



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

HUGO SANTOS DA COSTA BESSA

**IMPLANTAÇÃO DE UMA INFRAESTRUTURA DE IOT BASEADA EM LORAWAN
PARA MONITORAMENTO ENERGÉTICO NA UFC - CAMPUS QUIXADÁ**

QUIXADÁ

2025

HUGO SANTOS DA COSTA BESSA

IMPLANTAÇÃO DE UMA INFRAESTRUTURA DE IOT BASEADA EM LORAWAN PARA
MONITORAMENTO ENERGÉTICO NA UFC - CAMPUS QUIXADÁ

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

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

Coorientador: Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas
Stancanelli.

QUIXADÁ

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B465i Bessa, Hugo Santos da Costa.
Implantação de uma infraestrutura de IoT baseada em LoRaWAN para monitoramento energético na UFC - campus Quixadá / Hugo Santos da Costa Bessa. – 2025.
69 f.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Engenharia de Computação, Quixadá, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Helder Candido dos Santos Filho.
Coorientação: Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas Stancanelli.
1. Internet das Coisas. 2. LoRaWAN. 3. monitoramento energético. 4. FIWARE. I. Título.
CDD 621.39
-

HUGO SANTOS DA COSTA BESSA

IMPLANTAÇÃO DE UMA INFRAESTRUTURA DE IOT BASEADA EM LORAWAN PARA
MONITORAMENTO ENERGÉTICO NA UFC - CAMPUS QUIXADÁ

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

Aprovada em: 31/07/2025

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Paulo Armando Cavalcante Aguiar
Telecom & Management SudParis

Dedico este trabalho à Deus, a minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado a força e a sabedoria para estar aqui.

À Universidade Federal do Ceará – Campus Quixadá, pelo suporte acadêmico e infraestrutura disponibilizados, essenciais para a realização deste trabalho. À instituição OSF Digital, pelo apoio fornecido durante a minha graduação.

À Escola Municipal José Francisco Dutra e ao Instituto Federal do Piauí – Campus Floriano, por terem contribuído para a base da minha formação educacional, possibilitando os passos que me trouxeram até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Helder Candido dos Santos, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas Stancanelli, pela orientação dedicada, conselhos valiosos e incentivo constante. Ao Prof. Dr. Paulo Armando Cavalcante Aguilar, pelas contribuições e disponibilidade para colaborar com esta pesquisa.

À minha família, em especial à minha mãe, Maria da Guia, ao meu pai, Álvaro José, aos meus irmãos, Helder e Henrique, e à minha cunhada, Julyana, pelo amor, apoio e compreensão durante toda a minha trajetória acadêmica.

À minha namorada Ana Beatriz, por todo o amor, apoio e carinho. Obrigado por todos os momentos que compartilhamos e obrigado por toda a compreensão e paciência nos momentos difíceis.

Aos amigos da graduação, Francisco Edinaldo, Francisco Ítalo, José Adrian, José Batista Jr., José Tiago, Larissa e Robert Vinícius, pela amizade, companheirismo e troca de conhecimentos. Aos amigos do ensino médio que ingressaram comigo na graduação, Isaac Vinícius, Kássia e Mellyssa, pela amizade de longa data e incentivo nesta jornada.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo o meu mais sincero agradecimento.

"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros
de gigantes." (Isaac Newton)

RESUMO

Este trabalho apresenta a implementação de uma infraestrutura de Internet das Coisas (IoT) baseada na tecnologia LoRaWAN para monitoramento energético na Universidade Federal do Ceará (UFC) no Campus Quixadá. O sistema proposto tem como objetivo realizar o monitoramento do consumo de energia, utilizando sensores, gateways LoRaWAN e a plataforma FIWARE para processar e analisar os dados coletados. A visualização em tempo real é realizada por meio da integração com o dashboard Grafana. A avaliação do sistema incluiu a análise de métricas de comunicação, como SNR, RSSI e taxas de sucesso de pacotes, confirmando a eficácia da solução, com comunicação estável e altas taxas de sucesso, mesmo em ambientes desafiadores. Os resultados demonstram que o sistema opera de maneira eficiente, fornecendo dados confiáveis para o monitoramento em tempo real. O estudo também destaca o potencial de expansão do sistema para outros campi universitários, oferecendo uma solução escalável e de baixo custo para a gestão energética. Como melhorias futuras, o trabalho propõe o monitoramento de dispositivos adicionais e a análise mais detalhada dos padrões de consumo, aprimorando ainda mais a capacidade do sistema em otimizar o uso de energia em ambientes acadêmicos.

Palavras-chave: Internet das Coisas; LoRaWAN; monitoramento energético; FIWARE.

ABSTRACT

This paper presents the implementation of an Internet of Things (IoT) infrastructure based on LoRaWAN technology for energy monitoring at the Federal University of Ceará (UFC) Quixadá Campus. The proposed system aims to monitor energy consumption using sensors, LoRaWAN gateways, and the FIWARE platform to process and analyze the collected data. Real-time visualization is achieved through integration with the Grafana dashboard. The system evaluation included the analysis of communication metrics such as SNR, RSSI, and packet success rates, confirming the effectiveness of the solution, with stable communication and high success rates, even in challenging environments. The results demonstrate that the system operates efficiently, providing reliable data for real-time monitoring. The study also highlights the potential for expanding the system to other university campuses, offering a scalable and low-cost solution for energy management. As future improvements, the paper proposes monitoring additional devices and more detailed analysis of consumption patterns, further enhancing the system's ability to optimize energy use in academic environments.

Keywords: Internet of Things; LoRaWAN; energy monitoring; FIWARE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O ecossistema da Internet das Coisas mostrando os usuários finais e as áreas de aplicação com base em dados.	20
Figura 2 – Comparação entre tecnologia de rádio LWPAN.	21
Figura 3 – Arquitetura do sistema LoRaWAN.	22
Figura 4 – Arquitetura da plataforma FIWARE.	26
Figura 5 – Arquitetura do sistema de monitoramento.	30
Figura 6 – Visão geral da arquitetura da solução.	31
Figura 7 – Exemplo de tela personalizada possível no EmonCMS.	32
Figura 8 – Vida útil média da bateria do dispositivo de monitoramento considerando diferentes potências de transmissão em LoRaWAN.	34
Figura 9 – Gráfico de consumo LoRa.	36
Figura 10 – Ilustração do fluxo do processo metodológico	38
Figura 11 – Ilustração dos principais componentes da arquitetura	40
Figura 12 – TTGO LoRa32 SX1276 OLED	41
Figura 13 – Sensor de Corrente Não Invasivo 100A:50mA SCT-013	41
Figura 14 – Módulo ADS1115 Conversor Analógico Digital	42
Figura 15 – Gateway LoRaWAN Radioenge	43
Figura 16 – Arquitetura do Servidor LoRaWAN	44
Figura 17 – Ilustração da Planta do Campus da UFC em Quixadá	44
Figura 18 – Painel de Distribuição de Energia	45
Figura 19 – Gateway instalado Campus da UFC em Quixadá	46
Figura 20 – Vista 3D da PCB	47
Figura 21 – Configuração do gateway no arquivo global_conf.json na Raspberry Pi 3. . .	49
Figura 22 – Print do comando docker ps no servidor LoRaWAN, exibindo o container em execução.	49
Figura 23 – Exibição dos containers Docker no servidor de aplicação.	50
Figura 24 – Terminal exibindo a comunicação serial com a placa TTGO	53
Figura 25 – Dashboard exibindo as notificações dos pacotes recebidos pelo servidor LoRaWAN.	54
Figura 26 – Frames do servidor LoRaWAN exibindo os pacotes recebidos corretamente. .	54

Figura 27 – Dashboard no Grafana exibindo visualmente os pacotes enviados e o consumo registrado.	55
Figura 28 – Gráfico SNR por SF	56
Figura 29 – Gráfico RSSI por SF	57
Figura 30 – Time On Air - SF7, SF8, SF9	58
Figura 31 – Time On Air - SF10, SF11, SF12	58
Figura 32 – Calculadora Time On Air para LoRaWAN	58
Figura 33 – Consumo do dia 17/07/2025	59
Figura 34 – Consumo do dia 24/07/2025	60
Figura 35 – Consumo entre os dias 04/07/2025 a 10/07/2025	60
Figura 36 – Consumo entre os dias 02/07/2025 a 11/07/2025	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pinout entre o Header da PCB e os pinos GPIO da placa TTGO LoRa32 SX1276 OLED	48
Tabela 2 – Horários de Realização dos Testes para Cada SF	56
Tabela 3 – Métricas de Envio de Pacote por SF	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre Trabalhos Relacionados e o Trabalho Proposto	37
Quadro 2 – Levantamento de Requisitos	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
IoT	<i>Internet of Things</i> ou <i>Internet das Coisas</i>
LoRA	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
SF	<i>Spread Factor</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>17</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>17</i>
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Internet das Coisas	19
<i>2.1.1</i>	<i>Aplicações na Eficiência Energética</i>	<i>19</i>
2.2	Redes LPWAN	20
2.3	Protocolo LoRaWAN	22
<i>2.3.1</i>	<i>LoRa</i>	<i>22</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Frequência e Banda Larga</i>	<i>23</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Spreading Factor (SF)</i>	<i>23</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Parâmetros Regionais</i>	<i>24</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Classes LoRaWAN</i>	<i>24</i>
2.4	FIWARE e sua Aplicação em IoT	24
<i>2.4.1</i>	<i>Arquitetura do FIWARE</i>	<i>25</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Aplicações do FIWARE na Gestão Energética</i>	<i>26</i>
2.5	Dashboard Grafana	27
2.6	Monitoramento Energético em Campi Universitários	27
<i>2.6.1</i>	<i>Desafios do Consumo Energético em Instituições Acadêmicas</i>	<i>28</i>
3	TRABALHOS RELACIONADOS	29
3.1	Sistema de Monitoramento de Uso de Energia para o Campus Universitário UFAM-ICET Utilizando Internet das Coisas	29
3.2	Uma solução de IoT baseada no FIWARE para gerenciamento de recursos energéticos e serviços acadêmicos em um campus universitário	30
3.3	Sistema de Monitoramento em Tempo Real do Consumo de Energia Elétrica no Centro Universitário UNIFAGOC	32
3.4	Energy-Efficient LoRaWAN for Industry 4.0 Applications	33
3.5	Um Estudo sobre a Eficiência Energética em Sistemas IoT com Diferentes Tipos de Comunicação	35

