dessa forma, a tensão RMS (ou tensão eficaz) torna-se igual à tensão pico-a-pico senoidal, uma vez que o capacitor remove a tensão contínua pulsante, como evidenciado na Figura 25.

Figura 25 – Diagrama elétrico do teste aplicado ao TC coletor de campo magnéticos.



Fonte: O Autor (2023).

Para que fosse possível esta operação, para a carga indutiva fez-se necessária a utilização de um dispositivo que demandasse um razoável nível de corrente para o primário, porém, que não ultrapassasse os níveis das tomadas domésticas TUG (Tomadas de Uso Geral) que são de aproximadamente 10 A. Assim foi adquirido um transformador de aparelhos Micro-ondas Bluesky Modelo blu-m191, com potência nominal de 1000 W, em 127 V. Como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 – Transformador aparelho micro-ondas modificado e utilizado.

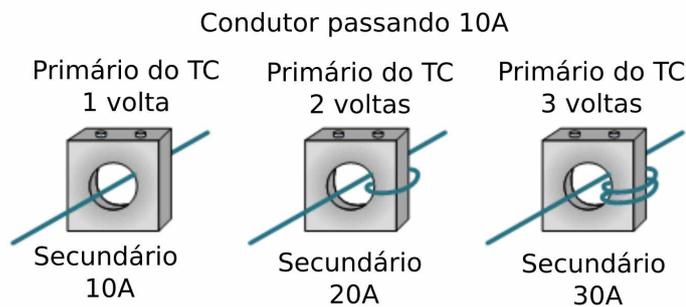


Fonte: O Autor (2023).

Pode-se notar, na Figura 26 que por motivos de segurança o estágio secundário do transformador foi removido, visto que por padrão seria fornecido uma tensão média de 2 kV, o que é extremamente perigoso para o operador. A única fiação do estágio secundário que permaneceu fornece apenas 3 V (fios vermelhos), o qual foi posteriormente utilizado para alimentar uma ventoinha visto que em operação convencional este transformador demanda ventilação forçada pois aquece muito. Após as alterações feitas no transformador utilizado como carga, a corrente medida passou a ser de aproximadamente 6,5 A.

Para que fosse possível gerar tamanha corrente visto que o TC utilizado como coletor de campos eletromagnéticos possuía como fundo de escala 500 A foi necessário somar os campos dos condutores simplesmente aumentando o número de voltas de fio passando pela janela no coletor de campo toroidal. Este método é ilustrado na Figura 27.

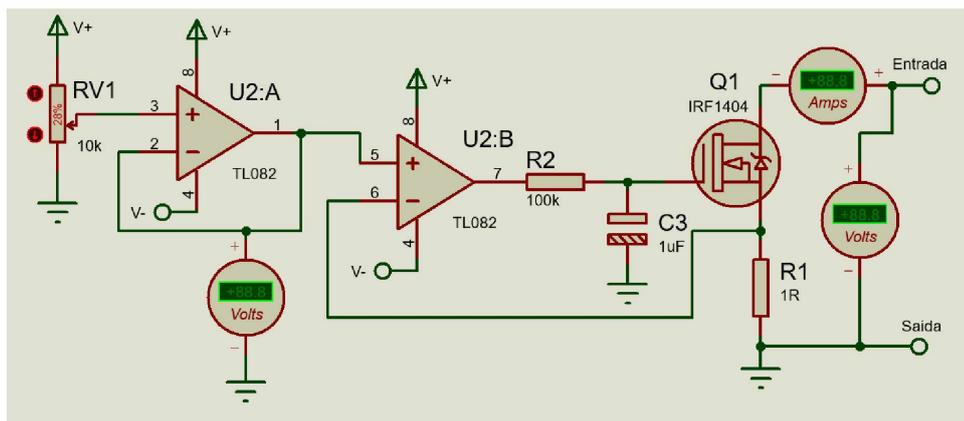
Figura 27 – Múltiplas espiras através do núcleo do TC coletor de campo magnético.



Fonte: O Autor (2023).

Definida a metodologia a ser aplicada ao primário do TC operando como coletor de campo, foram feitas as devidas simulações e posterior construção da carga eletrônica para os testes no secundário. Todo o processo de simulação foi feito através do *software* Proteus Design Suite 8.13 Professional, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Diagrama elétrico da carga eletrônica.



Fonte: O Autor (2023).

O amplificador operacional utilizado foi o TL082, amplificador este que tem por característica preponderante ser construído utilizando entradas com transistores JFET (*Junction Field Effect Transistor*), o que lhe confere alta impedância de entrada, em torno de $10^{12} \Omega$, largura em banda de 4 MHz e baixo nível de ruído (TI (2023b)).

Este amplificador operacional possui em seu encapsulamento dois amplificadores. Desta forma, um deles foi utilizado exclusivamente como *buffer* para a tensão de referência que é fornecida pelo resistor variável RV1 que é um potenciômetro multivoltas de 10 k Ω , totalizando 20 voltas até completar o valor do mínimo ao máximo, o que lhe garante precisão nos ajustes.

Nos testes iniciais do circuito carga eletrônica, constatou-se uma alta instabilidade no sinal entre a saída do amplificador operacional e o *gate* do transistor, conseqüentemente causando instabilidade na regulação de corrente, que foi revertida a partir de um filtro passa baixa, conforme a Equação (3.1) para definir a frequência de corte.

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.1)$$

em que:

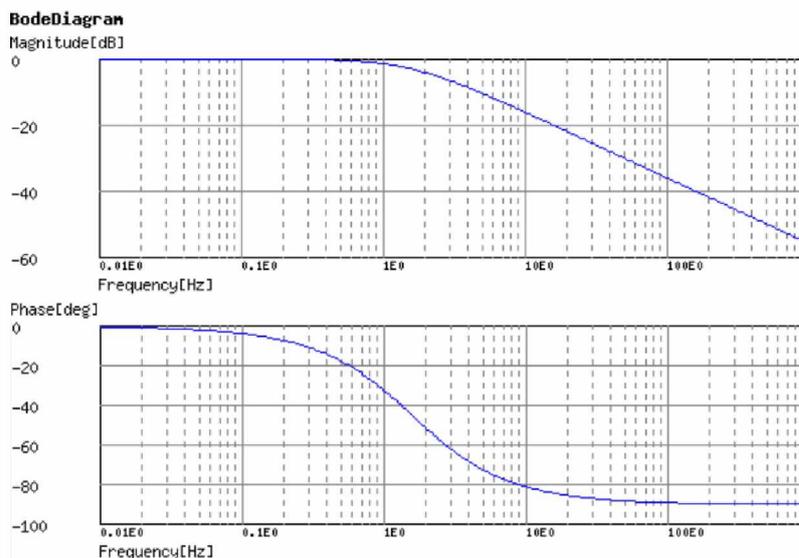
F_c - valor da frequência de corte (Hz);

R - valor do resistor (Ω);

C - valor do capacitor (F).

Para a solução em questão, foram empregados componentes comerciais com os valores correspondentes: R2 de 100 k Ω e o capacitor C3 de 1 μF , formando um filtro passa-baixa de primeira ordem com frequência de corte em 1,591 Hz. Com o objetivo de avaliar a resposta em frequência do filtro, foi realizada uma simulação cujo resultado é apresentado no gráfico da Figura 29 (Diagrama de Bode).

Figura 29 – Diagrama de resposta em frequência do filtro passa baixas passivo.

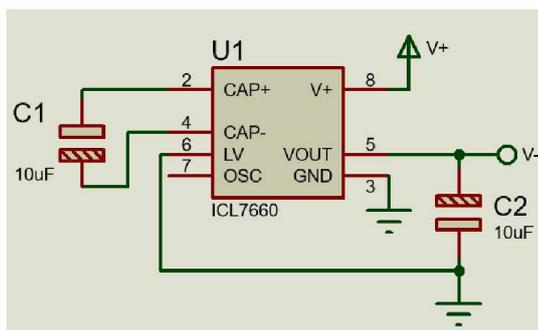


Fonte: O Autor (2023).

O diagrama da Figura 29 mostra que mesmo frequências pouco superiores à frequência de corte são atenuadas a níveis mínimos de sinal, fato que resultou na prática em maior estabilidade no controle de corrente do circuito carga eletrônica construído.

Os amplificadores operacionais de uso geral são dispositivos amplamente empregados pela indústria, variando em complexidade e, conseqüentemente, em valor. Amplificadores operacionais de baixo custo, por sua vez, têm limitações intrínsecas quando são submetidos a excursões de tensões próximas dos valores máximos e mínimos dos quais são alimentados. Em virtude disso, normalmente são utilizadas fontes simétricas. Todavia, existem atualmente soluções mais convenientes baseadas em semicondutores. Uma delas é o conversor de tensão chaveados com capacitor, como é o caso do *chip* ICL7660 (TI (2023a)). Apesar destes conversores possuírem corrente de saída bastante baixa, na ordem de 40 mA, esse valor é mais do que o suficiente para a alimentação de circuitos integrados amplificadores operacionais. A Figura 30 ilustra a utilização deste dispositivo.

Figura 30 – Circuito gerador de tensão negativa.

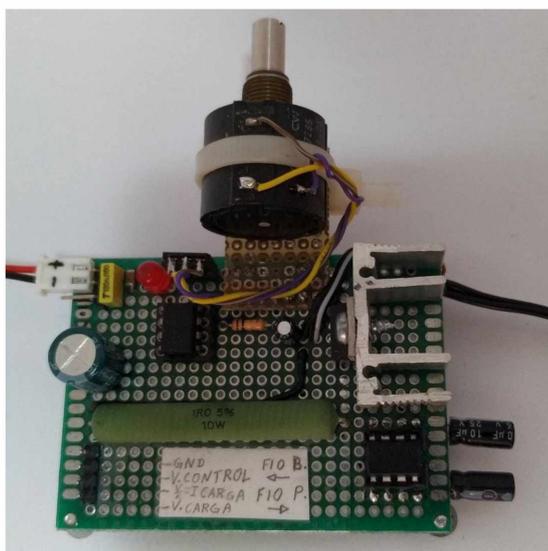


Fonte: O Autor (2023).

O *chip* ICL7660 (Figura 30) oferece uma solução para a utilização de tensões negativas em circuitos de modo prático, dispensando a utilização de adaptações como a soma das duas fontes ou duas baterias.

A Figura 31 mostra a carga eletrônica construída para os testes. O transistor MOSFET de potência utilizado foi o IRF1404 que possui $R_{DS(on)} = 0,004 \Omega$ (Impedância em condução), e $I_D = 162 \text{ A}$ (Conforme Infineon e Rectifier (2023)), fixado ao dissipador de calor, em conjunto ao resistor de 1Ω e 10 W . Todos esses componentes de alta potência possibilitaram a aplicação de testes em diversos tipos de dispositivos.

Figura 31 – Carga eletrônica construída e utilizada para o trabalho de pesquisa.



Fonte: O Autor (2023).

A Figura 31 exibe o circuito construído em placa universal, incluindo um potenciômetro multivoltas para ajustes. Durante a utilização da carga eletrônica, tornou-se necessária a utilização de um sistema de ventilação para prevenir eventuais danos ao transistor decorrentes de altas temperaturas.

3.2.3 Transformadores de corrente como coletor de campos magnéticos

Conforme proposto nos objetivos do trabalho, foram realizados testes no transformador de corrente de $500\text{A}/5\text{A}$. Os ensaios avançaram de forma gradativa variando a corrente no primário através da soma de espiras, e no secundário alterando a demanda de corrente fornecida pelo circuito retificador de onda completa. A Figura 32 mostra o Amperímetro do tipo garra da fabricante Minipa, modelo ET-3111 que possui o maior fundo de escala do corrente em 1000 A_{CA} .

Figura 32 – Amperímetro medindo uma bobina com 10 voltas de fio.

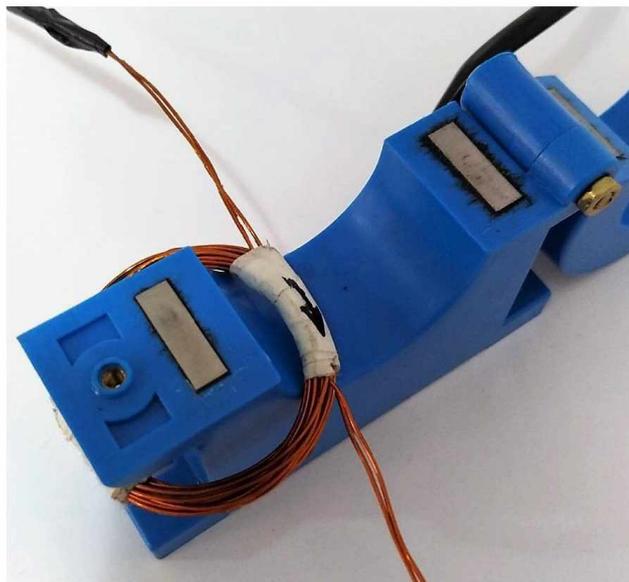
Fonte: O Autor (2023).

O valor apresentado na tela do amperímetro na Figura 32 provém da ligação em série da bobina de 10 espiras com a alimentação do transformador/carga resultando em 63,3 A. Dessa forma, a variação da corrente do primário do coletor de energia gerada por campos eletromagnéticos foi feita alterando o número de voltas de fio passantes pela janela do núcleo tendo sempre como referência o valor proveniente do amperímetro. Para maior agilidade dos testes, utilizaram-se várias bobinas de fio pré-montadas visto que a temperatura aumenta bastante durante os testes tanto do transformador/carga quanto da fiação.

Da mesma forma, foi necessário variar a corrente demandada na bobina secundária do coletor de campos com a finalidade de verificar a potência fornecida. Devido à corrente de secundário ser alternada, foi necessário utilizar o retificador de onda completa modelo KBP206 de tensão máxima $500 V_{RMS}$, tensão reversa de pico máxima de $800 V$ e corrente média $2 A$ (dados *Datasheet*). A redução do *ripple* (ondulação de sinal) foi feita por um capacitor de $1000 \mu F$. A saída em corrente contínua proveniente do retificador foi conectada à carga eletrônica.

Os testes de potência foram feitos de forma a manter uma corrente no primário proveniente do número de espiras passantes através da janela do núcleo magnético, de forma a induzir um campo eletromagnéticos ao núcleo, consequentemente produzindo uma corrente proporcional nas espiras do secundário. Os testes foram feitos de forma gradativa entre $17,16 A$ até $112 A$. A Figura 33 mostra o TC com o núcleo aberto, este é processo de instalação da bobina de fio.

Figura 33 – Bobina com 10 espiras sendo colocada dentro núcleo magnético aberto antes dos testes.