3.6	Comparativo entre os Trabalhos Relacionados	36
4	METODOLOGIA	38
4.1	Levantamento dos Requisitos	38
4.2	Definição da Arquitetura	39
4.3	Escolha de Sensores e Dispositivos	39
4.3.1	<i>Dispositivo Final</i>	40
4.3.2	<i>Sensores e Componentes</i>	40
4.3.3	<i>Gateway</i>	42
4.3.4	<i>Servidor LoRaWAN</i>	43
4.4	Planejamento do Sistema	44
4.4.1	<i>Localização Dispositivo Final</i>	45
4.4.2	<i>Localização Gateway</i>	45
4.4.3	<i>Hospedagem dos Servidores</i>	46
4.5	Implementação e Integração dos Componentes	46
4.5.1	<i>Montagem do Dispositivo Final</i>	47
4.5.2	<i>Instalação do Sensor</i>	47
4.5.3	<i>Configuração do Gateway</i>	48
4.5.4	<i>Instalação do Servidor LoRaWAN</i>	48
4.5.5	<i>Integração com a Plataforma FIWARE</i>	49
4.6	Testes de Campo	50
4.7	Avaliação do Sistema	50
4.7.1	<i>Análise das Métricas de Comunicação</i>	50
4.7.2	<i>Análise do Delay de Envio de Pacote</i>	51
5	RESULTADOS	52
5.1	Implementação	52
5.2	Testes da Infraestrutura	52
5.2.1	<i>Comunicação com a Placa TTGO</i>	53
5.2.2	<i>Dashboard com Notificações de Pacotes</i>	53
5.2.3	<i>Frames no Servidor LoRaWAN</i>	53
5.2.4	<i>Visualização no Grafana</i>	54
5.3	Avaliação de Desempenho	54
5.3.1	<i>Análise das Métricas de Comunicação</i>	55

5.3.2	<i>Análise do Time On Air</i>	57
5.4	Coleta de Dados	59
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	62
6.1	Trabalhos Futuros	62
6.1.1	<i>Análise de Dados sobre o Padrão de Consumo</i>	62
6.1.2	<i>Monitoramento de Diferentes Aparelhos</i>	63
6.1.3	<i>Monitoramento de Múltiplos Aparelhos Simultaneamente</i>	63
6.2	Limitações	63
6.2.1	<i>Falta de Acesso a Outros Tipos de Medição</i>	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a conectividade em redes tem desempenhado um papel transformador na sociedade, revolucionando a forma como as pessoas interagem, trabalham e acessam informações (Castells, 2010). Desde a popularização da internet até o advento das redes móveis de alta velocidade, a capacidade de conectar dispositivos tem evoluído de maneira exponencial, possibilitando novas oportunidades tecnológicas. Nesse contexto, a *Internet of Things* ou Internet das Coisas (IoT) surge como um conceito inovador que expande a conectividade para objetos do cotidiano, permitindo que equipamentos como sensores, aparelhos domésticos e sistemas industriais se comuniquem entre si e com a internet (Gubbi *et al.*, 2013). Essa integração tecnológica não apenas automatiza processos, mas também viabiliza novas possibilidades de monitoramento e controle em tempo real, contribuindo para maior eficiência em diversas aplicações (Atzori *et al.*, 2010).

Este trabalho está inserido na área de tecnologias emergentes, que envolve inovações tecnológicas com grande impacto social e econômico, com foco no uso da IoT para promover o monitoramento energético e a sustentabilidade. Dentro desse campo, destacam-se os esforços para o desenvolvimento de sistemas IoT voltados ao monitoramento do consumo energético, utilizando tecnologias de comunicação de longa distância e baixa potência, como o *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN), e ferramentas de análise de dados, como a FIWARE. Estudos na área demonstram que redes *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) e LoRaWAN oferecem grande potencial para aplicações em monitoramento de energia, especialmente em contextos onde a eficiência e o baixo consumo são críticos (Centenaro *et al.*, 2016; Mekki *et al.*, 2019). Contudo, esses estudos frequentemente carecem de adaptação para os desafios específicos de um campus universitário.

Soluções comerciais e acadêmicas para monitoramento energético frequentemente apresentam limitações quando aplicadas a campi universitários, pois não atendem a requisitos fundamentais como escalabilidade, baixo custo e integração com a infraestrutura já existente. Além disso, desafios relacionados à interoperabilidade e à integração de dispositivos de diferentes fornecedores tornam-se barreiras significativas nesse contexto, evidenciando a necessidade de soluções personalizadas e adaptadas às especificidades desses ambientes (Domínguez-Bolaño *et al.*, 2024). Estudos também apontam que o diagnóstico energético desempenha um papel essencial na otimização do consumo e na formulação de políticas eficazes para campi universitários, reforçando a importância de abordagens que considerem as características únicas dessas

instituições (Garcia *et al.*, 2020). Diante dessa lacuna, este trabalho propõe a implantação de uma infraestrutura IoT no Campus da UFC em Quixadá, utilizando LoRaWAN e a plataforma FIWARE, com o objetivo de monitorar o consumo energético, identificar desperdícios e promover práticas sustentáveis.

O projeto proposto, que visa à implantação de uma infraestrutura IoT no Campus da UFC em Quixadá para monitorar o consumo energético, atende a diferentes públicos-alvo: gestores acadêmicos, que terão acesso a ferramentas práticas para otimizar a gestão energética e reduzir custos operacionais; desenvolvedores de soluções IoT, que encontrarão um modelo adaptável e replicável; e a comunidade acadêmica, beneficiada pela promoção de práticas sustentáveis e pela conscientização sobre o uso responsável de energia. Dessa forma, a proposta não só soluciona desafios técnicos, como também promove impacto social e econômico.

No médio prazo, espera-se que o sistema se consolide como uma ferramenta estratégica para decisões sobre consumo de energia, reduzindo custos e fortalecendo a sustentabilidade institucional. No longo prazo, o modelo desenvolvido poderá ser replicado em outros campi e ambientes educacionais, promovendo uma cultura de responsabilidade energética e ambiental.

A implantação será realizada em etapas bem definidas, começando pelo mapeamento do consumo energético, seguido pela instalação de sensores e *gateways* LoRaWAN, e integração com a plataforma FIWARE. Essas etapas garantirão a coleta e análise de dados confiáveis para suporte à tomada de decisões estratégicas. A avaliação do sistema será baseada em sua eficiência técnica, considerando a precisão e a confiabilidade dos dados coletados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e implantar uma infraestrutura IoT no Campus Quixadá da UFC, com foco no monitoramento do consumo energético.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Escolher e instalar sensores para monitoramento de consumo de energia, além de configurar *gateways* para transmissão dos dados via LoRaWAN.
- Utilizar a plataforma FIWARE para armazenar, processar e analisar os dados coletados em tempo real.

- Integrar a plataforma FIWARE com o Grafana, garantindo a visualização em tempo real do consumo energético.

A estrutura deste trabalho foi organizada para facilitar a compreensão do estudo. No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos, com ênfase na IoT, nas redes LPWAN, no protocolo LoRaWAN e na aplicação do middleware FIWARE para a gestão energética. O Capítulo 3 descreve os trabalhos relacionados, destacando os estudos anteriores e as contribuições que motivaram o desenvolvimento da solução proposta. O Capítulo 4 detalha a metodologia adotada e a integração dos dispositivos. O Capítulo 5 analisa os resultados, avaliando o desempenho da solução em termos de eficiência e visualização dos dados. Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho, destacando a eficácia e robustez do protocolo LoRaWAN para o envio de pacotes de dados e a facilidade de visualização dos dados no dashboard Grafana, além de discutir as implicações e contribuições do sistema proposto para a gestão energética no campus da UFC em Quixadá.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo, são apresentados os conceitos essenciais que fundamentam o projeto, abordando a IoT e sua aplicação no monitoramento energético. São discutidas as redes LPWAN e LoRaWAN, destacando sua relevância para o monitoramento de energia, e a plataforma FIWARE, com foco em sua arquitetura e uso na gestão energética. Além disso, este capítulo examina desafios e soluções para o monitoramento energético em campi universitários, evidenciando a importância da IoT nesse contexto.

2.1 Internet das Coisas

O termo Internet das Coisas foi introduzido no final da década de 1990 para descrever um ecossistema no qual dispositivos físicos poderiam se conectar à internet e trocar informações sem a necessidade de intervenção humana (Ashton, 2009). Essa definição evoluiu para abranger uma rede global de objetos equipados com sensores, softwares e outras tecnologias que permitem a coleta e o compartilhamento de dados em tempo real. A Figura 1 ilustra o ecossistema da IoT e suas diversas aplicações em diferentes setores, destacando a conectividade, a análise de dados e as ferramentas de visualização utilizadas para otimizar processos.

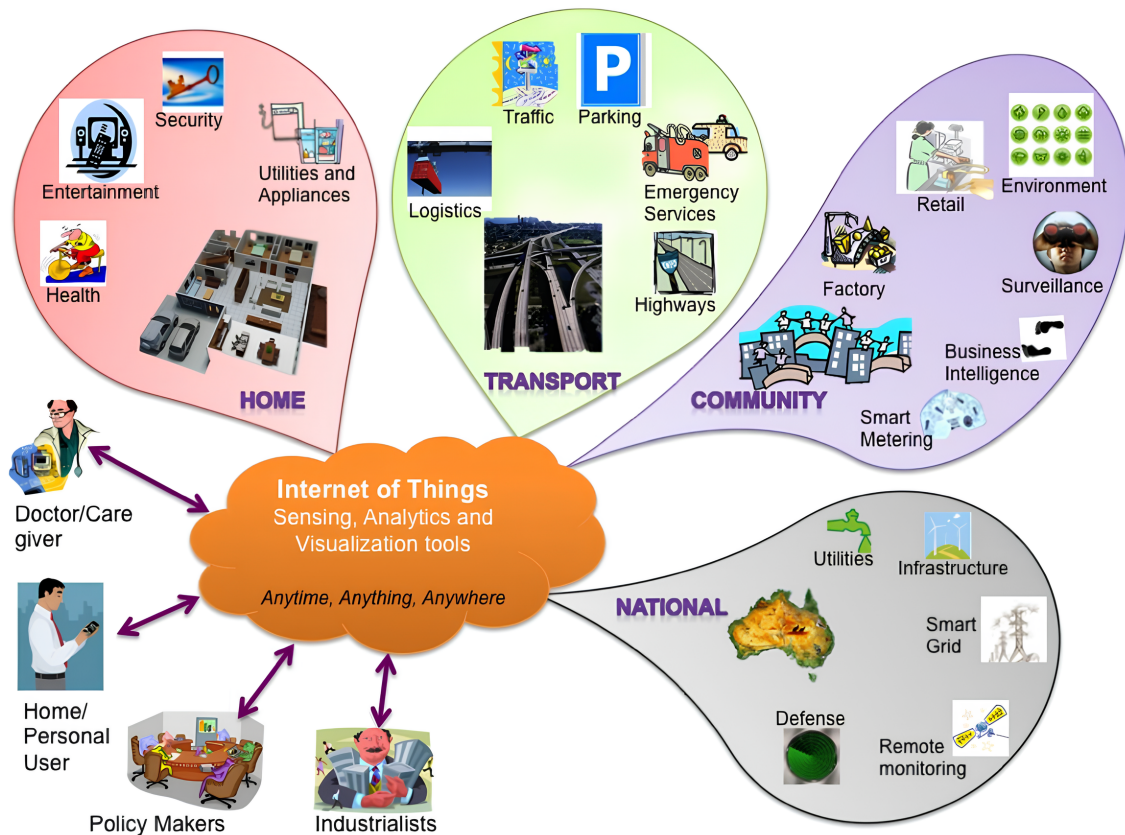
A IoT pode ser dividida em três camadas principais: percepção, rede e aplicação (Gubbi *et al.*, 2013). A camada de percepção inclui os sensores e dispositivos que coletam dados do ambiente, como temperatura, umidade e consumo energético. A camada de rede é responsável pela transmissão dos dados por meio de tecnologias como Wi-Fi, LoRaWAN e 5G. Já a camada de aplicação compreende as plataformas que processam e analisam os dados coletados, fornecendo informações relevantes para os usuários finais.