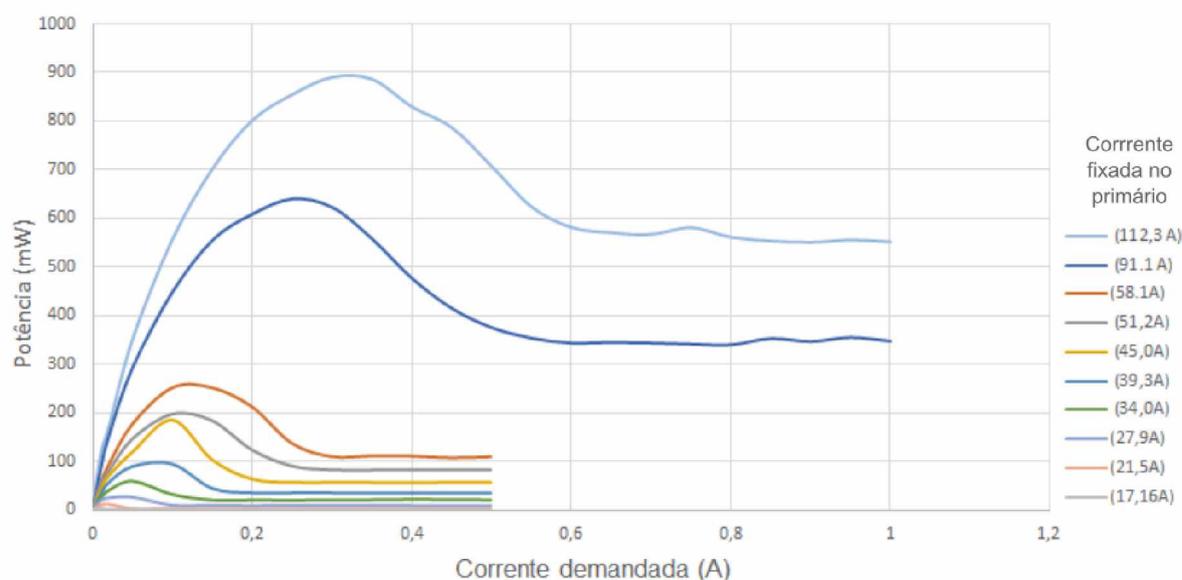
Fonte: O Autor (2023).

Na Figura 33, é apresentada a bobina com 10 espiras dentro do núcleo magnético toroidal em ferrosilício coletor de campos magnéticos. Após sua colocação o núcleo é fechado com parafuso e está pronto para ser submetido ao teste.

Para o secundário o ensaio foi feito variando a corrente demandada a um passo de 50 mA até que alcançasse o regime permanente. As medidas de tensão e corrente foram realizadas com os multímetros da fabricante UNI-T modelos UT61B+ e UT60bt.

O resultado obtido obedece a teoria da máxima transferência de potência, onde quando a carga eletrônica alcança a impedância igual à da fonte (coletor de campos magnéticos), ocorre a máxima transferência de energia, após este ponto a potência se mantém em regime permanente. O resultado da potência obtida do TC 500A/5A atuando como coletor de campos magnéticos em variados níveis de corrente no condutor carregado, ao serem requisitados variados níveis de corrente utilizando a Carga Eletrônica, podem ser vistos na Figura 34.

Figura 34 – Resultado da potência obtida do TC 500A/5A atuando como coletor de campos magnéticos.



Fonte: O Autor (2023).

Conforme apresentado na Figura 34, a potência gerada pela bobina secundária do coletor de campos magnéticos é proporcional ao nível de campo decorrente da corrente passante pelo condutor através do núcleo magnético. Essa potência varia também em função da corrente demandada pela Carga Eletrônica devido às características do ponto de máxima transferência de potência, que, embora seja relativamente baixo, se mantém estável em regimes permanentes, sendo em alguns casos o suficiente para utilização em dispositivos eletrônicos *Low Power*.

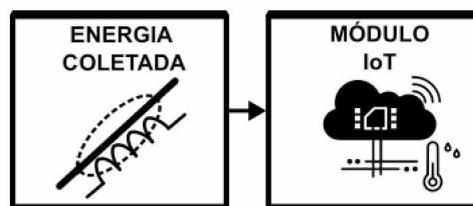
Conforme discutido na Seção 1.4, a busca pelo ponto de máxima potência pode ser realizada por meio de equipamentos MPPT. No entanto, esses circuitos possuem alta complexidade e consumo energético, mesmo em situações em que não são requisitados pelos módulos IoT. Além disso, eles requerem a utilização de um microcontrolador adicional. Para solucionar essa questão, foi utilizada uma solução mais simples e igualmente eficaz, baseada em componentes discretos, ou seja, circuitos multiplicadores de tensão.

Após o período de simulações e testes, a carga eletrônica foi construída e aplicada em vários dispositivos que serão detalhadamente discutidos no decorrer do trabalho.

3.3 CONSTRUÇÃO DA FONTE

A fim de atingir as metas propostas, foi necessário o desenvolvimento de uma fonte de energia capaz de ajustar os níveis de tensão para o módulo IoT e os sistemas de proteção correspondentes. A Figura 35 ilustra a topologia fundamental do protótipo construído.

Figura 35 – Diagrama de blocos básico do sistema desenvolvido.



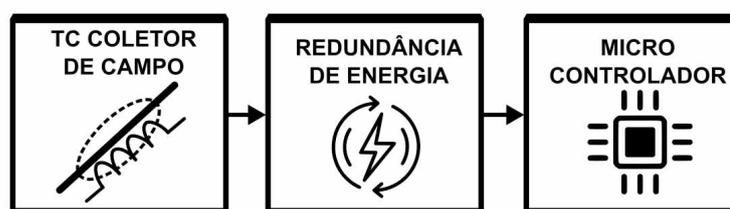
Fonte: O Autor (2023).

Uma vez que a hipótese de que o transformador de corrente (TC), operando como coletor de campos, poderia fornecer energia a um dispositivo IoT, foi confirmada, tornou-se imprescindível a concepção de uma fonte capaz de ajustar os níveis de tensão e corrente para atender às necessidades dos componentes de sensoriamento e controle, incluindo o microcontrolador.

3.3.1 Redundância na fonte

Para garantir a continuidade do fornecimento de energia em caso de falhas, torna-se necessária a inclusão de redundância de energia para a fonte de alimentação. Um sistema de fonte de alimentação sem redundância pode ser facilmente interrompido por uma falha no componente crítico, o que pode levar à paralisação do equipamento que está sendo alimentado. A Figura 36 inclui a presença de um sistema de redundância de energia no projeto da fonte.

Figura 36 – Fluxograma da Fonte de Alimentação com redundância de energia.



Fonte: O Autor (2023).

A redundância de energia pode ser alcançada de várias maneiras, dependendo da aplicação e das necessidades do circuito. Algumas das técnicas comuns incluem a adição de fontes de energia redundantes, baterias de backup e sistemas de comutação automática (Raj e Steingart (2018)).

Uma das proposições fundamentais deste estudo consiste em substituir o emprego de baterias por uma alternativa viável. Para atingir tal objetivo, é imprescindível responder a uma questão central: "Qual é a quantidade de energia necessária para que a aplicação execute seus objetivos fins?" Dessa forma, devem ser considerados aspectos como os tempos

de operação requeridos, o nível de buffer desejado ou necessário, a corrente necessária e a oscilação máxima de tensão aceitável.

Ao considerar-se o cenário de IoT, perguntas semelhantes devem ser feitas. É extremamente importante a correta avaliação da necessidade desta migração. Dessa forma, foi realizada uma pesquisa exploratória através de testes e análises, a fim de investigar e resumir suas principais características.

Para isso, foram utilizadas diferentes baterias, cada uma com sua particularidade. A Figura 37 mostra as baterias utilizadas e a Tabela 6 apresenta os dados técnicos.

Figura 37 – Resultado do teste da bateria 3,6 V e 200 mA.



Fonte: O Autor (2023).

Tabela 6 – Dados técnicos fornecidos pelos fabricantes das baterias.

	Material	Modelo	Tensão Nominal (V)	Capacidade Nominal(mAh)
1	Fosfato Ferro de Lítio (LiFePo)	18650	3,2	1500
2	Íon de Lítio (Li-Ion)	18650	3,6	2000
3	Íon de Polímero (Li-Po)	LP384260	3,7	1150
4	Íon de Polímero (Li-Po)	LP952540	3,7	1000
5	Níquel Hidreto Metálico (Ni-MH)	AAA	1,2	700
6	Níquel Hidreto Metálico (Ni-MH)	AAA	1,2	550

Fonte: O autor (2023).

A Tabela 6 apresenta os valores nominais estabelecidos pelo fabricante das baterias utilizadas neste estudo. Todavia, é importante ressaltar que esses valores não necessariamente correspondem aos valores reais das baterias em uso, uma vez que, em muitas ocasiões, os dados nominais são superestimados pelos fabricantes. Ademais, em alguns

casos, os valores são derivados de testes distintos daqueles recomendados pela literatura especializada (Peng et al. (2017)).

Dessa forma, torna-se importante a avaliação a partir de testes específicos, visto que em caso contrário as baterias podem ser um grande problema se não corresponderem ao esperado pelo projetista.

As baterias, em geral, possuem uma tensão de carga completa, e uma tensão mínima de uso (*cut-off voltage*); esse valor de limite inferior é definido pelo fabricante e é considerado o ponto onde a bateria está descarregada. O valor *cut-off voltage* pode variar entre os modelos de baterias sendo altamente dependente do tipo de material aplicado em sua construção.

Esses parâmetros (carga completa e descarga completa), são necessários para que se previna o risco de danificar as baterias. A Tabela 7 apresenta o material utilizado para a fabricação de cada uma das baterias, os valores nominais de uso, a tensão quando totalmente carregada, a tensão de corte *cut-off voltage* onde a bateria é considerada descarregada e o peso medido em balança de precisão.

Tabela 7 – Características técnicas das baterias adquiridas.

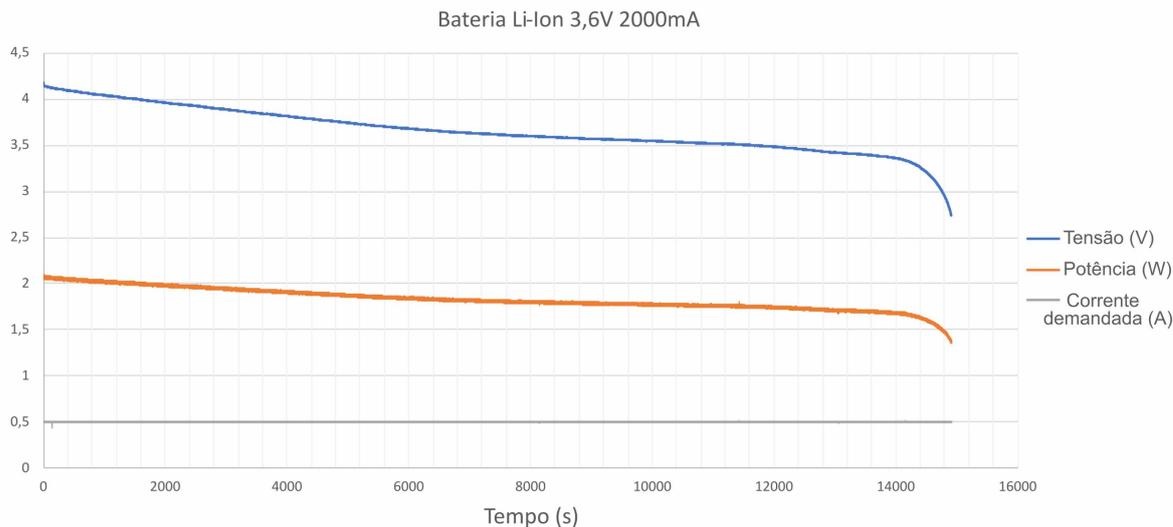
Material	Tensão Nominal (V)	Tensão carregado (V)	Tensão cut-off (V)	Peso (g)
1 (LiFePo)	3,2	3,65	2	37,9
2 (Li-Ion)	3,6	4,2	2,75	41,8
3 (Li-Po)	3,7	4,2	2,75	21,8
4 (Li-Po)	3,7	4,2	2,75	22,1
5 (Ni-MH)	1,2	1,4	1	12
6 (Ni-MH)	1,2	1,4	1	10

Fonte: O Autor, a partir dos dados fornecidos pelos fabricantes (2023).

De posse desses parâmetros técnicos é possível colocar em teste as baterias para avaliar se realmente correspondem aos dados nominais. Isso é possível graças à carga eletrônica construída no decorrer da pesquisa.

O procedimento de ensaio foi padronizado a fim de ser aplicado uniformemente a todas as baterias que foram adequadamente carregadas. A corrente exigida pela carga eletrônica foi estabelecida em 500 mA, até que a bateria atingisse a sua tensão de corte, momento em que ela seria considerada descarregada. Na Figura 38 é apresentado o resultado do teste realizado com a bateria Li-Ion de 3,6 V e 2000 mA.

Figura 38 – Gráfico do teste da bateria Li-Ion de 3,6 V e 2000 mA, ao ser demandada 500 mA.



Fonte: O Autor (2023).

De acordo com as expectativas (Figura 38), a bateria totalmente carregada apresentou uma tensão na faixa de 4,2 V, mantendo sua potência relativamente constante durante a maior parte da duração do teste. Contudo, em torno de 190 minutos, houve uma queda abrupta da tensão, indicando que a bateria estava descarregada. A partir desse ponto, a persistência no uso da bateria poderia causar danos.

Teste semelhante foi aplicado a todas as baterias, o que resultou em vários gráficos semelhantes, dessa forma os resultados do teste são apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 – Resultados dos testes para cada uma das baterias.

Bateria	Energia(Wh)	Capacidade(mAh)	Duração(hh:mm:ss)
1 (LiFePo)	4,3	1338	2:40:35
2 (Li-Ion)	7,6	2078	4:09:23
3 (Li-Po)	2,8	777	1:33:19
4 (Li-Po)	2,5	808	1:37:04
5 (Ni-MH)	0,7	597	1:11:15
6 (Ni-MH)	0,4	435	00:52:6

Fonte: O Autor (2023).

Com base nesses dados, torna-se possível avaliar a densidade de energia de cada uma das baterias, determinando qual delas possui maior eficiência em termos de quantidade de energia em relação à sua massa. A Tabela 9 apresenta uma comparação entre a capacidade nominal em Amper-hora fornecido pelo fabricante e os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados com a carga eletrônica desenvolvida. Esses dados também foram empregados para a comparação entre as densidades de carga. Ressalta-se que a densidade de energia nominal teve seus dados fornecidos pelos fabricantes.

Tabela 9 – Comparativo entre capacidades e densidades de energia com dados nominais e de testes.

Bateria	Tensão Nominal (V)	Capacidade Nominal (mAh)	Capacidade Teste (mAh)	D. Energia Nominal (Wh/kg)	D. Energia Testes (Wh/kg)
1 (LiFePo)	3,2	1500	1338	126,64	112,97
2 (Li-Ion)	3,6	2000	2078	172,24	178,96
3 (Li-Po)	3,7	1150	777	195,18	131,87
4 (Li-Po)	3,7	1000	808	167,42	135,27
5 (Ni-MH)	1,2	700	597	70	59,7
6 (Ni-MH)	1,2	550	435	66	52,2

Fonte: O Autor (2023).

Para este trabalho, utilizaram-se super capacitores, cujo funcionamento e modo de operação foi descrito na Seção 2.2.2. Os resultados dessa substituição e performance foram descritos no próximo Capítulo.

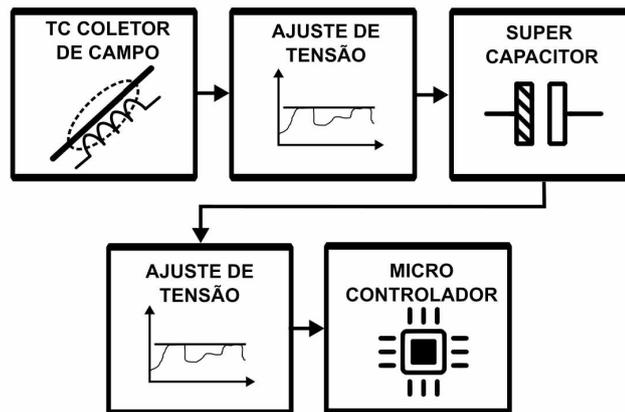
3.3.2 Ajustes de tensão

Para que um super capacitor possa ser utilizado em conjunto com uma fonte de alimentação proveniente de corrente alternada (TCs) e posteriormente a um microcontrolador, é necessário ajustar a tensão de saída para que ela seja adequada às especificações do sistema.