2.1.1 Aplicações na Eficiência Energética

A IoT tem sido amplamente utilizada para melhorar a eficiência energética em diversos setores, incluindo residências, indústrias e instituições acadêmicas (Mekki *et al.*, 2019). O uso de sensores conectados permite o monitoramento detalhado do consumo elétrico, possibilitando a identificação de padrões de uso e a implementação de estratégias para otimização dos recursos.

No contexto de campi universitários, a IoT viabiliza o controle inteligente de iluminação, climatização e outros equipamentos, reduzindo o desperdício de energia e tornando a

Figura 1 – O ecossistema da Internet das Coisas mostrando os usuários finais e as áreas de aplicação com base em dados.



Fonte: Adaptado de Gubbi *et al.* (2013)

gestão mais eficiente (Garcia *et al.*, 2020). A integração de dispositivos IoT com plataformas de análise de dados, como o FIWARE, possibilita a automação de processos e a geração de relatórios detalhados, permitindo a tomada de decisões baseadas em dados reais.

Além disso, tecnologias de comunicação como LoRaWAN têm sido aplicadas para conectar sensores distribuídos em grandes áreas, garantindo a coleta de informações em tempo real com baixo consumo energético (Sherazi *et al.*, 2021).

2.2 Redes LPWAN

As redes de comunicação são um elemento essencial para a IoT, permitindo a transmissão de dados entre sensores, dispositivos e plataformas de processamento. No contexto da IoT, diferentes tecnologias sem fio podem ser utilizadas, variando em alcance, consumo energético e capacidade de transmissão. Entre essas tecnologias, as Redes de Área Ampla de Baixa Potência (LPWAN – Low Power Wide Area Networks) surgem como uma solução eficiente para conectar dispositivos distribuídos em grandes áreas, consumindo pouca energia e

utilizando frequências não licenciadas (Centenaro *et al.*, 2016).

O termo LPWAN refere-se a um conjunto de tecnologias sem fio desenvolvidas para comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia (Mekki *et al.*, 2019). Essas redes foram projetadas para atender às necessidades de aplicações IoT, que frequentemente operam com dispositivos movidos a bateria e exigem conectividade estável por longos períodos.

As redes LPWAN se destacam por sua baixa taxa de transmissão, geralmente inferior a 1 Mbps, sendo adequadas para aplicações que enviam pequenas quantidades de dados. Além disso, possuem amplo alcance de comunicação, cobrindo dezenas de quilômetros em áreas rurais e alguns quilômetros em ambientes urbanos. Seu baixo consumo de energia permite que dispositivos operem por anos sem necessidade de substituição da bateria. Outro fator relevante é o uso de espectro não licenciado, reduzindo custos operacionais e facilitando a adoção global (Centenaro *et al.*, 2016).

Entre as tecnologias LPWAN disponíveis, destacam-se:

- Sigfox: Tecnologia proprietária que opera em frequências não licenciadas e se destaca pelo baixo consumo energético, mas com baixa taxa de transmissão (Sigfox, 2025).
- Ingenu: Tecnologia LPWAN proprietária baseada no protocolo RPMA, oferecendo alta cobertura, segurança e baixo consumo de energia, sendo aplicada em infraestrutura crítica, agricultura e cidades inteligentes (INGENU, 2025).
- LoRaWAN: Uma das tecnologias LPWAN mais populares, oferecendo alta escalabilidade, longo alcance e eficiência energética, sendo amplamente utilizada em aplicações de monitoramento ambiental e infraestrutura urbana (Centenaro *et al.*, 2016).

A Figura 2 compara as tecnologias LPWAN com base na área de cobertura, largura de banda e outros parâmetros.

Figura 2 – Comparação entre tecnologia de rádio LWPAN.

	SIGFOX	Ingenu	LoRa
Coverage range (km)	Rural: 30–50 Urban: 3–10	≈ 15	Rural: 10–15 Urban: 3–5
Frequency bands (MHz)	868 or 902	2400	Various, sub-gigahertz
ISM band	✓	✓	✓
Bidirectional link	✓	×	✓
Data rate (kb/s)	0.1	0.01–8	0.3–37.5
Nodes per gateway	≈ 10 ⁶	≈ 10 ⁴	≈ 10 ⁴

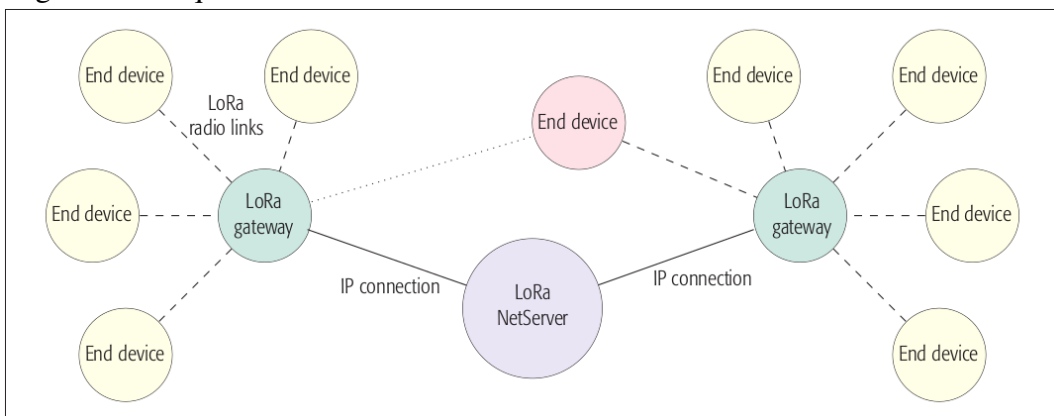
Fonte: Centenaro *et al.* (2016)

2.3 Protocolo LoRaWAN

O LoRaWAN é um protocolo de comunicação sem fio baseado na tecnologia *Long Range* (LoRA), que utiliza modulação de espectro expandido para garantir maior alcance e resistência a interferências (LoRa Alliance, 2020). Ele opera em faixas de frequência não licenciadas, permitindo a implementação de redes privadas sem necessidade de concessão regulatória. Como podemos ver na Figura 3 a arquitetura LoRaWAN é composta por três elementos principais:

- *End device*: Dispositivos finais que coletam dados e enviam para *gateways* através de um módulo LoRa.
- *Gateways LoRa*: Responsáveis por retransmitir os pacotes recebidos dos sensores para um servidor de rede através de uma conexão IP.
- *LoRa NetServer*: Também conhecido como Servidor LoRaWAN, processa os dados recebidos e os disponibiliza para análise.

Figura 3 – Arquitetura do sistema LoRaWAN.



Fonte: Centenaro *et al.* (2016)

2.3.1 LoRa

O LoRa é a base do protocolo LoRaWAN, caracterizado por sua capacidade de comunicação de longo alcance com baixo consumo energético. Ele utiliza a técnica de modulação por espalhamento espectral (*Chirp Spread Spectrum* (CSS)), que permite transmissões mesmo em ambientes ruidosos (Centenaro *et al.*, 2016). Principais vantagens do LoRa:

- Baixo consumo energético: Permite que dispositivos operem por anos com baterias comuns (Sherazi *et al.*, 2021).

- Alcance estendido: Transmissão de dados em distâncias superiores a 10 km em áreas abertas e até 2 km em áreas urbanas (Centenaro *et al.*, 2016).
- Escalabilidade: Suporta milhares de dispositivos conectados a um único gateway (LoRa Alliance, 2020).

A eficiência do LoRa o torna ideal para monitoramento energético em campi universitários, como neste projeto, onde há necessidade de abrangência ampla e baixo custo operacional.

2.3.2 *Frequência e Banda Larga*

O LoRaWAN opera em bandas não licenciadas, como:

- 868 MHz (Europa)
- 915 MHz (América do Norte)
- 433 MHz (Ásia e América Latina) (LoRa Alliance, 2018).

O uso de diferentes frequências permite a adaptação do protocolo às regulamentações regionais, garantindo sua aplicação global. Além disso, o LoRaWAN emprega largura de banda variável (de 125 kHz a 500 kHz), permitindo o ajuste da taxa de transmissão conforme necessário (LoRa Alliance, 2018).

2.3.3 *Spreading Factor (SF)*

O *Spread Factor* (SF) é um dos parâmetros fundamentais do protocolo LoRaWAN, que influencia diretamente a taxa de transmissão, o alcance e o consumo energético da comunicação. O SF determina a relação entre o número de chips utilizados para representar cada bit de dados, o que implica em uma troca entre a taxa de dados e o alcance da comunicação.

Com o aumento do SF, a largura de banda efetiva do sinal é reduzida, o que resulta em um maior alcance, mas com uma diminuição da taxa de dados. Por outro lado, para aplicações que requerem maior taxa de dados, utiliza-se um SF menor, o que reduz o alcance, mas aumenta a taxa de transmissão.

A relação entre a taxa de dados (R_b), o SF e a largura de banda (BW) pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$R_b = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2.1)$$

Além disso, a taxa de dados nominal, considerando a Taxa de Código (CR) e o SF, é dada por:

$$R_b = \frac{SF \times CR \times BW}{2^{SF}} \quad (2.2)$$

, em que:

- SF pode variar de 7 a 12;
- BW é a largura de banda da modulação (em Hz);
- CR é a taxa de correção de erros.

Este modelo permite ao projetista ajustar o SF para obter o equilíbrio desejado entre alcance, eficiência energética e taxa de dados, dependendo das necessidades específicas da aplicação (Semtech Corporation, 2015).

2.3.4 Parâmetros Regionais

Cada região tem seus próprios regulamentos para o uso do LoRaWAN, incluindo restrições de potência, *duty cycle* e frequência. Isso impacta o desempenho da rede e deve ser considerado no projeto da infraestrutura (LoRa Alliance, 2018).

No Brasil, o LoRaWAN opera na faixa de 915 MHz, com restrições de potência para evitar interferências em outros serviços de comunicação (Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, 2020).

2.3.5 Classes LoRaWAN

O protocolo LoRaWAN é estruturado em diferentes classes de dispositivos para otimizar o consumo de energia e a eficiência da comunicação:

- Classe A: Mais eficiente em termos de consumo energético, indicado para sensores com baixo volume de dados;
- Classe B: Utiliza beacons para sincronizar a comunicação, adequado para dispositivos que precisam de resposta mais rápida;
- Classe C: Mantém um canal de recepção aberto continuamente, sendo ideal para aplicações que requerem baixa latência (LoRa Alliance, 2020).

A escolha da classe impacta diretamente o tempo de vida da bateria dos dispositivos, tornando essencial a seleção apropriada para cada aplicação (Sherazi *et al.*, 2021).

2.4 FIWARE e sua Aplicação em IoT

A crescente adoção da IoT demanda plataformas que permitam a coleta, processamento e gerenciamento de grandes volumes de dados de sensores e dispositivos distribuídos.

Nesse contexto, o FIWARE se destaca como uma solução eficiente, proporcionando um ecossistema aberto e modular para o desenvolvimento de aplicações inteligentes em diversas áreas, como monitoramento energético, cidades inteligentes e automação industrial (Araujo *et al.*, 2019).

Seu diferencial está na utilização de componentes modulares, chamados Generic Enablers (GEs), que facilitam a interoperabilidade entre sensores, sistemas de comunicação e plataformas de análise de dados (Amurim *et al.*, 2021).

A modularidade e a arquitetura escalável do FIWARE tornam-no uma opção viável para soluções de monitoramento energético, garantindo maior eficiência na coleta e processamento de dados, além de permitir a implementação de estratégias preditivas para otimização do consumo de energia (Cirillo *et al.*, 2019).

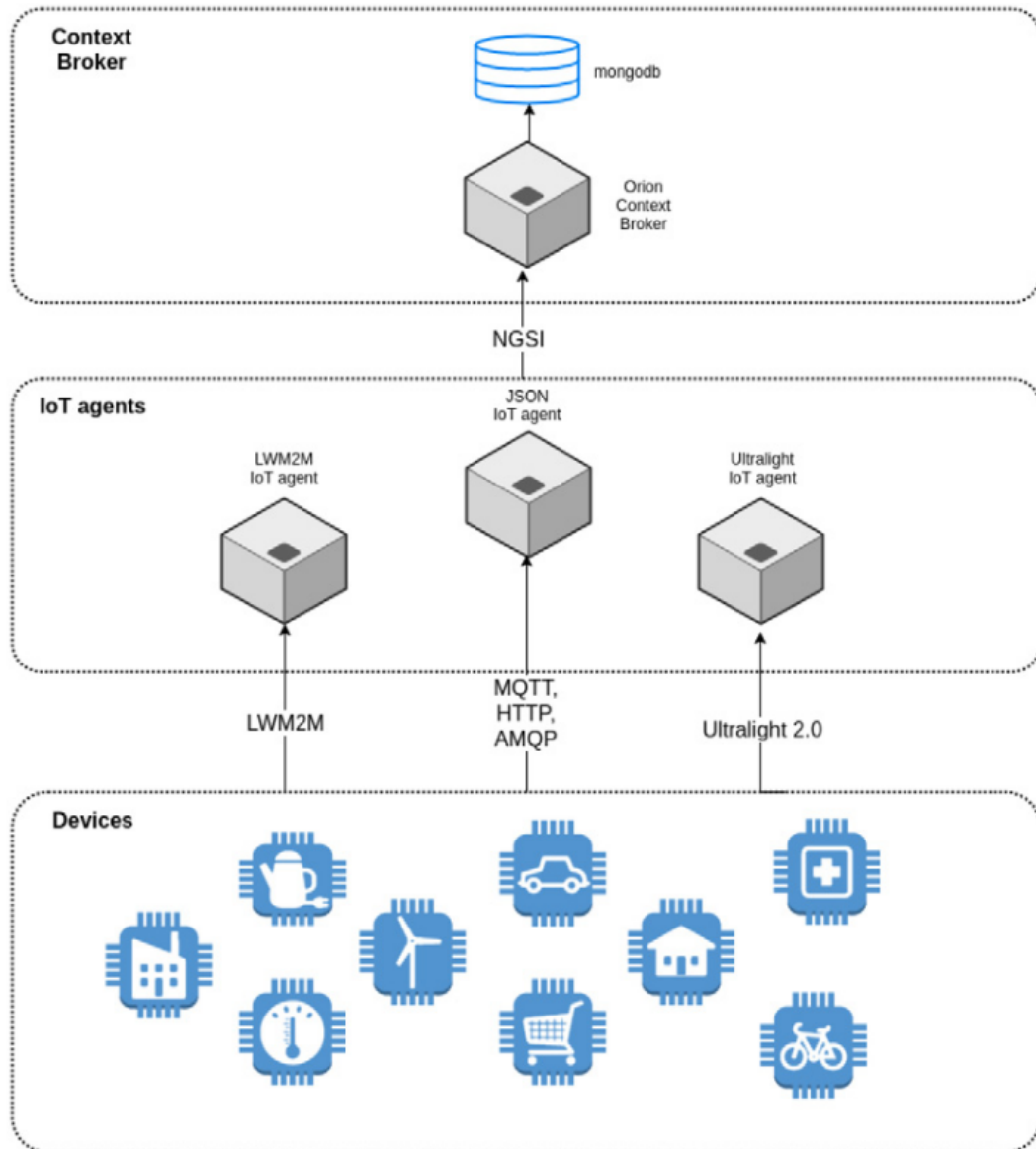
2.4.1 Arquitetura do FIWARE

A arquitetura do FIWARE é composta por diferentes camadas que garantem interoperabilidade, escalabilidade e segurança no gerenciamento de dados IoT (FIWARE Foundation, 2022; Araujo *et al.*, 2019). Como mostra a Figura 4 essas camadas incluem:

- Camada de Dispositivos: Representa os sensores e atuadores distribuídos que coletam informações do ambiente, como temperatura, energia, transporte, infraestrutura urbana e saúde.
- Camada de Agentes IoT: Responsável por conectar os dispositivos IoT à infraestrutura FIWARE, convertendo diferentes protocolos de comunicação, como LWM2M, MQTT, HTTP e AMQP, para um formato compreendido pelo Orion Context Broker.
- Camada de Gerenciamento de Contexto: Centralizada no Orion Context Broker, essa camada gerencia e armazena os dados contextuais recebidos dos dispositivos IoT, permitindo a interoperabilidade e processamento eficiente.
- Camada de Armazenamento: Utiliza bancos de dados como MongoDB para armazenar e organizar os dados coletados, garantindo persistência e acessibilidade para análises posteriores.

A combinação dessas camadas possibilita o desenvolvimento de soluções escaláveis para o gerenciamento de energia em tempo real, como proposto neste trabalho.

Figura 4 – Arquitetura da plataforma FIWARE.



Fonte: Araujo *et al.* (2019)

2.4.2 Aplicações do FIWARE na Gestão Energética

O FIWARE tem sido amplamente utilizado em projetos de monitoramento energético, permitindo a análise detalhada do consumo de energia em cidades, indústrias e instituições acadêmicas (Amurim *et al.*, 2021). Seu uso em campi universitários tem-se mostrado vantajoso, pois permite integrar sensores e dispositivos de diferentes fabricantes, garantindo maior flexibilidade e personalização.

Entre as principais aplicações do FIWARE na gestão energética, destacam-se:

- **Monitoramento de Consumo em Tempo Real:** Sensores conectados ao FIWARE permitem a análise detalhada do consumo energético de salas, laboratórios e equipamentos.

- Automação e Controle Inteligente: Sistemas baseados no FIWARE podem ativar ou desativar dispositivos automaticamente para reduzir o consumo desnecessário.
- Geração de Relatórios e Análises Preditivas: Através da integração com bancos de dados, o FIWARE possibilita a detecção de padrões de consumo e previsão de desperdícios.

Estudos como os de Amurim *et al.* (2021) demonstram que a implementação do FIWARE em projetos de eficiência energética em universidades pode reduzir significativamente o desperdício de energia elétrica.

2.5 Dashboard Grafana

O Grafana é uma plataforma poderosa de visualização de dados em tempo real, essencial para sistemas de monitoramento IoT, como os de consumo energético. Sua capacidade de integrar diversas fontes de dados, incluindo LoRaWAN, permite a criação de dashboards interativos e dinâmicos, facilitando a análise e interpretação dos dados.

Em estudos recentes, Grafana tem sido utilizado com sucesso em diferentes aplicações IoT. Al Fajar e Samijayani (2021) utilizaram Grafana para monitorar em tempo real o ambiente de uma estufa, visualizando variáveis como temperatura e umidade através de gráficos interativos, demonstrando a eficácia da plataforma em sistemas baseados em LoRaWAN para monitoramento ambiental. Da mesma forma, Nor *et al.* (2017) empregaram o Grafana no monitoramento do tráfego de um sistema de semáforos inteligentes, utilizando LoRaWAN para transmitir dados sobre congestionamento, destacando a utilidade do Grafana na visualização de dados críticos em tempo real.

No contexto do monitoramento energético, o Grafana oferece uma interface clara e acessível para a visualização de consumo de energia, permitindo que gestores identifiquem padrões de uso e tomem decisões informadas. Sua integração com plataformas como FIWARE e LoRaWAN torna-o uma solução eficaz para ambientes acadêmicos, como o campus da UFC em Quixadá, promovendo a gestão eficiente e sustentável de energia.