Ajustar a tensão de saída de uma fonte de alimentação é importante porque componentes eletrônicos podem ter necessidades diferentes de tensão de operação. O super capacitor utilizado, por exemplo, exige uma tensão de carga de 2,7 V para atingir sua capacidade máxima, enquanto o microcontrolador exige 3,3 V.

A Figura 39 inclui os módulos de ajuste de tensão entre os TC's e o super capacitor e entre este e o microcontrolador.

Figura 39 – Fluxograma da Fonte de Alimentação com super capacitor.



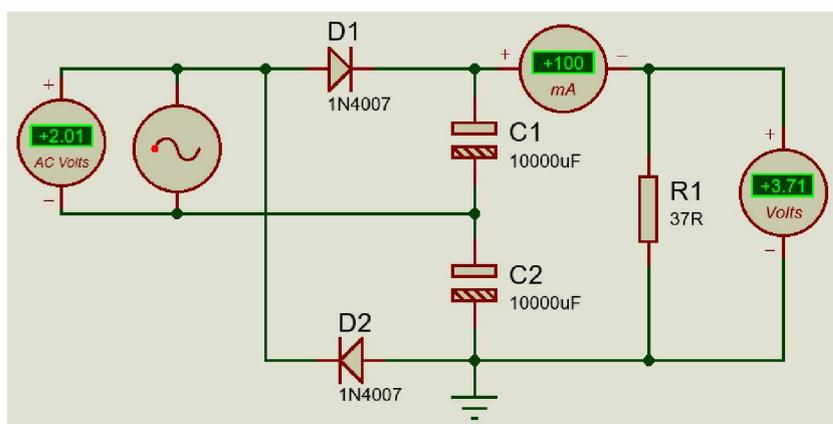
Fonte: O Autor (2023).

O primeiro ajuste de tensão deverá tratar a corrente alternada vindo do TC e garantir a maior eficiência na transferência de potência. O segundo, por sua vez, deverá adequar a tensão do super capacitor ao do microcontrolador.

3.3.2.1 Dobrador de tensão

Ao se observar o comportamento do secundário do coletor de campos, constatou-se que, em regime permanente, mesmo com uma tensão baixa (TC 500 A/5 A com 4,8 V_{CA-RMS} em malha aberta ao fluir 65 A no primário), a potência se manteve estável. Como característica técnica, os TCs medem corrente alternada e fornecem saída também em corrente alternada, diferente de outras fontes de energia como fotovoltaica e placas de Efeito Seebeck. Para estes casos, são necessários circuitos mais complexos para adequação dos sinais. Por outro lado, para a saída em corrente alternada torna-se adequada a utilização do circuito dobrador de tensão de onda completa. A Figura 40 apresenta o resultado da simulação do circuito construído.

Figura 40 – Diagrama do circuito dobrador de tensão de onda completa simulado e testado.



Fonte: O Autor (2023).

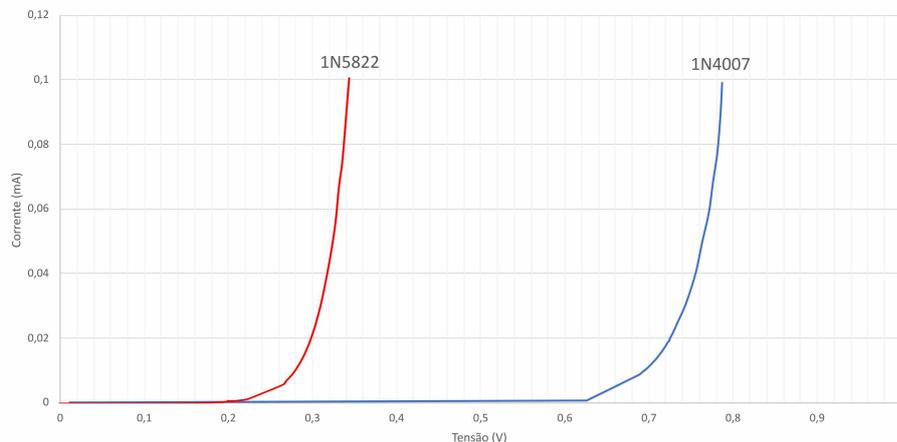
Como fica evidente na simulação, o circuito dobrador não necessariamente apresentou o dobro da tensão na saída utilizando diodos comuns ao ser drenado 100 mA. Isso decore principalmente porque diodos comuns, como os 1N4007, apresentam queda de tensão de junção de aproximadamente de 0,7 V.

Para reduzir isso e alcançar um maior ganho de eficiência, os diodos comuns foram substituídos por diodos Schottky, modelo 1N5822, com tensão reversa de 40 V, máxima corrente passante em polarização direta de 3 A e máxima queda de tensão em polarização direta (*Maximum Forward Voltage*) de 0,55 V.

A imprecisão fornecida pelo fabricante demandou que fosse feito um ensaio para avaliar se o diodo seria adequado para a aplicação de interesse, visto que cada volt

seria importante para maior eficiência do protótipo. O gráfico da Figura 41 apresenta os resultados comparativos entre os diodos 1N4007 e 1N5822 selecionados para o projeto.

Figura 41 – Ensaio de queda de tensão nos diodos 1N4007 e 1N5822.



Fonte: O Autor (2023).

O teste aplicado aos diodos, apresentado na Figura 41, foi feito de modo que a tensão fosse gradativamente elevada em um passo de 0,1 V até 1V, o forçando a entrar em estado de condução. Ao averiguar o resultado, pode-se perceber que enquanto o diodo 1N4007 entra em condução em aproximadamente 800 mV, o diodo 1N5822 entra em estado de condução em aproximadamente 350 mV, demonstrando menor queda de tensão, o tornando mais adequado a construção do circuito dobrador de tensão de onda completa.

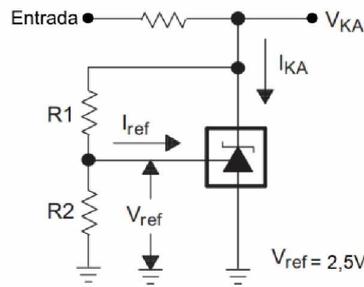
Para uma boa estabilidade do circuito dobrador de tensão, foram utilizados em sua construção dois capacitores de 10.000 μF , o que resultou em uma boa estabilidade de sinal, porém, com o retardo de alguns milissegundos para que ele alcance a tensão próxima ao dobro da entrada como se espera, o que não causaria limitação nenhuma nesta aplicação.

Em razão do circuito dobrador de tensão apenas dobrar a tensão sem a possibilidade de limitações de tensão, foi construído um circuito com esta finalidade utilizando o circuito integrado regulador de tensão de precisão programável TL431. Apesar de boa estabilidade e precisão em sua operação, o componente TL431 possui limitação de corrente máxima de apenas 100 mA, valores superiores a isso podem danificá-lo (Maniktala (2014)).

Para que tais objetivos fossem alcançados, adicionaram-se circuitos de proteção, como o baseado no circuito integrado TL431. Apesar de possuir apenas três pinos, este componente é um circuito integrado que opera como um circuito de referência de precisão programável.

A Figura 42 apresenta o diagrama de utilização e, a Equação (3.2) os cálculos necessários para aplicação, ambos recomendados pelo fabricante Texas Instruments (TI (2023c)).

Figura 42 – Diagrama elétrico de operação do circuito integrado TL431.

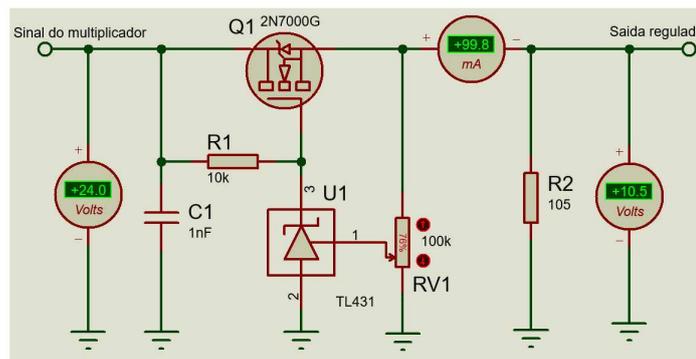


Fonte: Adaptado de TI (2023c).

$$V_{KA} = V_{ref} \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) + I_{ref} \times R1 \quad (3.2)$$

Para contornar essa questão usualmente é adicionado um transistor de potência para que este sim seja o dispositivo no qual se limita e dissipa energia, enquanto o TL431 opera em malha fechada para manter o sinal de saída estável a fim de não haver elevações de tensão perigosas para os dispositivos subsequentes (Maniktala (2014)). A Figura 43 apresenta a simulação desta operação.

Figura 43 – Simulação do circuito construído para regular e limitar a tensão.



Fonte: O Autor (2023).

Conforme é mostrado na Figura 43, para uma entrada de 24 V, a saída é ajustada pelo potenciômetro RV1 para 10,5 V, sistema esse que opera em malha fechada. Dessa forma, mesmo que haja variações da tensão de entrada, a saída será fixa sempre em 10,5 V.

No circuito real construído não há a necessidade da adição do resistor R2 conforme apresentado na Figura 43 pois ele representa apenas uma carga com a finalidade de testar o comportamento da simulação ao solicitar ≈ 100 mA. O circuito apresentado simplifica a equação necessária para determinar a tensão de saída, visto que a maior parte da corrente flui através do transistor de maior potência. Sendo R_1 e R_2 substituídos por um potenciômetro. A Equação (3.3) apresenta o cálculo utilizado.

$$V_{ou} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)V_{ref} \quad (3.3)$$

Por haver um circuito limitador de tensão, faz-se necessário também um estágio limitador de corrente. Essa tarefa ficou a cargo do fusível rearmável, que além da limitação de corrente, também oferece proteção térmica ao circuito. Este componente foi conectado logo na sequência da saída regulada.

3.3.2.2 Conversores CC-CC

Os super capacitores possuem características de se carregarem e descarregarem rapidamente, porém, as baterias descarregam a uma taxa constante e uniforme, até a tensão mínima limite, momento em que as baterias são consideradas descarregadas e será necessário a recarga. Nesse ponto, não é recomendável mais seu uso, em caso de ultrapassá-lo poderá acarretar danos permanentes. Já os super capacitores, conforme explorados nessa pesquisa, fornecem sua energia de forma linear. Isso poderia ser um problema aos sistemas embarcados que recorrentemente operam em tensões de 5 V ou 3,3 V.

Em virtude desse fato, são necessários artifícios eletrônicos para adequação da tensão para mantermos em níveis confiáveis aos sensores e microcontroladores, permanecendo em faixas de tensão recomendadas pelos fabricantes. Caso contrário, os circuitos eventualmente podem operar de formas instáveis, reduzindo drasticamente a segurança e confiabilidade dos dispositivos IoT.

No intuito de reverter essa queda de tensão linear característica dos super capacitores os circuitos conversores $CC - CC$ são uma solução. Os conversores $CC - CC$ são circuitos eletrônicos ou até mesmo equipamentos que possuem a capacidade de converter um nível de tensão contínua para outro nível também em tensão contínua, seja rebaixando ou elevando este sinal.

Tendo em mente o comportamento do super capacitor e como operam os conversores do tipo $CC - CC$, foram adicionados dois conversores, um rebaixador e um elevador. O conversor rebaixador tem o papel de adequar a tensão para alimentar o super capacitor, e um outro conversor elevador tem a função de adequar o nível de tensão para microcontrolador e os sensores embarcados no projeto.

Super capacitores operam em baixa tensão e ao ser demandada corrente pela carga sua tensão cai linearmente, o que é inadequado para a maioria das aplicações de alimentação de circuitos eletrônicos, como os chips microcontroladores e conjunto de sensores para IoT.

O capacitor determinado para o protótipo foi o 500 F como tensão nominal de 2,7 V por oferecer tempo de redundância significativamente maior do que o de 100 F para

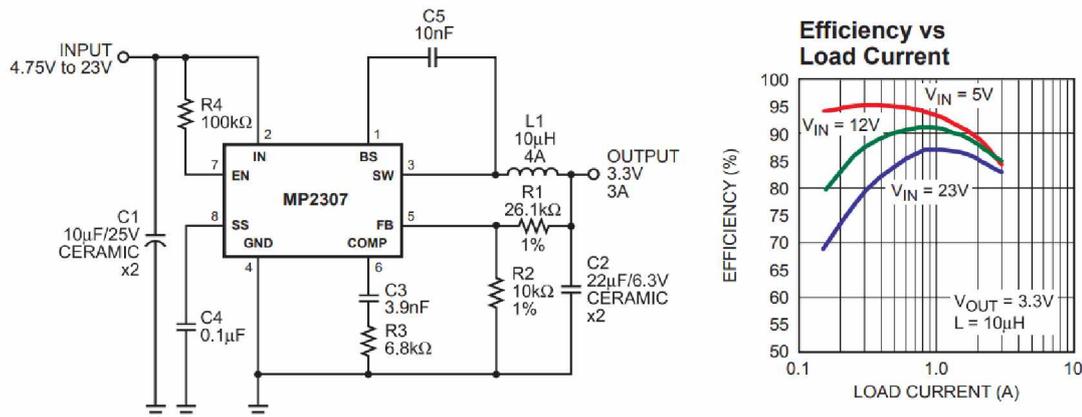
o caso de eventual falta de energia.

Ao analisarmos de forma sequencial o projeto da fonte poderíamos cogitar a utilização do circuito limitador de tensão em 2,7 V conectado diretamente ao super capacitor. Entretanto, isso causaria uma grande perda de energia visto que toda a elevação de tensão excedente fornecida pelo dobrador de tensão seria dissipada em forma de calor pelo transistor MOSFET limitador.

Dessa forma, se tornou mais adequada a utilização de um circuito conversor $CC - CC$ rebaixador de alta eficiência. Dentre suas funções, o conversor tem a capacidade de operar em malha fechada de modo a sempre adequar a tensão de saída para 2,7 V independente da tensão de entrada. Este processo aumenta significativamente a eficiência da carga do capacitor e o mantém sempre conectado, drenando apenas mínimas correntes de manutenção para o caso de totalmente carregado.

O chip empregado para construção do conversor $CC - CC$ rebaixador foi o MP2307 da fabricante MPS, que possui alta eficiência de conversão, operando 340 KHz, com o entrada máxima de 23 V, saída regulável com corrente máxima de 3 A, e dissipação máxima de 2 W (MPS (2023)). A Figura 44 apresenta o diagrama elétrico e o gráfico de eficiência fornecidos pelo fabricante.

Figura 44 – Diagrama elétrico recomendado pelo fabricante e o gráfico de eficiência.