2.6 Monitoramento Energético em Campi Universitários

A crescente preocupação com o consumo de energia em instituições acadêmicas tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias de monitoramento energético para reduzir desperdícios e otimizar a gestão dos recursos disponíveis (Garcia *et al.*, 2020). Campi universi-

tários possuem infraestruturas amplas e diversificadas, que incluem salas de aula, laboratórios, bibliotecas e áreas administrativas, tornando o controle energético um desafio complexo. A implementação de soluções baseadas na IoT tem-se mostrado uma alternativa viável para coletar, processar e analisar dados de consumo energético, permitindo a adoção de medidas de eficiência energética (Anjos *et al.*, 2023).

Além da redução de custos operacionais, o monitoramento energético em campi universitários contribui para a sustentabilidade ao mitigar impactos ambientais causados pelo consumo excessivo de eletricidade. O uso de sensores conectados a sistemas inteligentes possibilita a identificação de padrões de consumo, facilitando a adoção de estratégias como o desligamento automatizado de equipamentos e a redistribuição do uso energético em horários de pico (Amurim *et al.*, 2021).

2.6.1 Desafios do Consumo Energético em Instituições Acadêmicas

Os campi universitários apresentam particularidades que tornam o monitoramento do consumo energético um desafio significativo. Entre os principais fatores que dificultam a gestão eficiente da energia, destacam-se:

- Grande variação no consumo energético: Diferentes setores do campus apresentam demandas energéticas variáveis ao longo do dia, sendo necessário um monitoramento detalhado para compreender os padrões de uso (Garcia *et al.*, 2020).
- Infraestrutura diversificada: Edifícios antigos frequentemente possuem sistemas elétricos defasados, dificultando a implementação de tecnologias modernas de controle e automação (Anjos *et al.*, 2023).
- Falta de integração entre sistemas: Muitos campi universitários utilizam sistemas descentralizados de controle de energia, o que dificulta a análise unificada do consumo energético (Barreto Junior *et al.*, 2020).
- Comportamento dos usuários: O uso ineficiente de energia por alunos, professores e funcionários pode gerar desperdícios, tornando necessário o desenvolvimento de campanhas de conscientização e automação inteligente (Amurim *et al.*, 2021).

Esses desafios reforçam a necessidade da adoção de soluções tecnológicas, como redes de sensores IoT, plataformas inteligentes de análise de dados e automação do consumo energético, garantindo maior controle e monitoramento na gestão da energia elétrica.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

A crescente demanda por eficiência energética em ambientes acadêmicos tem impulsionado o desenvolvimento de diversas soluções baseadas em IoT. Diferentes abordagens têm sido propostas para monitoramento e gestão do consumo energético, cada uma com metodologias, tecnologias e objetivos distintos. Neste capítulo, são apresentados trabalhos relacionados que exploram soluções IoT para eficiência energética, destacando suas características, componentes utilizados e sua relevância para o contexto do trabalho proposto.

3.1 Sistema de Monitoramento de Uso de Energia para o Campus Universitário UFAM-ICET Utilizando Internet das Coisas

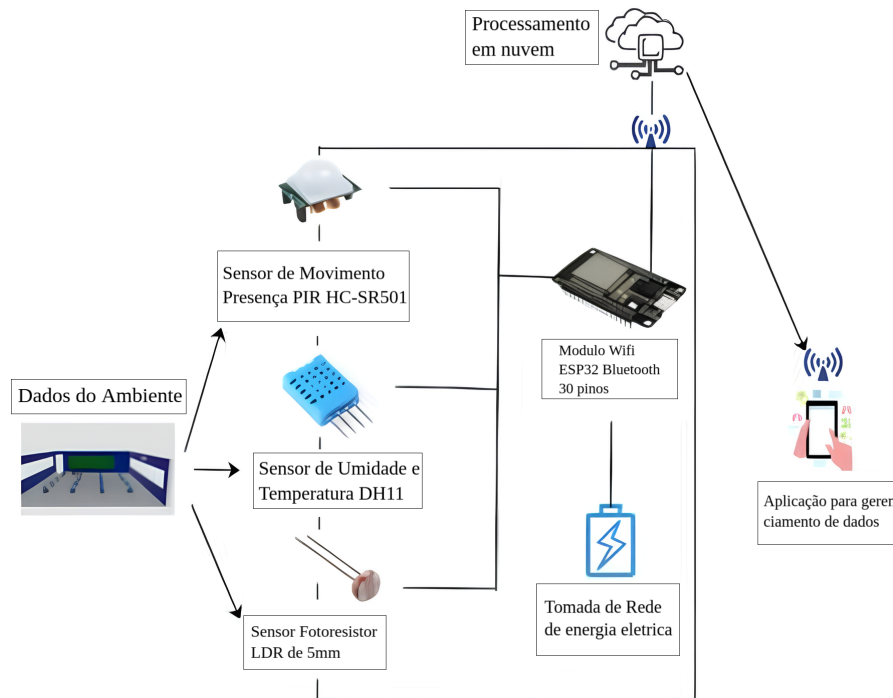
O trabalho Anjos *et al.* (2023) apresenta uma solução voltada para o monitoramento de consumo energético em salas de aula do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia da UFAM. A proposta utiliza sensores IoT, comunicação via Wi-Fi (ESP32) e a criação de uma interface gráfica desenvolvida no Unity 3D, permitindo que os dados sejam coletados em tempo real e visualizados em um aplicativo móvel para Android. O sistema também oferece notificações de consumo inadequado.

Os componentes principais utilizados no sistema incluem sensores PIR HC-SR501 para detectar movimento e presença, sensores DHT11 para medir temperatura e umidade, sensores infravermelhos reflexivos para detecção de obstáculos e sensores LDR para medir luminosidade. A comunicação é viabilizada pelo módulo Wi-Fi ESP32 com Bluetooth. O protocolo de comunicação utilizado foi o *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Esses dados são processados na nuvem e disponibilizados para o aplicativo, que inclui funcionalidades como alertas via Telegram e um histórico de consumo. A arquitetura é representada na Figura 5.

O trabalho da UFAM se relaciona diretamente com o projeto proposto, ao compartilhar a motivação principal de promover eficiência energética em ambientes acadêmicos. Ambos utilizam sensores IoT para capturar dados em tempo real e monitorar o consumo energético de forma eficiente. Além disso, a proposta da UFAM também foca em fornecer informações acessíveis aos usuários por meio de interfaces gráficas, assim como o trabalho proposto busca oferecer *dashboards* para análise de dados com maior clareza.

Entretanto, o atual trabalho proposto se diferencia em diversos aspectos, sendo o principal o uso de LoRaWAN como tecnologia de comunicação. Diferentemente do Wi-Fi

Figura 5 – Arquitetura do sistema de monitoramento.



Fonte: Adaptado de Anjos *et al.* (2023)

utilizado no trabalho da UFAM, o LoRaWAN é mais adequado para escalabilidade em ambientes amplos e com múltiplos dispositivos. Além disso, a integração da solução com a plataforma FIWARE garante maior flexibilidade para o processamento e análise dos dados em sistemas mais complexos, enquanto o trabalho relacionado foca no uso de uma aplicação móvel dedicada, o que limita sua interoperabilidade com outras plataformas.

Em síntese, o trabalho desenvolvido no campus da UFAM oferece uma abordagem prática e eficiente para monitorar o consumo de energia em salas de aula, utilizando componentes e tecnologias acessíveis. Apesar de algumas diferenças técnicas e de escopo, ele contribui significativamente como um trabalho relacionado ao atual projeto proposto, destacando os benefícios e desafios do uso de IoT para eficiência energética em ambientes acadêmicos.

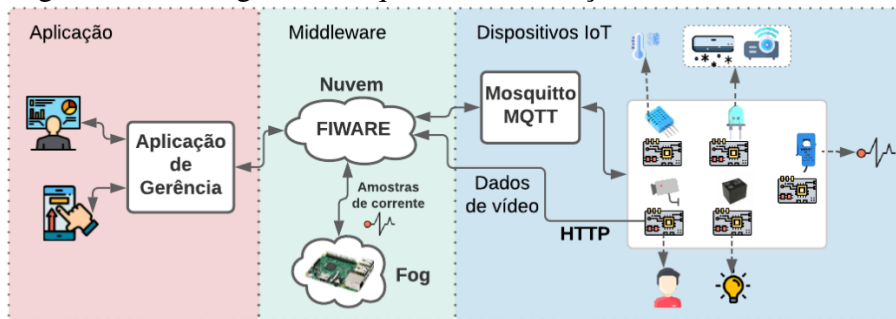
3.2 Uma solução de IoT baseada no FIWARE para gerenciamento de recursos energéticos e serviços acadêmicos em um campus universitário

O trabalho desenvolvido por Amurim *et al.* (2021) apresenta uma solução para monitoramento e controle de recursos energéticos e serviços acadêmicos automatizados em um campus universitário, utilizando a plataforma FIWARE como middleware principal. A proposta inclui o controle de equipamentos como lâmpadas, projetores e aparelhos de ar-condicionado,

além do monitoramento de variáveis ambientais, como temperatura e umidade.

Os componentes utilizados no sistema incluem microcontroladores ESP-01, ESP32-CAM e Raspberry Pi 3. O sistema emprega sensores de corrente para monitorar o consumo energético, sensores de temperatura e umidade para controle ambiental, além de câmeras para reconhecimento facial e detecção de presença em salas de aula. A comunicação entre os dispositivos utiliza o protocolo MQTT. Dados coletados são processados em camadas de *fog computing* e nuvem, otimizando o tempo de resposta e a escalabilidade do sistema. A arquitetura é representada na Figura 6.

Figura 6 – Visão geral da arquitetura da solução.



Fonte: Amurim *et al.* (2021)

O trabalho se relaciona com o projeto proposto ao compartilhar a motivação de promover eficiência energética em campi universitários. Ambos utilizam IoT para coletar dados em tempo real e propor soluções inteligentes que reduzam o consumo de energia e melhorem a gestão de recursos. A similaridade também se observa no uso do FIWARE como *middleware* para gerenciamento e análise de dados, o que reforça sua aplicabilidade em projetos de monitoramento energético em larga escala.

Entretanto, o projeto proposto se diferencia ao integrar tecnologias de comunicação como LoRaWAN, que oferece maior escalabilidade e cobertura em comparação ao uso de Wi-Fi e MQTT isolados no trabalho de Amurim *et al.* (2021). Além disso, enquanto o trabalho relacionado prioriza o controle de dispositivos e o fornecimento de dados em tempo real, o projeto atual foca em análises mais avançadas de padrões de consumo e sustentabilidade, utilizando *dashboards* específicos para compreensões mais profundas.

Em resumo, o trabalho de Amurim *et al.* (2021) apresenta uma abordagem robusta e acessível para monitoramento de energia e serviços acadêmicos em ambientes universitários. Ele serve como uma base importante para justificar a relevância do uso do FIWARE em soluções IoT, destacando os desafios e os benefícios da integração entre dispositivos heterogêneos. As

comparações reforçam as contribuições do projeto proposto em termos de escalabilidade e integração com sistemas de comunicação de longo alcance.

3.3 Sistema de Monitoramento em Tempo Real do Consumo de Energia Elétrica no Centro Universitário UNIFAGOC

O trabalho desenvolvido por Barreto Junior *et al.* (2020) apresenta um sistema de monitoramento em tempo real do consumo de energia elétrica no Centro Universitário Governador Ozanam Coelho (UNIFAGOC). A proposta baseia-se na criação de um módulo de sensoriamento que coleta dados de consumo energético e em uma interface de visualização, desenvolvida para fornecer informações detalhadas aos gestores da instituição. O objetivo é identificar pontos de consumo heterogêneos e contribuir para a tomada de decisão na gestão energética.

Os principais componentes utilizados no sistema incluem microcontroladores ESP32 e sensores de corrente ACS712-30A, que são responsáveis por medir o consumo elétrico dos equipamentos monitorados. A comunicação entre os dispositivos ocorre por meio do protocolo MQTT, enquanto a plataforma EmonCMS é utilizada para processar, armazenar e apresentar os dados coletados. Esses dados são registrados em intervalos regulares e disponibilizados em uma interface web personalizada, que possibilita a visualização de métricas em tempo real e históricos de consumo, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Exemplo de tela personalizada possível no EmonCMS.



Fonte: Barreto Junior *et al.* (2020)

O trabalho se relaciona com o projeto proposto ao compartilhar a motivação de promover eficiência energética por meio do monitoramento de consumo em tempo real. Ambos utilizam sensores IoT e comunicação sem fio para coletar dados e apresentar informações úteis para a gestão de energia. Além disso, os dois projetos enfatizam a criação de ferramentas acessíveis e personalizáveis para análise de dados.

No entanto, o projeto proposto se diferencia ao integrar tecnologias de comunicação como LoRaWAN, que oferecem maior alcance e escalabilidade em comparação ao Wi-Fi utilizado no trabalho de Barreto Junior *et al.* (2020). Além disso, o uso do *middleware* FIWARE no projeto proposto permite maior flexibilidade e interoperabilidade para integrar dados de diferentes fontes, enquanto o trabalho relacionado utiliza o EmonCMS, que é mais limitado em termos de integração com outros sistemas.

Em resumo, o trabalho desenvolvido no UNIFAGOC apresenta uma solução prática e funcional para o monitoramento energético em instituições de ensino. Sua aplicação destaca os benefícios da IoT na gestão de recursos e serve como uma base importante para o desenvolvimento de sistemas mais avançados, como o proposto, que visa atender a uma maior escalabilidade em ambientes universitários amplos.

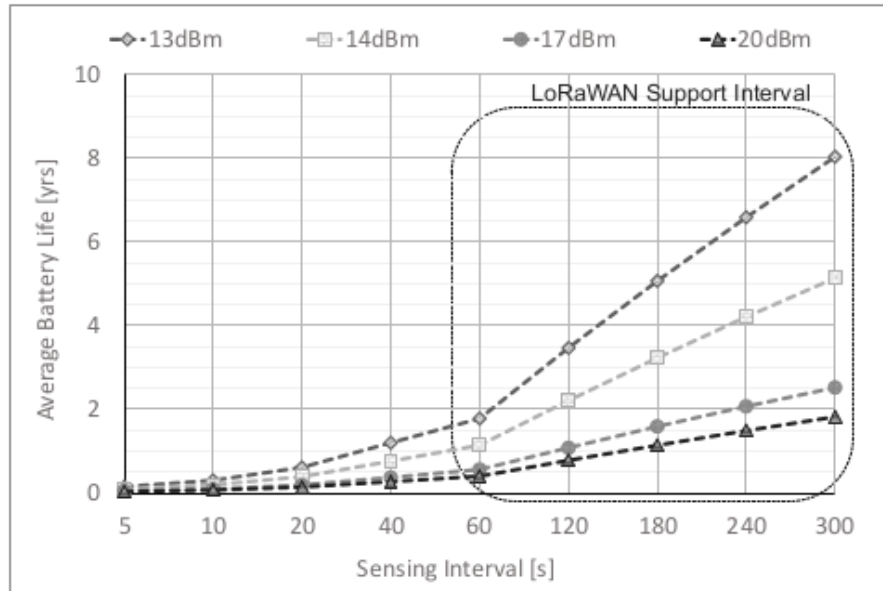
3.4 Energy-Efficient LoRaWAN for Industry 4.0 Applications

O trabalho desenvolvido por Sherazi *et al.* (2021) apresenta um estudo aprofundado sobre o uso de LoRaWAN para aplicações da Indústria 4.0, com foco na eficiência energética e na sustentabilidade. A pesquisa avalia o desempenho de dispositivos LoRaWAN em ambientes industriais sob diferentes configurações de intervalo de sensoriamento, analisando métricas como vida útil da bateria, custo de reposição e emissões de carbono. Além disso, o estudo explora o impacto do uso de fontes de energia renováveis no prolongamento da vida útil dos dispositivos e na redução de custos operacionais.

Os componentes avaliados no sistema incluem dispositivos baseados na tecnologia LoRa, projetados para monitorar parâmetros como temperatura, fluxo, vazamento e detecção de anomalias. O trabalho destaca a capacidade do LoRaWAN de operar em bandas não licenciadas, garantindo baixa latência e eficiência energética. A análise incorpora tanto cenários convencionais, com dispositivos alimentados por baterias, quanto cenários de colheita de energia (*energy harvesting*), que utilizam fontes renováveis como luz artificial e gradientes térmicos para alimentar os sensores. A Figura 8 mostra um gráfico da vida útil média da bateria em função do

intervalo de tempo de sensoriamento.

Figura 8 – Vida útil média da bateria do dispositivo de monitoramento considerando diferentes potências de transmissão em LoRaWAN.



Fonte: Sherazi *et al.* (2021)

O trabalho se relaciona com o projeto proposto ao compartilhar o uso da tecnologia LoRaWAN para monitoramento e coleta de dados em ambientes amplos, destacando a escalabilidade e a eficiência energética como características centrais. Ambos os estudos buscam otimizar o consumo de energia em sistemas IoT, propondo soluções adaptadas a ambientes específicos. No entanto, enquanto o projeto proposto aplica o LoRaWAN em campi universitários para monitoramento energético, o trabalho de Sherazi *et al.* (2021) concentra-se no uso industrial, analisando fatores como custo-benefício e impacto ambiental.

O principal diferencial do projeto proposto é sua integração com a plataforma FIWARE, que oferece maior flexibilidade para processamento e análise de dados, algo que não é explorado no trabalho de Sherazi *et al.* (2021). Além disso, o projeto propõe a utilização de *dashboards* para análise em tempo real e otimização de padrões de consumo energético em um ambiente educacional, enquanto o trabalho relacionado foca em análises específicas para ambientes industriais, como redução de emissões de carbono e gerenciamento de custos operacionais.

Em síntese, o trabalho de Sherazi *et al.* (2021) fornece uma base para justificar o uso do LoRaWAN em sistemas IoT, evidenciando seus benefícios em termos de eficiência energética e sustentabilidade. Apesar das diferenças de contexto e aplicação, as análises apresentadas no

estudo contribuem significativamente para o entendimento das potencialidades do LoRaWAN em cenários amplos e variados, destacando a relevância de soluções adaptadas para otimização energética.

3.5 Um Estudo sobre a Eficiência Energética em Sistemas IoT com Diferentes Tipos de Comunicação

O trabalho de Cabral (2019) analisa o consumo energético em dispositivos IoT e compara a eficiência de diferentes tipos de comunicação sem fio, incluindo LoRa, Wi-Fi e GPRS. O estudo visa identificar qual tipo de comunicação é mais adequada para dispositivos que requerem baixo consumo de energia, sem perder a conectividade. Além disso, propõe a técnica de duplicação de pacotes para melhorar a confiabilidade das comunicações, utilizando múltiplos canais simultâneos para o envio de dados.

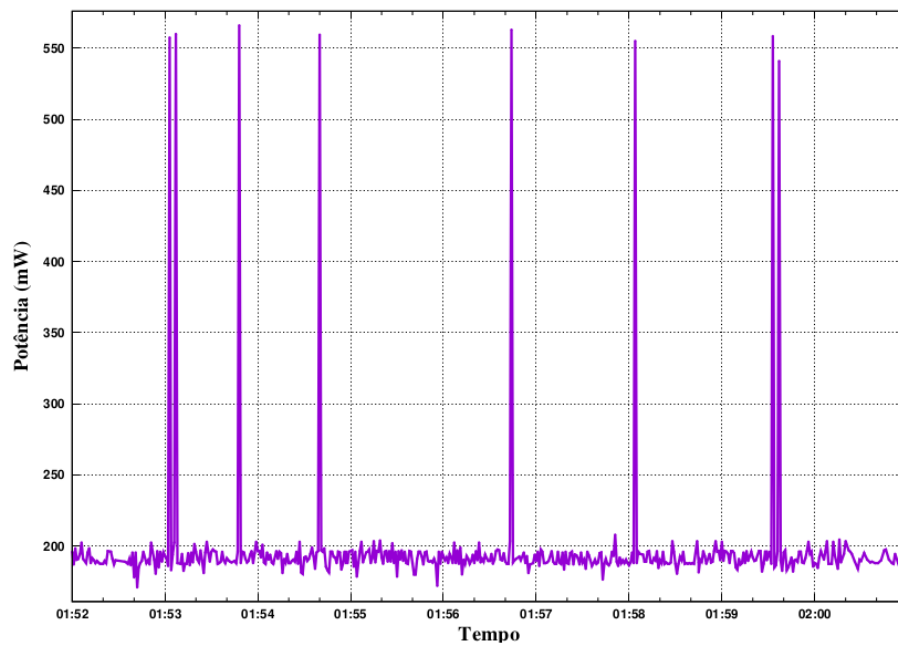
Os componentes utilizados no sistema incluem a placa controladora FRDM-KL25Z e o sensor DHT22, responsáveis por coletar dados de temperatura e umidade. Para a comunicação, foram utilizados os módulos LoRa RFM95W, Wi-Fi ESP01 e GPRS SIM800L. Os dados coletados foram transmitidos e analisados quanto ao consumo energético e à taxa de sucesso no envio de pacotes. A metodologia também incorporou o uso de um sensor INA219 para medir o consumo de corrente elétrica, permitindo o cálculo preciso da potência consumida durante os testes. Na Figura 9 é exibido o consumo de um módulo LoRa.