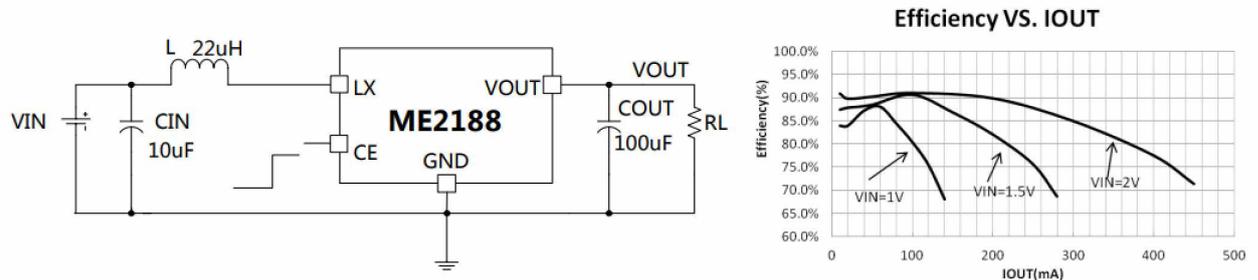
Fonte: Adaptado de MPS (2023).

Conforme detalhado, à carga do super capacitor, é necessário adequar a tensão de saída para disponibilizá-la aos circuitos de controle e sensoriamento do dispositivo IoT. Porém, os microcontroladores geralmente operam em valores de tensão um pouco superior a tensão do super capacitor.

A fim de reverter essa situação, uma vez que o microcontrolador aplicado a este projeto opera em 3,3 V, foi necessária a adição de um circuito elevador de tensão. Utilizou-se um circuito elevador de tensão baseado no chip ME2188 da fabricante Microne, este chip tem alta eficiência de conversão, operando em 320 KHz, entrada de 0,9 V até 3 V,

como saída estável fica em 3,3 V e corrente de manutenção de 7,5 μA MicrOne (2023). A Figura 45 apresenta o diagrama elétrico e o gráfico de eficiência.

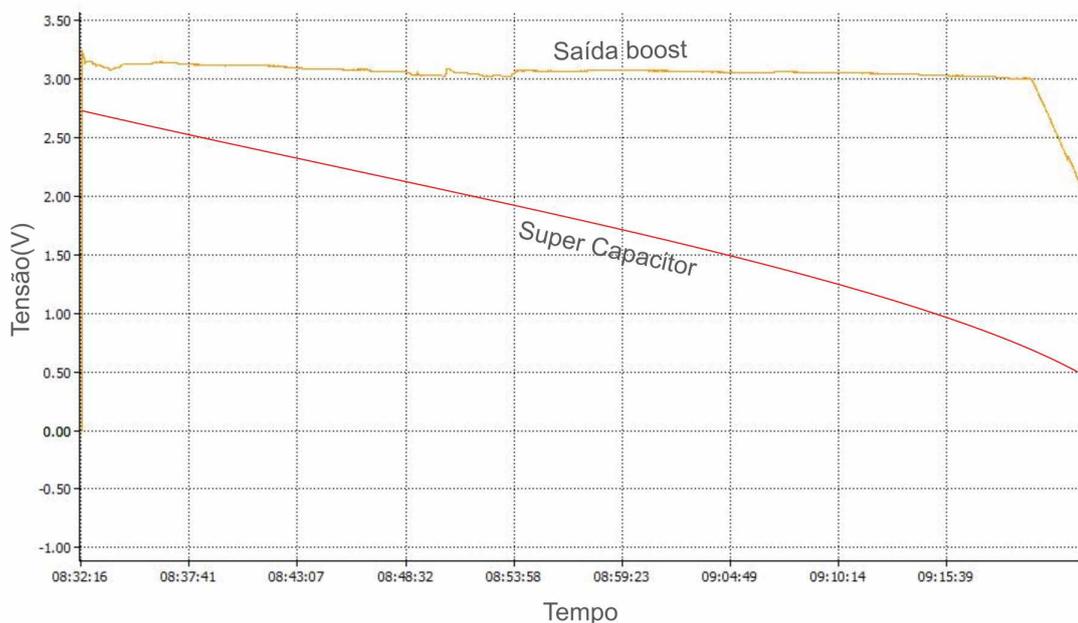
Figura 45 – Diagrama elétrico recomendado pelo fabricante e o gráfico de eficiência.



Fonte: Adaptado de MicrOne (2023).

Para confirmar se de fato o conversor elevador de tensão teria a capacidade esperada e descrita pelo fabricante, o componente foi testado utilizando-se a carga eletrônica de forma a demandar 100 mA até que a tensão caísse. A Figura 46 mostra o resultado do teste.

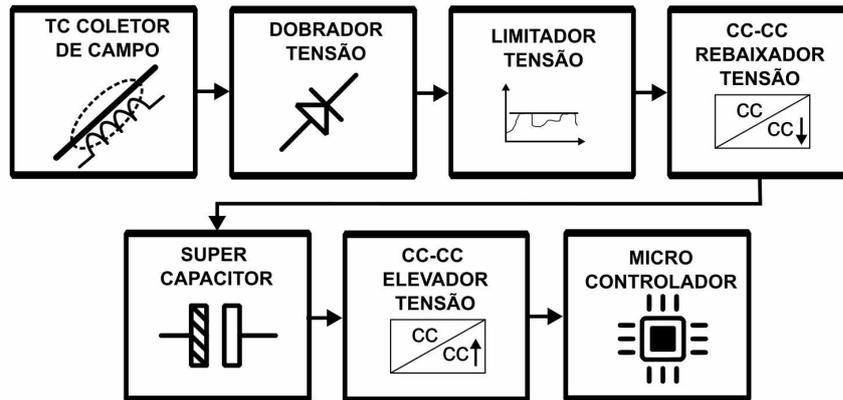
Figura 46 – Resultado do teste da tensão do super capacitor e da atuação do elevador de tensão sob demanda de 100 mA.



Fonte: O Autor (2023).

Conforme apresentado na Figura 46, a tensão se manteve estável mesmo com a questão de tensão linear do capacitor, comprovando sua estabilidade em aplicações microcontroladas por chips *low power*. Tem-se agora, na Figura 47, o diagrama de blocos do projeto para a fonte.

Figura 47 – Fluxograma da fonte de alimentação com ajustes de tensão.



Fonte: O Autor (2023).

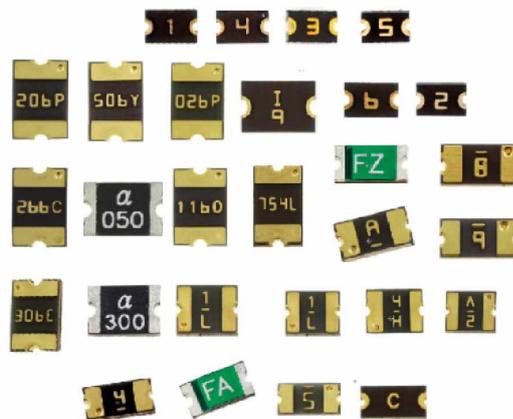
A Figura 47 ilustra todas as etapas de adequação de tensão desde a coleta direta do campo até a alimentação do microcontrolador.

3.3.3 Segurança

Um dos critérios desse projeto de pesquisa foi que os circuitos construídos prezassem pela maior estabilidade possível, bem como critérios de segurança e de *backup*, resguardando a operação do dispositivo mesmo que houvesse interrupções da fonte de energia.

Para que houvesse ainda mais proteção e estabilidade ao circuito, visto que é um protótipo, um estágio de proteção térmica e de sobre corrente foi adicionado utilizando o fusível rearmáveis, em inglês *polyfuse* ou *polyswitch* (ambos nomes são válidos para buscas). A Figura 48 mostra alguns modelos de fusíveis rearmável.

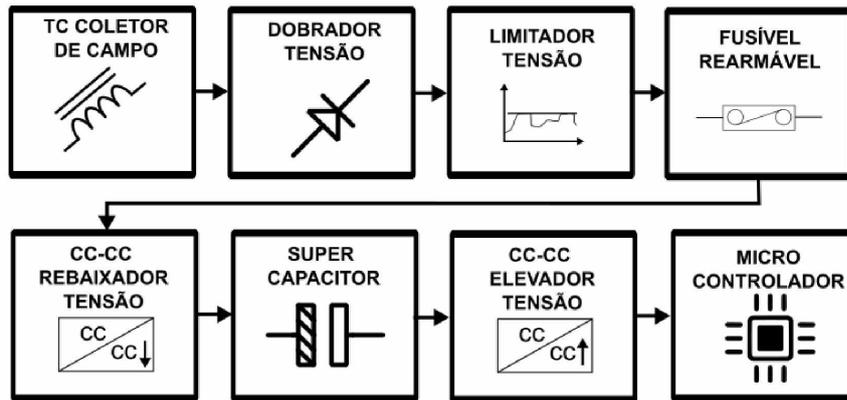
Figura 48 – Modelos comerciais de fusíveis rearmáveis.



Fonte: Adaptado de Littelfuse (2023).

Por fim, temos o diagrama completo da Fonte de Alimentação para o protótipo IoT apresentado na Figura 49.

Figura 49 – Diagrama de blocos detalhando toda a fonte de alimentação construída.



Fonte: O Autor (2023).

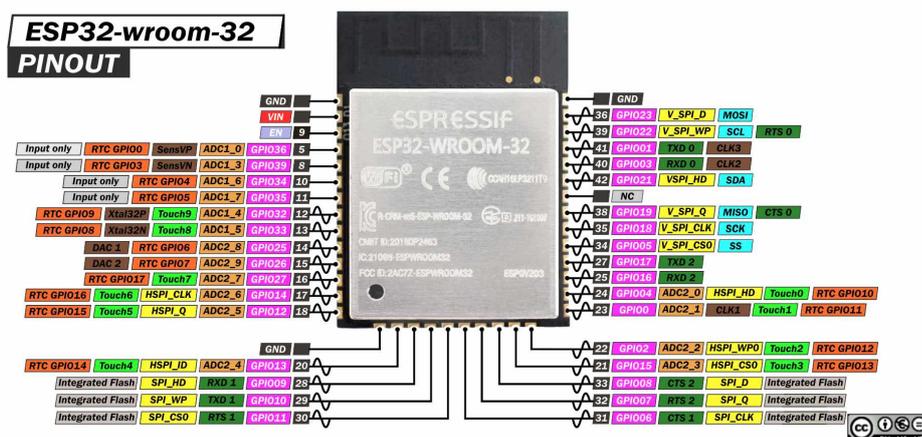
Todas as etapas foram concebidas para deixar o circuito otimizado em termos de potência (dobrador de tensão), seguro (fusível rearmável), redundante (super capacitor) e coerente (conversores e limitadores).

3.4 AVALIAÇÃO DOS MÓDULOS LORA

Um dos requisitos básicos para um dispositivo ser considerado IoT é que obrigatoriamente ele tenha acesso a internet. Na área de sistemas embarcados, existem várias possibilidades para promover a conectividade com a nuvem, desde Wi-Fi até a tecnologia LoRa. A partir disso, foi escolhido para esse trabalho o versátil microcontrolador ESP-32.

O chip ESP-WROOM-32, possui em si núcleo de processamento Dual-Core Tensilica Xtensa LX6 de 32 bits, clock de até 240 MHz, periféricos Wi-Fi e Bluetooth LE. O chip poder ser vista na Figura 50.

Figura 50 – Imagem do ESP32 com funcionalidade disponível em cada pino.

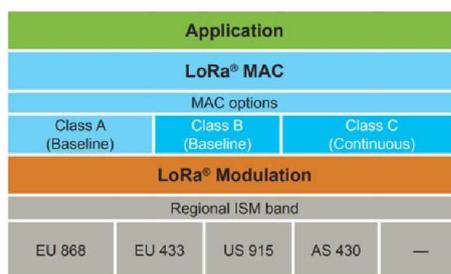


Fonte: Adaptado de Systems (2023).

Esse chip também possui a capacidade de entrar em estados de hibernação, em que ele desliga todos os periféricos desnecessários. Ou seja, assim que ele executa suas tarefas, passa a dormir por tempo determinado via programação, e só acorda em intervalos definidos, operando assim em sono leve seu consumo é de aproximadamente 0,8 mA e em sono profundo aproximadamente 10 μ A.

Ao utilizar a tecnologia LoRa, é importante a compreensão entre a modulação LoRa (vastamente descrita no Capítulo 5) e a camada de aplicação que faz referência principalmente ao protocolo LoRaWAN. A Figura 51 tem o objetivo de ilustrar essa separação.

Figura 51 – Separação entre a camada de modulação e a camada de aplicação como o LoRaWan.



Fonte: Ertürk et al. (2019)

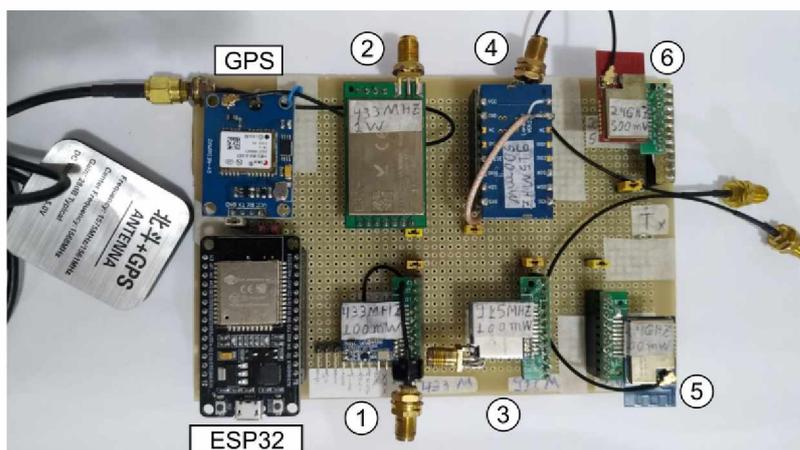
A arquitetura LoRa é basicamente uma estrutura em topologia estrela onde existem nós ou *end nodes* e também concentradores ou *gateways*. Os concentradores são os pontos de interconexão entre nós e a internet. Para que fossem feitos os testes iniciais, a estrutura utilizada foi feita com enlaces ponto a ponto sem a presença de concentradores, devido ao fato de o interesse maior nesse momento ser apenas a avaliação de consumo e alcance.

3.4.1 Modelos dos módulos LoRa

Para que este trabalho de pesquisa atingisse seus objetivos propostos, alguns módulos de rádio frequência baseado na tecnologia LoRa de diferentes fabricantes foram adquiridos. Porém, a empresa que detém a patente da tecnologia LoRa é da fabricante Semtech Corporation, ou seja, mesmo placas diferentes em seus núcleos terão sempre chips Semtech.

A Figura 52 mostra uma das duas placas que foram desenvolvidas como um módulo de saque rápido para testes em campo com todos os módulos adquiridos conectados, bastando um par de módulos e a atualização do *software* do microcontrolador ESP32 para já estar em comunicação. A Tabela 10 apresenta o modelo de cada um dos módulos utilizados e seus devidos transceptores internos.

Figura 52 – Placa de saque rápido para testes em campo com os módulos LoRa.



Fonte: O Autor (2023).

Tabela 10 – Modelos transceptores LoRa e suas características técnicas.