Este trabalho se relaciona ao projeto proposto ao compartilhar a motivação de otimizar a eficiência energética em sistemas IoT. Ambos os estudos utilizam LoRa como uma das tecnologias de comunicação e avaliam a eficiência em termos de consumo energético e confiabilidade. A técnica de duplicação de pacotes apresentada no trabalho de Cabral (2019) também é relevante para aplicações que demandam alta confiabilidade, como monitoramento crítico.

No entanto, o projeto proposto se diferencia por focar em um ambiente educacional e utilizar a plataforma FIWARE para integrar e processar os dados coletados, enquanto o trabalho de Cabral (2019) se concentra em testes laboratoriais para comparar os diferentes tipos de comunicação em termos de consumo energético e confiabilidade. Além disso, o projeto proposto prioriza a escalabilidade e a análise de padrões de consumo em tempo real, aspectos que não são abordados no estudo relacionado.

Em resumo, o trabalho de Cabral (2019) fornece uma base importante para justificar

Figura 9 – Gráfico de consumo LoRa.



Fonte: Cabral (2019)

o uso de LoRa como uma tecnologia eficiente em termos energéticos. Ele destaca as vantagens e desvantagens de diferentes tipos de comunicação, contribuindo para a discussão sobre a escolha de tecnologias IoT em projetos que priorizam baixo consumo de energia e alta confiabilidade.

3.6 Comparativo entre os Trabalhos Relacionados

Para visualizar melhor as semelhanças e diferenças entre os trabalhos analisados, o Quadro 1 apresenta uma comparação baseada em critérios técnicos e funcionais. Os critérios incluem a tecnologia de comunicação utilizada, o processamento para visualização dos dados, os sensores empregados para medição, os microcontroladores utilizados, o objetivo principal de cada trabalho e o ambiente de aplicação.

Quadro 1 – Comparação entre Trabalhos Relacionados e o Trabalho Proposto

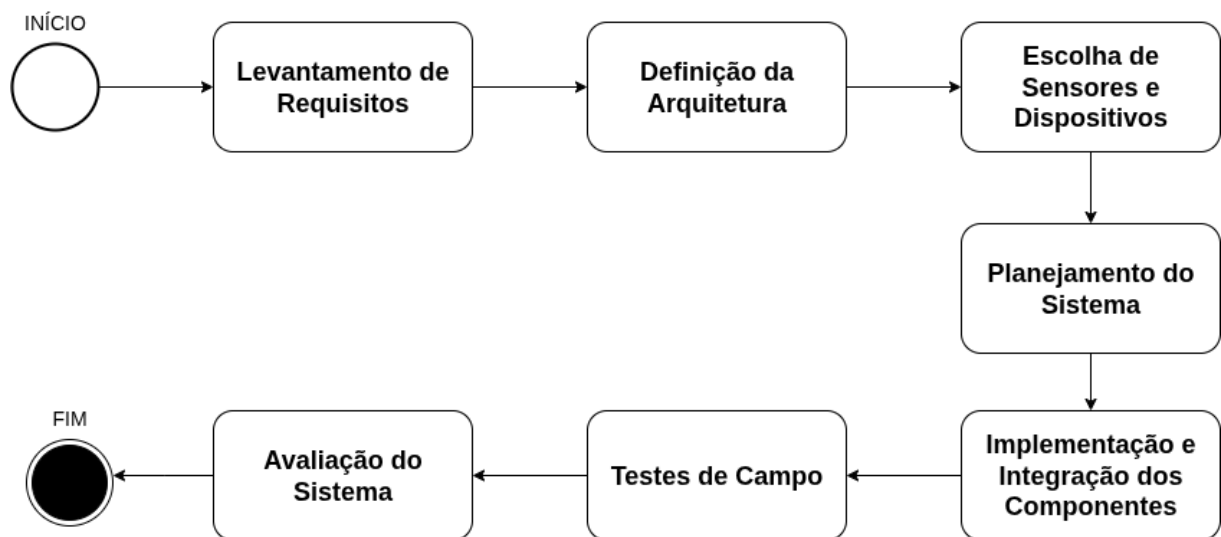
	Trabalho Proposto	Anjos <i>et al.</i> (2023)	Amurim <i>et al.</i> (2021)	Barreto Junior <i>et al.</i> (2020)	Cabral (2019)
Tecnologias de Comunicação	LoRaWAN e MQTT	Wi-Fi	Wi-Fi e MQTT	Wi-Fi e MQTT	LoRa, Wi-Fi, GPRS
Middleware	FIWARE	Não se aplica	FIWARE	EmonCMS	Não se aplica
Sensores	Sensor de corrente	PIR, DHT11, LDR	Sensores de corrente e de ambiente	Sensores de corrente ACS712	DHT22
Microcontroladores	TTGO LoRa32 SX1276 OLED	ESP32, ESP8266	ESP32-CAM, ESP-01	ESP32	FRDM-KL25Z
Objetivo Principal	Monitoramento energético em campus universitário	Monitoramento de energia em salas de aula	Gestão energética e acadêmica	Monitoramento energético em tempo real	Comparar eficiência energética de diferentes protocolos IoT
Ambiente de Aplicação	Campus universitário	Campus universitário	Campus universitário	Campus universitário	Teste em laboratório

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os passos metodológicos adotados para a implantação de uma infraestrutura IoT no Campus da UFC em Quixadá, com o objetivo de monitorar o consumo energético. A metodologia foi dividida em sete etapas principais: levantamento de requisitos, definição da arquitetura, escolha de sensores e dispositivos, planejamento do sistema, implementação e integração dos componentes, testes de campo e monitoramento, avaliação do sistema. Cada etapa é descrita em detalhes nos subitens a seguir.

Figura 10 – Ilustração do fluxo do processo metodológico



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Levantamento dos Requisitos

Primeiramente, o levantamento de requisitos foi conduzido com base nas necessidades energéticas do campus, considerando aspectos como:

- Infraestrutura elétrica e de rede disponível;
- Áreas estratégicas para monitoramento;
- Requisitos técnicos para a implementação da solução IoT.

Para essa etapa, foram realizadas reuniões com gestores acadêmicos e técnicos responsáveis pela manutenção elétrica, a fim de mapear os pontos críticos e definir locais estratégicos para a instalação dos sensores. Dessa forma, no Quadro 2 são apresentados os principais requisitos identificados e definidos para o sistema proposto.

Quadro 2 – Levantamento de Requisitos

Sistema	Requisitos Funcionais	Requisitos Não Funcionais
Plataforma Web	Permitir login de administradores e usuários autorizados.	Compatibilidade com os principais navegadores web.
	Exibir consumo energético em tempo real.	Interface responsiva e intuitiva.
	Exibir status dos dispositivos conectados.	Comunicação eficiente e segura com o banco de dados.
	Exibir histórico de consumo por período.	Baixo tempo de resposta para exibição de dados em tempo real.
		Suporte a múltiplos usuários simultâneos.
Dispositivos IoT	Medir consumo de energia em diferentes setores do campus.	Custo acessível para viabilização do projeto em larga escala.
	Comunicar dados via LoRaWAN com baixa latência.	Alta precisão na captura dos dados.
	Armazenar e transmitir dados para a plataforma web.	
	Funcionar de maneira autônoma sem necessidade de intervenção constante.	

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Definição da Arquitetura

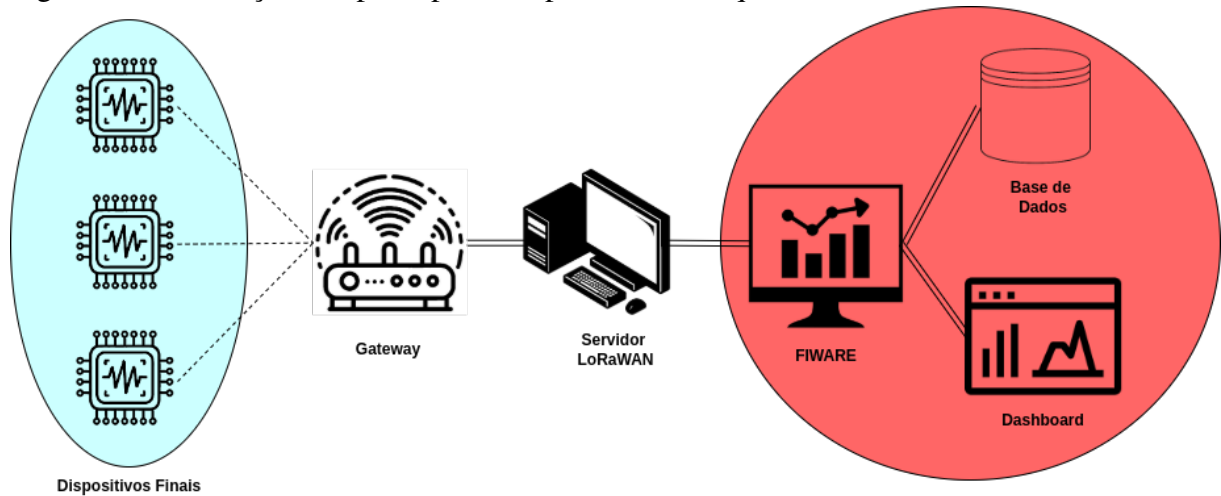
A arquitetura do sistema foi planejada de forma a garantir uma comunicação eficiente entre o dispositivo final, o gateway LoRaWAN e a plataforma FIWARE para armazenamento e processamento dos dados. A solução inclui:

- Dispositivos finais distribuídos para medição de consumo energético;
- Gateway LoRaWAN para recepção e transmissão dos dados;
- Servidor LoRaWAN para receber dados e informações do gateway;
- Servidor de aplicação com a plataforma FIWARE para processamento e armazenamento das informações coletadas e o dashboard Grafana para visualização dos dados.