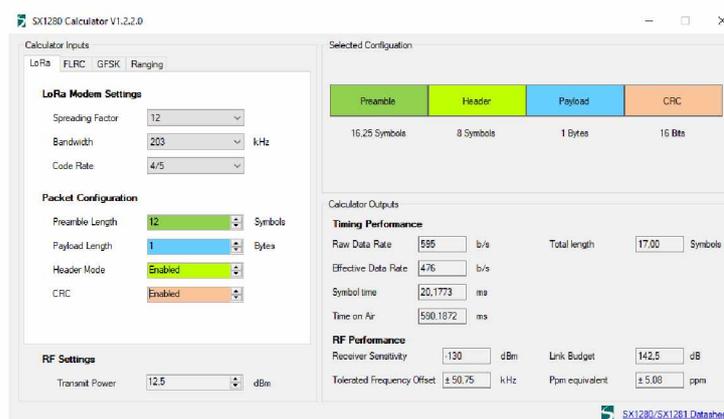
	Modelo	Frequência	Potência Nominal RF	Transceptor
1	XL1278-SMT	433 MHz	100 mW	SX1278
2	Ebyte E32 433T30D	433 MHz	1 W	SX1278
3	G-NiceRF 2AD66-LORAV2	915 MHz	100 mW	SX1278
4	G-NiceRF LoRa1276F30	915 MHz	500 mW	SX1278
5	Ebyte E28-2G4M20S	2,4 GHz	100 mW	SX1280
6	Ebyte E28-2G4M27S	2,4 GHz	500 mW	SX1280

Fonte: O Autor (2023).

3.4.2 Parametrização dos módulos LoRa

A fabricante de chips Semtech Corporation com a finalidade de estimular a adesão dos engenheiros e desenvolvedores aos seus produtos oferece gratuitamente um *software* de cálculos para utilização de alguns de seus componentes. A Figura 53 apresenta a interface.

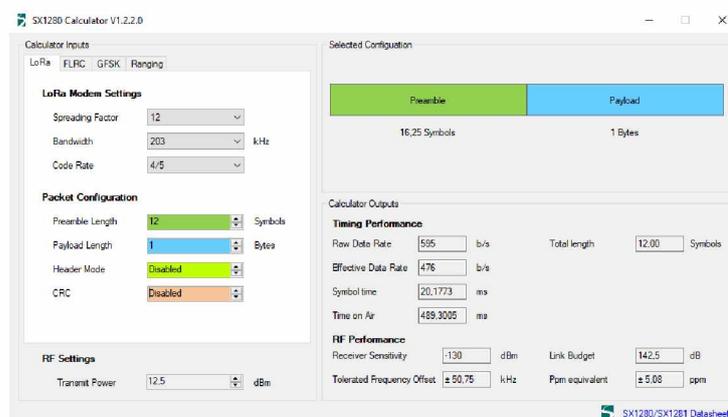
Figura 53 – Interface do *software* fornecido pela Semtech Corporation para cálculo de enlaces LoRa e LoRaWan.



Fonte: O Autor (2023).

Conforme detalhado no Capítulo 4, os pacotes de dados da tecnologia LoRa são configuráveis de acordo com a necessidade do usuário e da aplicação. A exemplo do cabeçalho CRC, conforme apresentado na Figura 54, onde há apenas preâmbulo e a carga de dados.

Figura 54 – Interface *software* com resultados para situação de apenas preâmbulo e carga de dados.



Fonte: O Autor (2023).

Baseado nestes resultados, os módulos LoRa utilizados nos testes foram parametrizados. Ressalta-se a limitação do *software* em não oferecer a inserção de valores manualmente, mas apenas valores pré-definidos nos campos com as opções. A fim de padronizar o ensaio em todos os módulos, os mesmos parâmetros foram utilizados em todos os casos.

Os parâmetros são:

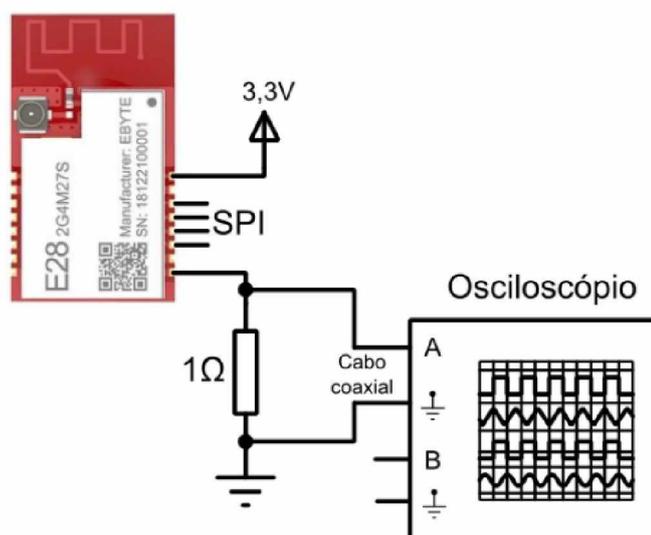
- Espalhamento Espectral: 12
- Largura de banda: 200
- Taxa de codificação: 4/5
- Largura de preâmbulo: 12
- Largura de carga de dados: 1
- Potência: Máxima de cada módulo

3.4.3 Consumo de energia

Para que fosse possível avaliar o consumo individualmente de cada um dos módulos LoRa, a placa de testes possui em sua parte inferior, em cada uma das conexões dos módulos, um resistor de $1\ \Omega$ com 1 % de precisão atuando como um resistor shunt (resistor de desvio). Durante os testes, também foi avaliado o consumo do microcontrolador que em todos os casos ficou em aproximadamente de 60 mA.

Esse método é semelhante ao utilizado em amperímetros e baseia-se na lei de Ohm, em que ao considerar o valor de $1\ \Omega$, a queda de tensão sobre o resistor passa a ser exatamente a corrente que flui naquele ponto. A Figura 55 ilustra esse método de medição.

Figura 55 – Método de medição de corrente.

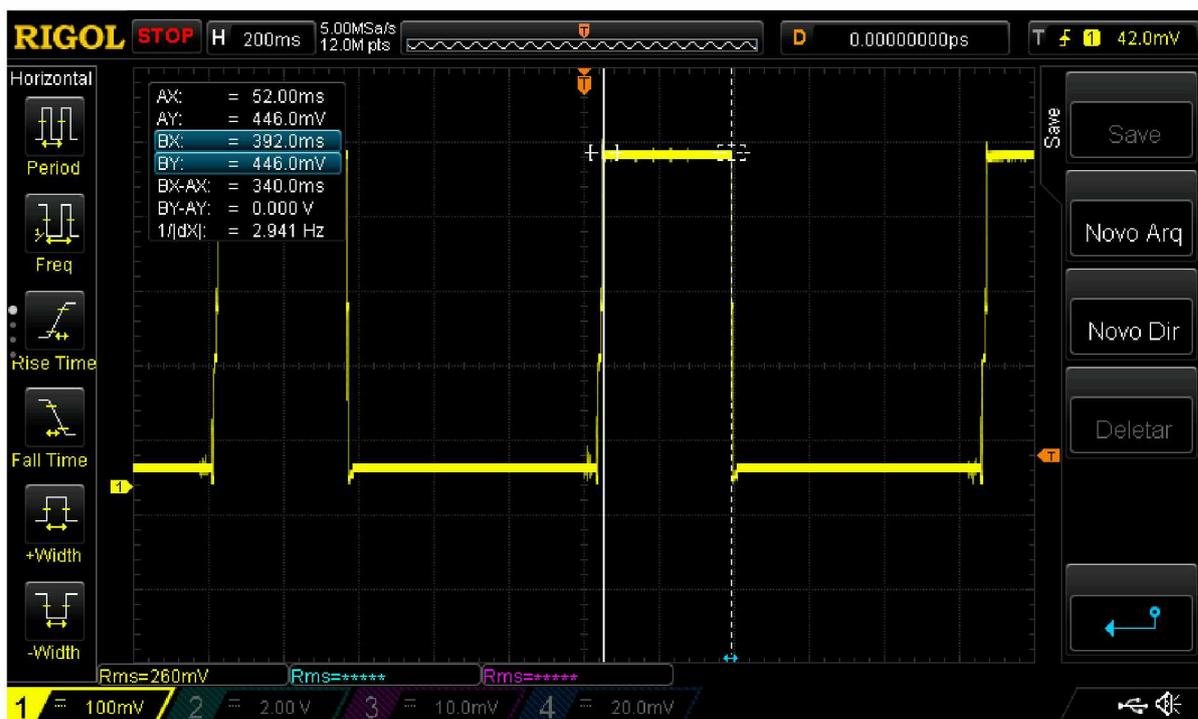


Fonte: O Autor (2023).

A utilização de cabos coaxiais blindados colaborou substancialmente para redução de ruídos, visto que são tensões na ordem de milivolts. Desse modo foi possível mensurar a corrente demandada por cada um dos módulos LoRa, e o tempo de duração de cada rajada de transmissão de dados.

A Figura 56 mostra a tela do osciloscópio utilizado (Rigol ds1054z de 4 canais, 50 MHz) durante o processo de medição. Utilizando os cursores do instrumento, foi possível medir precisamente o tempo que leva cada uma das rajadas de transmissão.

Figura 56 – Medida feita para o transceptor LoRa Ebyte E32 433T30D(TTL-1W).



Fonte: O Autor (2023).

O intervalo medido pelos cursores no visor do osciloscópio mostra como é feita a medição de tempo e consumo para cada transmissão de dados completa do transceptor LoRa .

Parte IV

Resultados e Discussões

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a apresentação de toda fundamentação teórica e metodologia utilizada para a investigação das hipóteses levantadas durante o decorrer desta pesquisa, neste Capítulo, são apresentados os resultados provenientes da construção do protótipo e dos testes e cálculos de autonomia.

4.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SUPER CAPACITOR

A Figura 57 mostra os super capacitores que foram utilizados com o fim de substituir as baterias convencionais. Utilizando-se dos mesmos parâmetros das baterias para os super capacitores, eles foram testados utilizando a carga eletrônica.

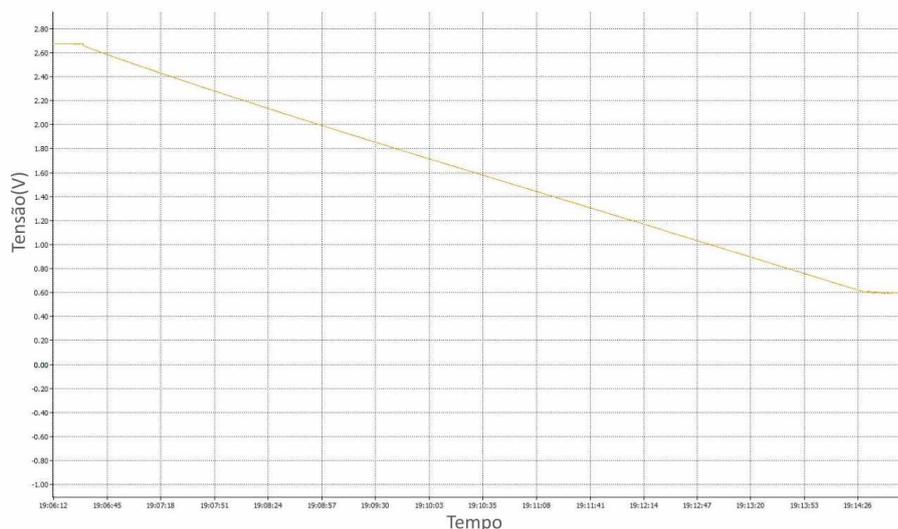
Figura 57 – Super capacitores 500 F e 100 F, ambos 2,7 V.



Fonte: O Autor (2023).

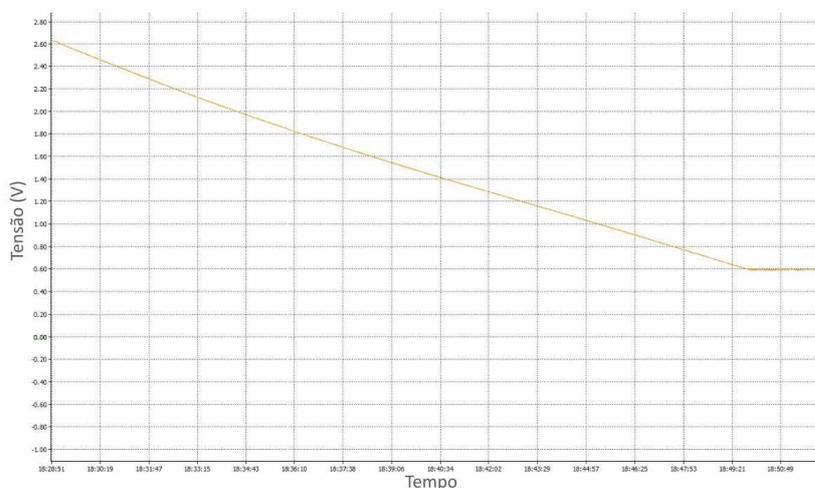
Conforme esperado, seu comportamento de tensão foi linear ao ser demandado 500 mA. As Figuras 58 e 59 apresentam os gráficos de tensão para os super capacitores de 100 F e 500 F.

Figura 58 – Tensão no super capacitor de 100 F ao ser demandado 500 mA.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 59 – Tensão no super capacitor de 500 F ao ser demandado 500 mA.



Fonte: O Autor (2023).

A partir dos testes utilizando a carga eletrônica foi possível gerar os parâmetros apresentados na Tabela 11, e posteriormente, calcular a Densidade de Energia contida em cada um dos super capacitores, conforme apresentando na Tabela 12.

Tabela 11 – Resultados dos testes aplicados ao super capacitores demandados 500 mA.

Modelo Capacitor	Tensão Carreg.(V)	Tensão Desc.(V)	Corrente (A)	Energia (Wh)	Capac. (mAh)	Peso (g)	Duração (hh:mm:ss)
100 F	≈ 2,7	0,6	0,5	0,1428	68	20,5	0:08:33
500 F	≈ 2,7	0,6	0,5	0,3759	179	61,2	0:23:03

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 12 – Comparativo entre dados nominais e dados a partir de testes.

Modelo Capacitor	Capacidade (mA/h)	Energia Calculada (W/h)	Energia Teste (W/h)	Densidade Ener. Calc. (Wh/kg)	Densidade Ener. Teste (Wh/kg)
100 F	68	0,10125	0,1428	4,939	6,965
500 F	179	0,50625	0,3759	8,272	6,142

Fonte: O Autor (2023).

Conforme vastamente explorado pelos testes aqui apresentados, fica evidente que a Densidade de Energia contida em baterias é muito superior à Densidade de Energia de super capacitores. Porém, também é evidente que os super capacitores possuem potencial de substituir as tradicionais baterias em algumas aplicações de IoT. Salienta-se que as baterias têm vida útil em ciclos muito inferior à de super capacitores, outro fator a ser considerado são as questões de segurança e sustentabilidade.

Como já descrito anteriormente, para a correta utilização de baterias como redundância de energia, é necessário uma série de circuitos de gestão e controle, visto que, em geral, drenar de uma bateria de Li-Po de 3,7 V tensões inferiores a 2,75 V já pode danificá-la, além de envolver questões de segurança como temperatura e até mesmo riscos de explosões e incêndios.

Para isso, é necessário que bancos de baterias possuam o BMS (*Battery Management System*, em tradução livre, Sistema de Gerenciamento de Baterias), que é uma tecnologia dedicada à supervisão de conjuntos de células de bateria, organizada eletricamente em uma configuração de matriz de linhas \times colunas para permitir a entrega de uma faixa específica de tensão e corrente por um determinado período.

Ao passo que para a utilização de super capacitores em associações em série, bastam alguns simples componentes para que não fiquem sujeitos a diferenças de potencial maior do que seu valor nominal de operação.

Dito isso, e visando a maior versatilidade do projeto objeto dessa pesquisa, os super capacitores mostram-se uma solução viável. Visto que em teoria as interrupções de energia elétrica das concessionárias de energia não são tão longas, então a utilização de super capacitores como fonte de energia redundante aos sistemas de energia coletada torna-se uma solução versátil, de baixo nível de manutenção, alta autonomia e alinhado aos valores de sustentabilidade.

O trabalho de Pop-Vadean et al. (2017) usou super capacitor como redundância para sistemas com energia coletada de vários tipos, incluindo a solar. No trabalho, ele conclui que, apesar da busca por circuitos sem baterias convencionais, os capacitores podem ser um auxílio para estender a vida útil delas.

Akan et al. (2018) criou uma arquitetura bem inovadora na qual ele coleta energia

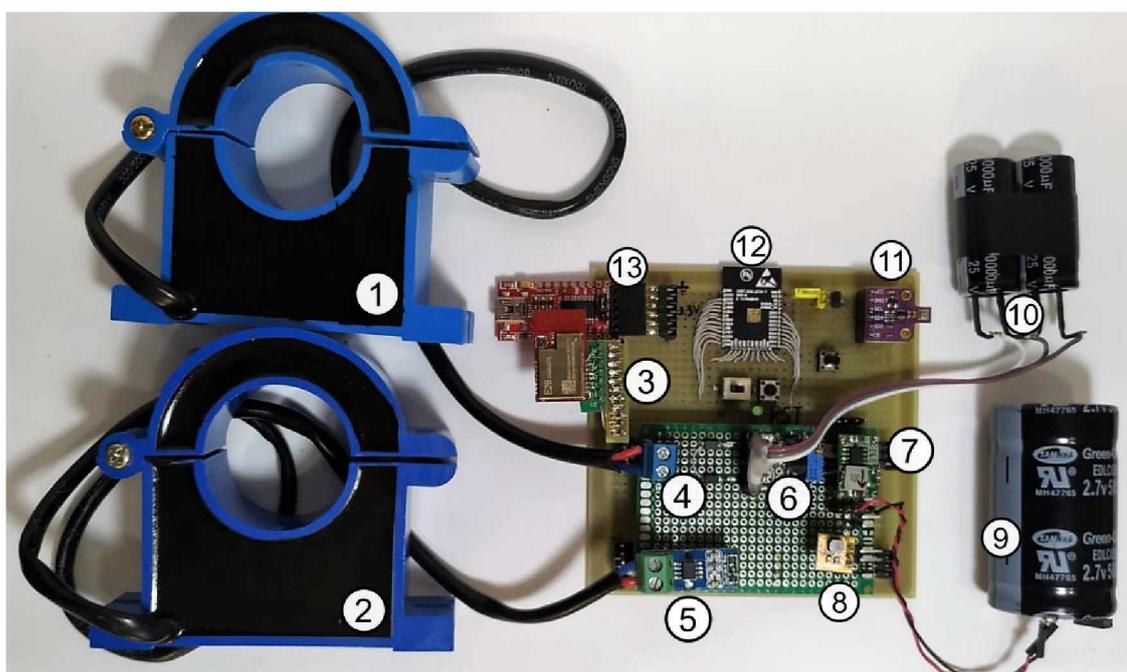
de várias fontes para mitigar o problema de baixa densidade nos sistemas de energia coletada. A junção de toda essa alimentação é centralizada em um super capacitor.

Na pesquisa de Sanislav et al. (2018), é usada a energia coletada RF e para redundância um super capacitor de 50 mF. O tempo de recarga foi de 2 min e 40 s, conferindo um ciclo bem rápido de utilização, comparado com o deste trabalho que pela simetria da descarga, se recarregaria em 23 minutos, mas, no entanto oferece bem mais energia.

4.2 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

O principal objetivo desta pesquisa foi alcançar um dispositivo IoT para aplicações reais. Para isso, foi necessária uma avaliação criteriosa de cada um dos componentes para que se chegasse a um design que integrasse todos os dispositivos. Dessa forma, o protótipo construído teve como principal premissa a eficiência energética. A Figura 60 mostra a foto do protótipo completo, e na sequência cada uma das partes será detalhada.

Figura 60 – Imagem do protótipo construído.



Fonte: O Autor (2023).

1. Transformador de corrente como coletor de campo

Este TC é responsável por coletar o campo eletromagnético ao redor de condutores carregados com a vantagem de ser do tipo toroide não invasivo de núcleo dividido, o que facilita a sua instalação.

2. Transformador de corrente medidor de corrente

Esse segundo TC é semelhante ao primeiro, porém sua finalidade é apenas medir a intensidade da corrente que flui pelo condutor.

3. Módulo LoRa

O protótipo pode ser utilizado com vários módulos diferentes de LoRa. Na imagem, está especificamente mostrado o Ebyte E28-2G4M27S.

4. Circuito dobrador de tensão

Este circuito recebe a tensão alternada proveniente do TC coletor de campos (fonte da energia eletromagnética coletada) e converte para tensão contínua com o dobro da tensão RMS de entrada. Dessa forma, mesmo que a tensão de entrada CA seja reduzida, (devido a redução do campo magnético) a tensão CC se manterá elevada o suficiente para manter os níveis mínimos de energia para os circuitos subsequentes, como os conversores *CC-CC* que carregam o super capacitor.

5. Sensor de efeito Hall

Este é o sensor ACS712 que baseia-se em efeito Hall e tem a finalidade de converter a corrente fornecida pelo secundário do TC para uma tensão proporcional, visto que os circuito ADC dos microcontroladores operam medindo apenas baixas tensões.

6. Circuito de proteção

Oferece ao conversor rebaixador de tensão (componente subsequente) proteção, limitando a tensão máxima que poderia chegar em sua entrada, isso se deve pelo fato de o circuito dobrador de tensão não possuir controle. O que poderia injetar ao conversor *buck* tensão superior ao seu limite podendo danificá-lo.

7. Conversor CC-CC rebaixador

O conversor *CC – CC* de alta eficiência modelo MP2307 tem a finalidade de reduzir a tensão para níveis adequados a carregar o super capacitor que opera em 2,7 V.

8. Conversor CC-CC elevador

Este dispositivo é um conversor *CC – CC* de alta eficiência modelo ME2188, cujo objetivo é elevar a tensão fornecida pelo super capacitor de 2,7 V, para 3,3 V, a fim de atender ao nível de tensão requerido para o adequado e confiável funcionamento do microcontrolador e outros circuitos relacionados. A elevação da tensão se faz necessária tanto em razão das limitações inerentes ao próprio super capacitor quanto à redução linear de tensão que ocorre durante o seu funcionamento.

9. Super Capacitor

Capacitor de alta capacidade com 500 F e 2,7 V que tem por objetivo ser a redundância de energia para todo o circuito.

10. Capacitor dobrador de tensão

São os capacitores eletrolíticos de 10.000 μF que atuam como parte do circuito dobrador de tensão. Operam armazenando a corrente CC proveniente dos diodos em um semiciclo, no semiciclo seguinte somam as tensões armazenadas. Obrigatoriamente fornecendo uma saída em corrente CC.

11. Sensor de parâmetros ambientais

Este é o sensor BME680 da fabricante Bosch. Ele possui em um único componente medições de temperatura, umidade, pressão atmosférica e qualidade do ar, operando em 3,3 V e possui baixo consumo de energia.

12. Microcontrolador ESP32

O microcontrolador ESP32 da fabricante *Espressif Systems* foi o componente de controle escolhido devido a quantidade de recursos, como os modos de baixo consumo de energia, várias possibilidades de conectividade e baixo custo.

13. Conversor de interfaces FTDI

Esta placa funciona como conversor de interfaces, possibilitando a comunicação entre o padrão USB (*Universal Serial Bus*) e o padrão UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) de níveis lógicos 3,3 V, que são o sinais necessário para comunicação entre o computador e o microcontrolador, conseqüentemente é o meio pelo qual se faz a atualização do *firmware* e possibilita também o processo de depuração.

4.3 CONSUMO DE ENERGIA DOS MÓDULOS LORA

A Tabela 13 apresenta a medição para cada um dos módulos transceptores LoRa considerando o tempo para a uma transmissão de dados. Os valores foram obtidos seguindo o método descrito na Seção 3.4.3.

Tabela 13 – Resultados das medições de consumo dos módulos de rádio LoRa.

	Modelo	Potência Nominal RF	Corrente (mA)	Tempo (ms)	Potência p/ rajada (W)	Energia (Ws)
1	XL1278-SMT	100 mW	80	1310	0,264	0,345840
2	Ebyte E32 433T30D	1 W	446	340	1,4718	0,500412
3	G-NiceRF 2AD66	100 mW	134	288	0,4422	0,127353
4	G-NiceRF LoRa1276F30	500 mW	230	286	0,759	0,217074
5	Ebyte E28-2G4M20S	100 mW	52	888	0,1716	0,152380
6	Ebyte E28-2G4M27S	500 mW	22	892	0,0726	0,064759

Fonte: O Autor (2023).

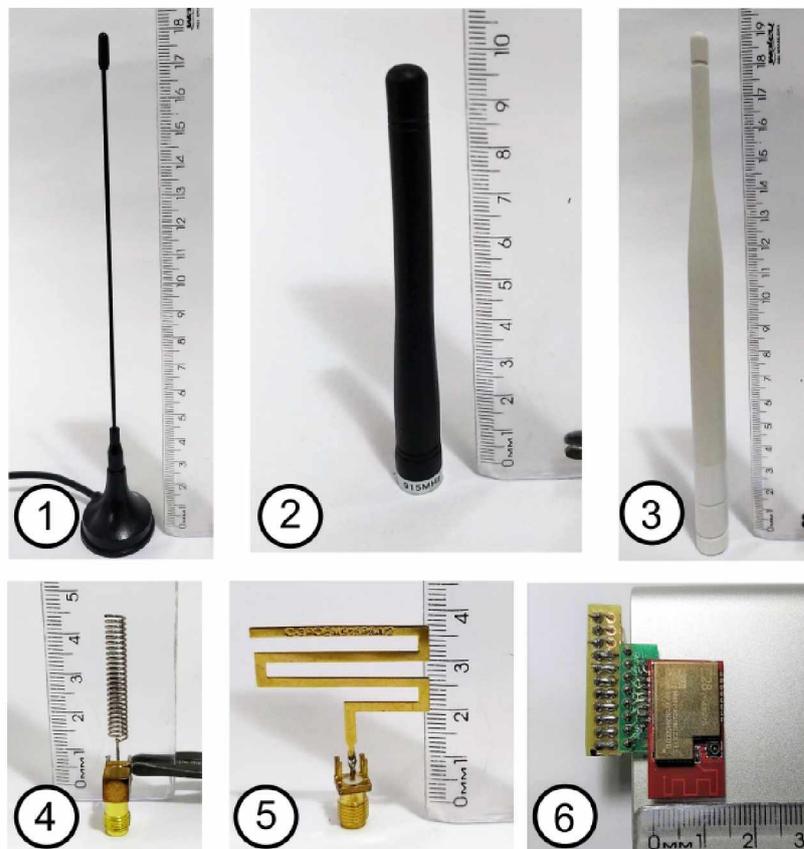
A partir dos resultados contidos na Tabela 13, fica claro que os módulos variam muito em níveis de consumo, mas também é perceptível que o consumo é relativamente

baixo, além do fato de todos eles ainda possuírem recursos internos para serem colocados em modo de hibernação através da comunicação com o microcontrolador, o que reduz sua corrente de manutenção para escala de microamperes.

4.3.1 Alcance dos módulos LoRa

Afim de avaliar o real alcance de cada um dos transceptores, foram feitos testes em campo. Para tanto, foram adicionadas, as placas de teste, um módulo GPS em cada uma delas, modelo G6-HW-09005-E com acurácia média de 2,5 m, de acordo com o próprio fabricante. Isso possibilitou que fossem feitos testes práticos de alcance entre os módulos LoRa; validando qual seria o mais adequado para essa pesquisa partindo de pressupostos de eficiência. A Figura 61 mostra cada uma das antenas utilizadas e a Tabela 14 mostra suas respectivas características técnicas.

Figura 61 – Antenas utilizadas para os testes de alcance.



Fonte: O Autor (2023).

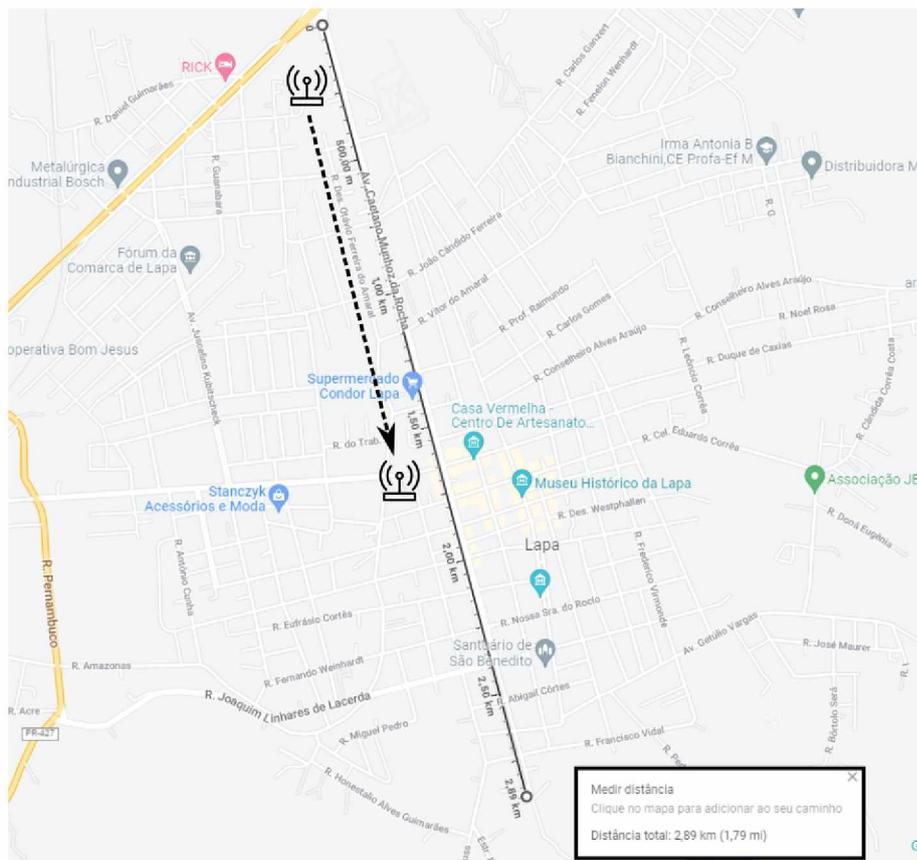
Tabela 14 – Características nominais das antenas utilizadas para os testes de alcance.

	Modelo	Frequência	Ganho Nominal (dBi)
1	Monopolo	433 MHz	3
2	Monopolo	915 MHz	3
3	Monopolo	2,4 GHz	5
4	Helicoidal	433 MHz	2,2
5	Monopolo	915 MHz	5,1
6	PCB	2,4 GHz	2

Fonte: O Autor (2023).

O local selecionado para os testes de medição foi o perímetro urbano da cidade da Lapa-PR. O objetivo seria manter a visada direta no maior percurso possível, o que se torna uma tarefa difícil, visto haver limitações de altura para colocação dos módulos. Apesar de ser um ambiente urbano com árvores, veículos e pequenos obstáculos, o fato de ser um percurso em linha reta de extensão de 2,8 km colaborou bastante para os testes. A Figura 62 apresenta o mapa do local dos testes.

Figura 62 – Percurso utilizados para os testes.



Fonte: O Autor (2023).

O teste baseou-se em uma das placas (Figura 52), com apenas um módulo LoRa conectado por vez, instalado a uma altura de aproximadamente 2 m do chão, operando como transmissor de dados enviando uma *string* com 12 *bytes* juntamente com o valor de um contador numérico crescente, ambos implementados dentro do *software* do microcontrolador ESP32. O contador tem o papel de avaliarmos a perda de dados.

Para a placa de testes operando como receptor, teve a função de receber os dados e exibi-los através da interface USB via *software* monitor serial e juntamente a isso os dados provenientes do módulo GPS embutido na placa.

Dessa forma, o receptor foi instalado na parte externa de um carro até que cessasse o recebimento dos dados, monitorando-se o alcance via coordenadas de GPS. A velocidade média do veículo foi de aproximadamente 20 km/h para todos os testes.

Após a organização e análise dos resultados, pôde-se avaliar qual o comportamento real dos módulos LoRa utilizados. Na Tabela 15, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 15 – Alcance máximo de sinal dos módulos LoRa para variados modelos de antenas.

Frequência Mod. LoRa	Potência RF	Ant. 2 dBi	Ant. 3 dBi	Ant. 3 dBi	Ant. 5,5 dBi	Ant. 2 dBi	Ant. 5 dBi
433 MHz	100 mW	1,060 km	1,44 km				
433 MHz	1 W	0,948 km	1,30 km				
915 MHz	100 mW			0,773 km	1,16 km		
915 MHz	500 mW			1,220 km	1,52 km		
2,4 GHz	100 mW					484,00 m	180,36 m
2,4 GHz	500 mW					867,43 m	467,61 m

Fonte: O Autor (2023).

Como esperado e apresentado na Tabela 15, a potência e o tipo de antena são fatores determinantes para o alcance do sinal. Os resultados constataram também que não necessariamente a antena de maior ganho oferece ao transceptor o maior alcance, visto que as antenas originais dos módulos apresentaram melhor alcance em operação.

4.4 AUTONOMIA DO PROTÓTIPO

O dispositivo IoT em questão empregou os resultados previamente apresentados para a seleção da opção ideal entre os módulos LoRa que seriam incorporados ao protótipo final, levando em consideração critérios como consumo mínimo de energia, alcance máximo e a melhor antena disponível.

Dessa forma, a Tabela 16 apresenta os resultados da relação entre o alcance de sinal em metros pela demanda energética em *mW*, definindo a eficiência de cada uma dos transceptores LoRa e suas respectivas antenas.

Tabela 16 – Resultado comparativo entre o alcance de sinal e o consumo de energia.

Frequência Mod. LoRa	Potência RF	Ant. 2 dBi m/mW	Ant. 3 dBi m/mW	Ant. 3 dBi m/mW	Ant. 5,5 dBi m/mW	Ant. 2 dBi m/mW	Ant. 5 dBi m/mW
433 MHz	100 mW	0,24906	0,183				
433 MHz	1 W	1,55176	1,132				
915 MHz	100 mW			0,57174	0,38121		
915 MHz	500 mW			0,62213	0,49934		
2,4 GHz	100 mW					0,354545	0,95143
2,4 GHz	500 mW					0,00876151	0,0162529

Fonte: O Autor (2023).

Como fica claro a partir da Tabela 16, o módulo de 2,4 GHz, com potência de transmissão 500 mW e com antena 2 dBi construída diretamente na placa, obteve o maior alcance com o menor consumo de energia, sendo que cada metro percorrido consome 0,00876151 mW ou 8,76151 μ W ao considerar o maior alcance obtido.

Para que seja possível avaliar a autonomia do protótipo em relação à sua redundância baseado em super capacitor, é necessário levar em consideração todos os dispositivos conectados à fonte, sendo que a ESP32 e os sensores operam em 3,3 V.

Seus respectivos consumos típicos são:

- ESP32 - 60 mA;
- ACS712 - 10 mA;
- BME 680 - 12 mA;

Consumo total de corrente: 82 mA.

Além destes, cada modulo de LoRa possui um consumo de corrente diferente. A energia gasta em 1 s de todo o circuito com cada tipo de módulo discutido neste trabalho está apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 – Energia consumida por segundo no protótipo para cada tipo de antena.

	Modelo Freq.-Pot.	Corrente LoRa	Corrente dispositivos	Energia
1	433 MHz - 100 mW	80 mA	82 mA	535 mW.s
2	433 MHz - 1 W	446 mA	82 mA	1740 mW.s
3	915 MHz - 100 mW	136 mA	82 mA	719 mW.s
4	915 MHz - 500 mW	230 mA	82 mA	1030 mW.s
5	2,4 GHz - 100 mW	50 mA	82 mA	436 mW.s
6	2,4 GHz - 500 mW	22 mA	82 mA	343 mW.s

Fonte: O Autor (2023).

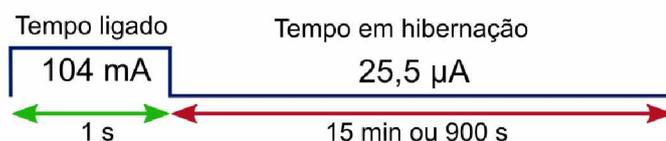
Na operação em campo, os dispositivos IoT permanecem em modo *deep sleep* (sono profundo ou hibernação), acordando apenas para transmitir e voltando, em seguida, ao sono

profundo. Tendo essas informações em vista, é possível estimar que o módulo completo tem consumo por segundo de operação que pode variar de 0,3432 Ws a 1,740 Ws dependendo do módulo LoRa escolhido, conforme exibido na Tabela 17.

Tendo em mente que a capacidade de fornecimento de energia do super capacitor de 500 F testado é de 1353,24 Ws, pode-se concluir então que, em modo contínuo de alimentação, a duração de fornecimento de energia poderá variar em aproximadamente entre 13 e 66 minutos, o que seria um cenário bastante improvável de ocorrer, pois o modo de operação de dispositivos IoT é geralmente mais 99% em modo em hibernação e todo o ciclo de operação que inclui inicialização do microcontrolador, coleta de dados dos sensores e execução de uma transmissão de dados pelo módulo LoRa dura, segundo os testes, em torno de 1 s. É importante salientar que, mesmo no período de hibernação dos módulos de controle, sensoriamento e comunicação sem fio, existe uma pequena corrente de fuga que continua a drenar energia do super capacitor no decorrer de longos períodos de tempo.

Considerando apenas o módulo LoRa de número 6 da Tabela 17, seu consumo de corrente em modo de hibernação é de 25,5 μA e 104 mA no período ativo. A Figura 63 ilustra o consumo de energia nas duas etapas de operação.

Figura 63 – Tempo e consumo de corrente do dispositivo em cada modo de operação.



Fonte: O Autor (2023).

Deste modo, mesmo que haja uma total ausência de campo magnético no local onde a energia é coletada, o dispositivo teria uma autonomia de aproximadamente 24 dias com o capacitor de 500 F.

4.5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Em termos gerais, os resultados apresentados nesta tese se mostraram como uma solução única em termos de circuito e aplicação juntos, mas, em termos de performance, se encaixam bem no que já tem sido apresentado por outros trabalhos. Gupta, Kandhalu e Rajkumar (2010) há mais de 10 anos, fazia um sistema que extraía de 1 mW a 2 mW de potência utilizando transformadores para coleta de campo magnético.

Nos dias atuais, esses valores são relativamente baixos, uma vez que na própria simulação de coleta demonstrada nesta pesquisa, foram obtidos valores superiores a 100 mW para valores de corrente a partir de 27,9 A.

O conjunto e sequenciamento de dispositivos, com base apenas na coleta de energia de campos magnéticos, apresentam uma nova abordagem nessa área de estudo. Entretanto, vários outros trabalhos podem ser comparados por terem aplicação similar ou utilizarem recursos semelhantes no circuito da fonte de alimentação.

No trabalho de Akan et al. (2018), é construído um sistema híbrido de coleta de energia, com baterias e várias fontes de energia coletada. Eles utilizam um sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, na sigla em inglês) no lugar do dobrador de tensão e utilizam métodos de regulação de tensão semelhantes por meio de conversores *CC-CC*. A proposta dos autores não é substituir completamente o uso de baterias, e sim, proporcionar maior longevidade. O uso do MPPT automaticamente faz com que seja um sistema que demande mais energia.

No caso de Wan, Salman e Stanacevic (2016), os mesmos utilizam um deslocador de fase para substituir a necessidade de usar circuitos retificadores e reguladores de tensão, apesar da redução das perdas de energia no processo, a solução apresentada não possui um sistema de redundância de energia.

Kawar, Krishnan e Abugharbieh (2021) focam mais no gerenciamento de energia do dispositivo IoT, independentemente do tipo de energia coletada. Esses autores desconsideram o caso de coleta em sistemas de alta potência, cujas coletas de energia dificilmente conseguem ultrapassar 0,6 V. Dessa forma, o trabalho foca mais em sistemas de baixa potência, incluindo LoRaWAN, como tecnologia de comunicação, e faz uso de um sistema de gerenciamento de alimentação semelhante a MPPTs. Também utilizou-se redundância de energia, mas com capacitores convencionais. O consumo total de energia foi próximo de 60 mWs, valor realmente reduzido, mas com quantidade de sensores limitada.

Saraereh et al. (2020), por sua vez, usaram, num contexto de coleta de energia térmica a combinação.

O estudo compreensivo de Riba, Moreno-Eguilaz e Bogarra (2022) discute mais sobre a coleta de energia em linhas de transmissão do que aplicações em IoT nesse contexto. O autor mostra que vários estudos recentes não conseguem passar a barreira dos 100 mW se não houver uma corrente da ordem de 1000 A em casos de coleta de campo magnético. Neste trabalho, para correntes a partir de 60 A foi possível alimentar um sistema de 343 mW. Há ainda uma discussão de como casos de coleta de campo magnético requerem bons materiais e circuitos eficientes.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de dispositivos IoT de baixo consumo e longo alcance desperta grande interesse tanto para a indústria quanto para diversas áreas de pesquisa, pois permite a criação de soluções inovadoras para uma ampla variedade de aplicações ou para a solução de problemas complexos que vão desde o monitoramento de processos industriais e agricultura de precisão, até a criação de sistemas de segurança e controle remoto de equipamentos e veículos, o que contribui para tornar as cidades mais eficientes, inteligentes e conectadas.

Dentro do contexto proposto, dispositivos IoT alimentados por energia coletada de campos magnéticos provenientes de condutores carregados demonstrou ser uma solução promissora em projetos de sistemas embarcados que necessitam operar em situações em que os principais critérios sejam a confiabilidade e a sustentabilidade. Esta fonte alternativa de energia é bastante vantajosa, já que a maior parte dos dispositivos IoT possui apenas baterias como fonte primária de energia que precisam ser trocadas regularmente, o que pode vir a acarretar não apenas elevados custos operacionais como também tornar-se impraticável em algumas aplicações.

Geralmente, os processos envolvendo a coleta de energia de campos magnéticos são complexos, envolvem circuitos integrados apropriados para estas aplicações como os de MPPT, de modo que, para se manterem operacionais, devem drenar constantemente correntes quiescentes (corrente de repouso), além de demandarem fontes primárias para iniciar seus processos de operações. Essa complexidade está simplificada por meio do uso de dobradores de tensão e limitadores, sem deixar de lado os quesitos de proteção do equipamento desenvolvido.

Através da utilização de circuitos CC-CC de alta eficiência energética e adição de super capacitores, foi possível substituir totalmente as baterias do dispositivo IoT, tornando-o mais sustentável. Além disso, a utilização de microcontroladores mais modernos que possuem modos de operação em *deep sleep* (ultrabaixo consumo) foi decisivo para alcançar a autonomia de até 24 dias ininterruptos de operação em casos extremos de interrupção total da fonte de campos magnéticos.

A tecnologia de comunicação sem fio LoRa também se mostrou uma opção interessante para a transmissão de dados a longa distância com baixo consumo de energia. Dessa forma, o dispositivo IoT desenvolvido apresenta uma solução aplicável e eficaz para o cenário em que se requer longa vida útil em operação e alcance de sinal estendido.

A partir deste trabalho, conclui-se que a pesquisa aqui desenvolvida alcançou o seu objetivo de apresentar um sistema de IoT autossuficiente, com redundância de energia,

circuitos de adequação dos níveis de tensão, proteção elétrica e totalmente alimentando por campos magnéticos, abrangendo toda a estrutura básica de um sistema IoT, ou seja, sensores, microcontroladores, rádio comunicação e até mesmo a construção do circuito da fonte que utilizou um campo magnético produzido em laboratório.

Futuras pesquisas nessa área podem contribuir para aprimorar ainda mais a eficiência energética e reduzir os custos de produção desses dispositivos.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Apesar da pesquisa ter alcançado seus principais objetivos existem várias possibilidades de avanços em relação ao protótipo desenvolvido, que podem ser elencados:

- **Antenas**

O presente trabalho avaliou o alcance de antenas comerciais para a tecnologia LoRa, porém, existem várias possibilidades de avanços neste meio a fim de avaliar quais teriam alcances ainda melhores.

- **Núcleos magnéticos**

Utilizaram-se como coletor de campos eletromagnéticos apenas TCs toroidais construídos em ferrosilício. Dessa forma, seria possível aprimorar a pesquisa utilizando variados formatos e materiais ferromagnéticos.

- **Adição de Banco de super capacitores**

A pesquisa aqui desenvolvida utilizou um super capacitor. Em aplicações onde a falta de energia fosse maior, seria possível considerar associações série ou paralela a fim de aumentar a autonomia.

- **Placa de circuito impresso**

Devido ao fato de ser um protótipo, todo o desenvolvimento do projeto eletrônico foi feito em placas perfuradas universais de fenolite. Assim poderia ser considerada na fabricação de placas de circuito impresso profissionais em FR4 (composto de fibra de vidro e resina de epóxi), o que aumentaria sua confiabilidade e estabilidade.

- **Tratamento dos dados**

Devido a integração com servidores de IoT e a acessibilidade dos bancos de dados, seria possível a aplicação de vários estudos estatísticos aplicados aos valores coletados e armazenados.

- **Teste de longa duração**

Os testes feitos com o protótipo alcançaram seus objetivos e se mostraram estáveis e confiáveis em períodos de teste de horas. Porém, teste em campo com maior duração poderiam contribuir para a validação real.

- **Melhorias de *firmware***

O dispositivo construído possui dois TCs. Dessa forma, seria possível utilizar a informação de corrente que passa pelo condutor carregado e analisar em tempo real pelo microcontrolador a fim de determinar qual seria a melhor situação para o modo de gestão de energia, e conseqüentemente, de aumentar ainda mais sua autonomia.

- **Sistemas de Alerta**

A implementação de alertas direcionados aos usuários quando limites específicos de valores dos sensores são atingidos torna-se viável devido à natureza dos dispositivos desenvolvidos, os quais consistem em um sistema de medição em tempo real. A incorporação de alertas personalizados em dispositivos de medição em tempo real representa um avanço significativo em relação às abordagens convencionais de monitoração e controle de sistemas.

REFERÊNCIAS

- AKAN, O. B. et al. Internet of Hybrid Energy Harvesting Things. *IEEE Internet of Things Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 5, n. 2, p. 736–746, apr 2018. ISSN 23274662. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 93.
- AKAN, O. B.; ISIK, M. T.; BAYKAL, B. Wireless passive sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 47, n. 8, p. 92–99, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- ALHEBSHI, F. et al. Monitoring the operation of transmission line in a smart grid system through IoT. *2018 15th Learning and Technology Conference, L and T 2018*, p. 139–146, 2018. Citado na página 25.
- ASHTON, K. et al. That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, v. 22, n. 7, p. 97–114, 2009. Citado na página 15.
- BHUIYAN, R. H.; DOUGAL, R. A.; ALI, M. A miniature energy harvesting device for wireless sensors in electric power system. *IEEE Sensors journal*, IEEE, v. 10, n. 7, p. 1249–1258, 2010. Citado na página 32.
- BRASIL, S. do; PÚBLICO, C. de S. Agência nacional de energia elétrica-aneel. *Editora Brasília*, 2008. Citado na página 33.
- CETINKAYA, O.; AKAN, O. B. Electric-field energy harvesting in wireless networks. *IEEE Wireless communications*, IEEE, v. 24, n. 2, p. 34–41, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 21 e 22.
- CHANG, K.-S. et al. Electric field energy harvesting powered wireless sensors for smart grid. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, The Korean Institute of Electrical Engineers, v. 7, n. 1, p. 75–80, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- CHOI, C. S. et al. LoRa based renewable energy monitoring system with open IoT platform. *International Conference on Electronics, Information and Communication, ICEIC 2018*, v. 2018-January, n. 20172410100040, p. 1–2, 2018. Citado na página 23.
- DIAS, J.; GRILO, A. Lorawan multi-hop uplink extension. *Procedia computer science*, Elsevier, v. 130, p. 424–431, 2018. Citado na página 45.
- DRAKE, R. P.; DRAKE, R. P. *Introduction to high-energy-density physics*. [S.l.]: Springer, 2006. Citado na página 18.
- ERTÜRK, M. A. et al. A survey on lorawan architecture, protocol and technologies. *Future Internet*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 10, p. 216, 2019. Citado na página 76.
- FILHO, J. M. Instalações elétricas industriais, 8^a edição. *LTC Editora*, 2013. Citado na página 33.

- GILBERT, J. M.; BALOUCHI, F. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks. *International Journal of automation and computing*, Springer, v. 5, n. 4, p. 334–347, 2008. Citado na página 18.
- GRUBER, H. The evolution of market structure in semiconductors: the role of product standards. *Research Policy*, Elsevier, v. 29, n. 6, p. 725–740, 2000. Citado na página 23.
- GUPTA, V.; KANDHALU, A.; RAJKUMAR, R. R. Proceedings of the 6th Workshop on Hot Topics in Embedded Networked Sensors, HotEmNets 2010. *Proceedings of the 6th Workshop on Hot Topics in Embedded Networked Sensors, HotEmNets 2010*, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 92.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. Vol. 3*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- HART, D. W. *Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016. Citado na página 43.
- HAXHIBEQIRI, J. et al. A survey of lorawan for iot: From technology to application. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 11, p. 3995, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- HAYES, T. C.; HOROWITZ, P. *The art of electronics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1999. v. 3. Citado na página 36.
- HONDA, M.; SAKURAI, T.; TAKAMIYA, M. Wireless temperature and illuminance sensor nodes with energy harvesting from insulating cover of power cords for building energy management system. In: IEEE. *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. [S.l.], 2015. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- HUA, X. *Power Management Techniques for Supercapacitor Based IoT Applications*. Tese (Doutorado) — University of Minnesota, 2018. Citado na página 18.
- INFINEON; RECTIFIER, I. *IRF1404PbF Datasheet*. 2023. <<https://www.infineon.com/dgdl/irf1404pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015355dae92618b0>>. Acesso em: 3 abril. 2023. Citado na página 59.
- JEONG, J. D.; SHIN, Y.; LEE, I. W. Long-Range Transmission of Photovoltaic Climate Information through the LoRa Radio. *9th International Conference on Information and Communication Technology Convergence: ICT Convergence Powered by Smart Intelligence, ICTC 2018*, IEEE, n. 20173010013610, p. 956–959, 2018. Citado na página 23.
- JI, B. et al. Energy harvest and information transmission design in internet-of-things wireless communication systems. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Elsevier GmbH, v. 87, p. 124–127, apr 2018. ISSN 16180399. Citado na página 26.
- KAWAR, S.; KRISHNAN, S.; ABUGHARBIEH, K. Power Management for Energy Harvesting in IoT - A Brief Review of Requirements and Innovations. In: *Midwest Symposium on Circuits and Systems*. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. v. 2021-Augus, p. 360–364. ISBN 9781665424615. ISSN 15483746. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 93.

- KEUTEL, T.; ZHAO, X.; KANOUN, O. C6. 2-energy scavenging for monitoring of overhead power line networks. *Proceedings SENSOR 2009, Volume II*, p. 207–212, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- KIM, H. et al. Stray electric field energy harvesting technology using mems switch from insulated ac power line. *Electronics letters*, IET, v. 50, n. 17, p. 1236–1238, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- La Rosa, R. et al. Strategies and techniques for powering wireless sensor nodes through energy harvesting and wireless power transfer. *Sensors (Switzerland)*, MDPI AG, v. 19, n. 12, jun 2019. ISSN 14248220. Citado na página 26.
- LAVRIC, A.; POPA, V. A lorawan: Long range wide area networks study. In: IEEE. *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*. [S.l.], 2017. p. 417–420. Citado na página 24.
- LITTELFUSE. *PolyFuse Datasheet*. 2023. <https://m.littelfuse.com/~media/electronics_technical/application_notes/resettable_ptcs/ec327-e_polyfuse_ptc.pdf>. Acesso em: 7 abril. 2023. Citado na página 74.
- MADDIKUNTA, P. K. R. et al. Predictive model for battery life in iot networks. *IET Intelligent Transport Systems*, IET, v. 14, n. 11, p. 1388–1395, 2020. Citado na página 19.
- MAIER, A.; SHARP, A.; VAGAPOV, Y. Comparative analysis and practical implementation of the esp32 microcontroller module for the internet of things. In: IEEE. *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*. [S.l.], 2017. p. 143–148. Citado na página 18.
- MAMEDE, D.; FILHO, P. d. S. E. J. de potência. *Ltc. Rio de Janeiro:[sn]*, p. 42, 2013. Citado na página 36.
- MANIKTALA, S. *Switching power supply design & optimization*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 69 e 70.
- MARDEGAN, C. Capítulo i transformadores de corrente, potencial e bobinas de rogowski para fins de proteção–parte. *Revista O Setor Elétrico, São Paulo*, p. 22–31, 2010. Citado na página 33.
- MASARAPU, C. et al. Effect of temperature on the capacitance of carbon nanotube supercapacitors. *ACS nano*, ACS Publications, v. 3, n. 8, p. 2199–2206, 2009. Citado na página 40.
- MICHALSKI, A.; WATRAL, Z. Problems of powering end devices in wireless networks of the internet of things. *Energies*, MDPI AG, v. 14, n. 9, may 2021. ISSN 19961073. Citado na página 19.
- MICRONE, N. M. O. E. I. *ME2188 Datasheet*. 2023. <<http://www.microne.com.cn/en/ProductDetail.aspx?id=54>>. Acesso em: 6 abril. 2023. Citado na página 73.
- MOGHE, R. et al. A low-cost electric field energy harvester for an mv/hv asset-monitoring smart sensor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 51, n. 2, p. 1828–1836, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

- MOGHE, R. et al. A scoping study of electric and magnetic field energy harvesting for wireless sensor networks in power system applications. In: IEEE. *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. [S.l.], 2009. p. 3550–3557. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- MOON, J. et al. Vampire: A magnetically self-powered sensor node capable of wireless transmission. In: IEEE. *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. [S.l.], 2013. p. 3151–3159. Citado na página 32.
- MOON, J.; LEEB, S. B. Analysis model for magnetic energy harvesters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 30, n. 8, p. 4302–4311, 2014. Citado na página 32.
- MOON, J.; LEEB, S. B. Power electronic circuits for magnetic energy harvesters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 31, n. 1, p. 270–279, 2015. Citado na página 32.
- MOUSSA, R. R.; ISMAEEL, W. S.; SOLBAN, M. M. Energy generation in public buildings using piezoelectric flooring tiles; a case study of a metro station. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, v. 77, p. 103555, 2022. Citado na página 19.
- MPS, M. P. S. I. *MP2307DN-LF Datasheet*. 2023. <<https://www.monolithicpower.com/en/mp2307.html>>. Acesso em: 5 abril. 2023. Citado na página 72.
- MURDYANTORO, E. et al. A review of LoRa technology and its potential use for rural development in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, v. 2094, n. April, 2019. ISSN 15517616. Citado na página 23.
- MURTI, K. Energy efficient embedded systems. In: *Design Principles for Embedded Systems*. [S.l.]: Springer, 2022. p. 317–339. Citado na página 19.
- NASCIMENTO, J. P. et al. Coordination of overcurrent relays in radial distribution systems: An analytical approach. In: IEEE. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- OLIVARES-GALVÁN, J. C.; GEORGILAKIS, P. S.; OCON-VALDEZ, R. A review of transformer losses. *Electric Power Components and Systems*, Taylor & Francis, v. 37, n. 9, p. 1046–1062, 2009. Citado na página 32.
- ORTIZ, F. M. Análise de desempenho de uma rede sem-fio de baixa potência e longo alcance para a internet das coisas. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 287, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 45, 46 e 48.
- OU, Q. et al. Application of internet of things in smart grid power transmission. *Proceedings - 2012 3rd FTRA International Conference on Mobile, Ubiquitous, and Intelligent Computing, MUSIC 2012*, p. 96–100, 2012. Citado na página 25.
- PAREDES-PARRA, J. M. et al. An alternative internet-of-things solution based on Lora for PV power plants: Data monitoring and management. *Energies*, MDPI AG, v. 12, n. 5, 2019. ISSN 19961073. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 26.
- PENG, H.-J. et al. Review on high-loading and high-energy lithium–sulfur batteries. *Advanced Energy Materials*, Wiley Online Library, v. 7, n. 24, p. 1700260, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 65.

- PHUNG, K.-H. et al. Analysis and assessment of lorawan. In: IEEE. *2018 2nd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)*. [S.l.], 2018. p. 241–246. Citado na página 47.
- POP-VADEAN, A. et al. Harvesting energy an sustainable power source, replace batteries for powering WSN and devices on the IoT. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.]: Institute of Physics Publishing, 2017. v. 200, n. 1. ISSN 1757899X. Citado na página 84.
- PRIYA, S.; INMAN, D. J. *Energy harvesting technologies*. [S.l.]: Springer, 2009. v. 21. Citado na página 18.
- RADOVICI, A.; CULIC, I. Embedded systems software development. In: *Getting Started with Secure Embedded Systems*. [S.l.]: Springer, 2022. p. 27–47. Citado na página 17.
- RAJ, A.; STEINGART, D. Review—Power Sources for the Internet of Things. *Journal of The Electrochemical Society*, The Electrochemical Society, v. 165, n. 8, p. B3130–B3136, 2018. ISSN 0013-4651. Citado na página 63.
- RASHID, M. H. *Power electronics handbook*. [S.l.]: Butterworth-heinemann, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 43.
- RIBA, J. R.; MORENO-EGUILAZ, M.; BOGARRA, S. *Energy Harvesting Methods for Transmission Lines: A Comprehensive Review*. [S.l.]: MDPI, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 22, 25 e 93.
- RODRIGUEZ, J. C. et al. Maximum energy harvesting from medium voltage electric-field energy using power line insulators. In: IEEE. *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. [S.l.], 2014. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- ROSCOE, N.; JUDD, M.; FITCH, J. Development of magnetic induction energy harvesting for condition monitoring. In: IEEE. *2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. [S.l.], 2009. p. 1–5. Citado na página 32.
- SANISLAV, T. et al. Wireless energy harvesting: Empirical results and practical considerations for Internet of Things. *Journal of Network and Computer Applications*, Academic Press, v. 121, p. 149–158, nov 2018. ISSN 10958592. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 85.
- SANTOS, M. P. dos et al. Energy harvesting using magnetic induction considering different core materials. In: IEEE. *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*. [S.l.], 2014. p. 942–944. Citado na página 32.
- SARAEREH, O. A. et al. A hybrid energy harvesting design for on-body internet-of-things (IoT) networks. *Sensors (Switzerland)*, MDPI AG, v. 20, n. 2, jan 2020. ISSN 14248220. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 93.
- SARDAR, M. S. et al. Experimental analysis of lora css wireless transmission characteristics for forestry monitoring and sensing. In: IEEE. *2018 International Symposium in Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*. [S.l.], 2018. p. 01249–01254. Citado na página 24.

- SHAULY, E. N. *Design Rules in a Semiconductor Foundry*. [S.l.]: CRC Press, 2022. Citado na página 42.
- SINHA, S. State of iot 2021: Number of connected iot devices growing 9% to 12.3 billion globally, cellular iot now surpassing 2 billion. *IoT Analytics: Market Insights for the Internet of Things*, 2021. Citado na página 15.
- SUDEVALAYAM, S.; KULKARNI, P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. *IEEE communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 13, n. 3, p. 443–461, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- SUNDMAEKER, H. et al. Vision and challenges for realising the internet of things. *Cluster of European research projects on the internet of things, European Commission, Citeseer*, v. 3, n. 3, p. 34–36, 2010. Citado na página 15.
- SYSTEMS, E. *ESP32*. 2023. <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>>. Acesso em: 5 abril. 2023. Citado na página 75.
- SZE, S. M. Semiconductor sensors. In: *Semiconductor sensors*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 550–550. Citado na página 44.
- TI, T. I. I. *ICL7660F Datasheet*. 2023. <<https://www.ti.com/lit/gpn/tl7660>>. Acesso em: 2 abril. 2023. Citado na página 58.
- TI, T. I. I. *TL082 Datasheet*. 2023. <<https://www.ti.com/lit/gpn/tl082>>. Acesso em: 1 abril. 2023. Citado na página 57.
- TI, T. I. I. *TL431 Datasheet*. 2023. <<https://www.ti.com/lit/gpn/tl431>>. Acesso em: 4 abril. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 69 e 70.
- TRASVIÑA-MORENO, C. A. et al. A network performance analysis of lora modulation for lpwan sensor devices. In: *Ubiquitous computing and ambient intelligence*. [S.l.]: Springer, 2016. p. 174–181. Citado na página 49.
- WALMSLEY, J. *Fair allocation for transmission parameters to achieve scalability in LoRaWAN*. Tese (Doutorado) — University of Otago, 2021. Citado na página 47.
- WAN, T.; SALMAN, E.; STANACEVIC, M. A new circuit design framework for IoT devices: Charge-recycling with wireless power harvesting. In: *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. v. 2016-July, p. 2046–2049. ISBN 9781479953400. ISSN 02714310. Citado na página 93.
- WEBER, R. H.; WEBER, R. *Internet of things*. [S.l.]: Springer, 2010. v. 12. Citado na página 15.
- YUAN, S. *Magnetic Field Energy Harvesting for Smart Grid Application*. [S.l.]: The University of Liverpool (United Kingdom), 2016. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 32.
- ZANGL, H.; BRETTERKLIEBER, T.; BRASSEUR, G. A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 58, n. 5, p. 1789–1796, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 32.

- ZHAI, S.-L. et al. Research of Communication Technology on IOT for High-Voltage Transmission Line. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, p. 85–90, 2012. ISSN 23154462. Citado na página 25.
- ZHAO, X. et al. Energy harvesting for a wireless-monitoring system of overhead high-voltage power lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 7, n. 2, p. 101–107, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- ZHU, M. et al. Alternative power sources for autonomous sensors in high voltage plant. In: IEEE. *2009 IEEE electrical insulation conference*. [S.l.], 2009. p. 36–40. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.