4.3 Escolha de Sensores e Dispositivos

A escolha dos sensores e dispositivos foi realizada com base nos requisitos técnicos e operacionais definidos para o sistema de monitoramento energético. Os componentes selecionados foram cuidadosamente escolhidos para garantir compatibilidade com a infraestrutura existente no campus Quixadá da UFC e com a tecnologia LoRaWAN. A prioridade foi dada ao baixo consumo energético, alta precisão nas medições e facilidade de manutenção, assegurando que os componentes escolhidos atendessem aos padrões de qualidade necessários para uma operação contínua e precisa do sistema. A seleção seguiu o objetivo de proporcionar uma solução

Figura 11 – Ilustração dos principais componentes da arquitetura



Fonte: Elaborado pelo autor.

escalável, robusta e de fácil implementação e manutenção no ambiente universitário.

4.3.1 Dispositivo Final

O dispositivo final da infraestrutura LoRaWAN é o componente responsável pela coleta de dados do ambiente, atuando como um nó final na rede. Esse dispositivo pode ser projetado para capturar dados de forma passiva, como no caso dos sensores de monitoramento, ou para interagir ativamente com o ambiente, ajustando variáveis como temperatura ou umidade, conforme a aplicação desejada. Para o presente projeto, foi utilizado o microcontrolador TTGO LoRa32 SX1276 OLED, conforme ilustrado na Figura 12. Esse microcontrolador foi escolhido devido à sua compatibilidade com a tecnologia LoRaWAN, oferecendo comunicação eficiente em longas distâncias e baixo consumo de energia, características essenciais para o monitoramento energético em ambientes universitários. O TTGO LoRa32 SX1276 OLED integra o módulo LoRa SX1276, que permite a transmissão de dados utilizando a modulação Chirp Spread Spectrum (CSS). Essa modulação garante robustez e longo alcance nas comunicações. A placa também conta com um display OLED, que facilita a visualização local dos dados coletados, proporcionando um feedback visual imediato durante a operação.

4.3.2 Sensores e Componentes

Nesta seção são apresentados os principais sensores e componentes utilizados na implementação do projeto. A escolha desses dispositivos foi fundamentada nos requisitos do projeto, priorizando precisão, eficiência e compatibilidade com a infraestrutura de comunicação

Figura 12 – TTGO LoRa32 SX1276
OLED



Fonte: LilyGO (2025)

LoRaWAN.

Sensor de Corrente SCT013

O SCT013 é um sensor de corrente não invasivo que permite a medição de corrente elétrica em circuitos sem a necessidade de interromper a passagem da corrente, que está representado na Figura 13. Este sensor funciona por meio do princípio da indução, capturando a corrente que passa pelo cabo ao qual está acoplado.

Figura 13 – Sensor de
Corrente Não Invasivo
100A:50mA SCT-013



Fonte: SmartKits (2025b)

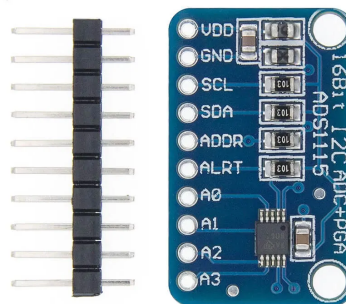
No contexto do projeto, o SCT013 desempenha um papel fundamental no monitoramento do consumo energético.

Conversor Analógico Digital ADS1115

O ADS1115 é um conversor analógico-digital (ADC) de 16 bits, amplamente utilizado para medições de sinais analógicos em projetos de IoT, que está representado na Figura 14. No contexto deste projeto, o ADS1115 é responsável pela conversão dos sinais de corrente detectados pelo sensor SCT013 em dados digitais precisos, que podem ser interpretados pelo microcontrolador.

Sua importância se destaca pelo fato de ser um ADC com alta resolução, permitindo medições precisas da corrente elétrica consumida. Além disso, o ADS1115 possui a capacidade de realizar leituras diferenciais e amplificação de sinal, o que o torna ideal para aplicações onde a precisão é crítica, como no monitoramento energético.

Figura 14 – Módulo ADS1115 Conversor Analógico Digital



Fonte: SmartKits (2025a)

4.3.3 Gateway

O gateway desempenha um papel crucial na comunicação entre os nós finais e o servidor de rede. Ele funciona como uma ponte, recebendo os pacotes de dados enviados pelos dispositivos finais através da rede LoRa e encaminhando-os para o servidor de rede via TCP/IP. Essa comunicação permite que os dados coletados pelos sensores sejam transmitidos de forma eficiente para o sistema de processamento central.

O gateway utilizado neste projeto foi o Gateway LoRaWAN Radioenge (RadioEnge, 2025), com o Shield RPi3-GWHat acoplado ao Raspberry Pi 3 conforme ilustrado na Figura 15. Esse modelo foi selecionado por sua capacidade de fornecer comunicação de longo alcance,

característica essencial para a cobertura do campus universitário. Além disso, o Gateway LoRaWAN Radioenge oferece suporte à modulação LoRa/CSS, que permite a comunicação robusta mesmo em ambientes com interferências.

Uma das principais vantagens desse gateway é a capacidade de receber pacotes em até oito canais simultaneamente, o que proporciona maior escalabilidade e eficiência na comunicação de dados entre múltiplos dispositivos IoT conectados à rede LoRa.

Figura 15 – Gateway LoRaWAN Radioenge



Fonte: RadioEnge (2025)

4.3.4 Servidor LoRaWAN

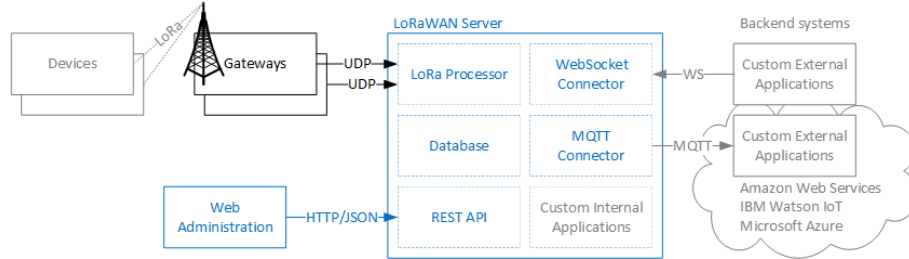
O servidor LoRaWAN é o componente responsável por receber os dados enviados pelo gateway. Esse servidor desempenha o papel de processar e encaminhar os pacotes recebidos para os servidores de aplicação. Ele é essencial para garantir a continuidade da comunicação entre os dispositivos finais e as plataformas de armazenamento e processamento de dados.

Neste trabalho, foi implementado um servidor LoRaWAN de código aberto que integra tanto o servidor de rede quanto o servidor de aplicativo, conforme especificado em (Gotthardp, 2025b). Essa solução foi escolhida devido à sua flexibilidade e à capacidade de operar em redes LoRaWAN privadas, como a infraestrutura utilizada neste projeto. O servidor implementado facilita a integração de dados provenientes dos dispositivos LoRaWAN com a plataforma de aplicação, proporcionando escalabilidade e alta performance.

Na Figura 16, é ilustrada a arquitetura do servidor LoRaWAN. O servidor recebe os dados dos dispositivos finais por meio dos gateways, que utilizam o protocolo UDP para transmitir os pacotes. O servidor LoRaWAN é composto por diversos módulos, incluindo o processador LoRa, conectores WebSocket e MQTT, e um banco de dados para armazenamento. A comunicação com sistemas de backend é realizada via REST API e MQTT, permitindo

integração com aplicações externas, como Amazon Web Services, IBM Watson IoT e Microsoft Azure, além de permitir administração via interface web.

Figura 16 – Arquitetura do Servidor LoRaWAN



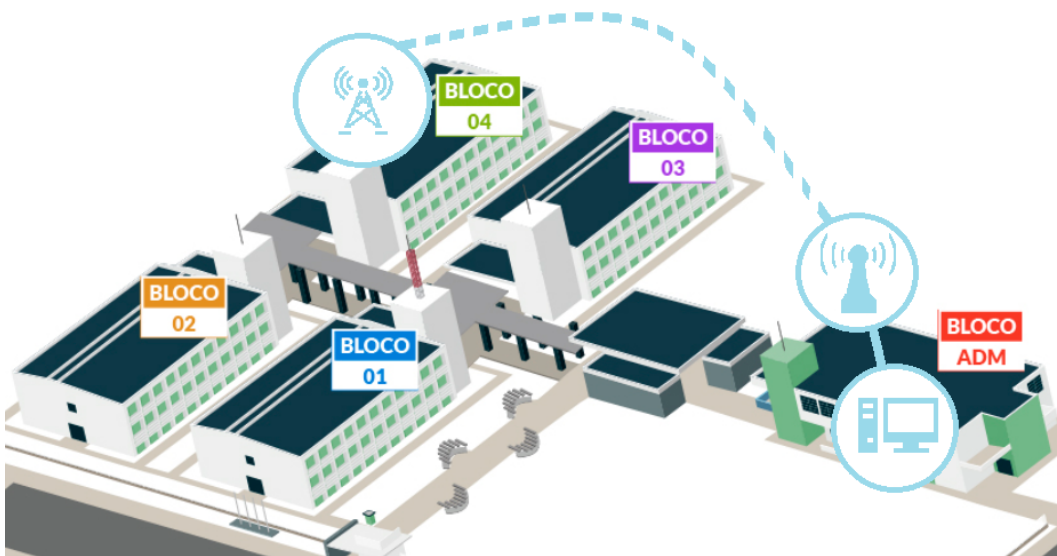
Fonte: Gotthardp (2025b)

4.4 Planejamento do Sistema

A estrutura do sistema foi planejada com base na infraestrutura disponível no Campus da UFC em Quixadá, a fim de assegurar uma instalação eficaz, segura e funcional da solução de monitoramento energético. Os critérios de acessibilidade aos dispositivos, cobertura de sinal, consumo representativo e viabilidade técnica foram levados em consideração ao tomar as decisões.

A Figura 17 apresenta um plano 3D do Campus da UFC em Quixadá, no qual foram indicadas de forma ilustrativa as localizações do dispositivo final, gateway e servidor.

Figura 17 – Ilustração da Planta do Campus da UFC em Quixadá



Fonte: Adaptado de Universidade Federal do Ceará (2025b)

4.4.1 Localização Dispositivo Final

Para a coleta dos dados de consumo, foi selecionado um ponto específico no campus: um painel de distribuição de energia localizado no 1º andar do bloco 4. Dentro deste painel, optou-se por monitorar o circuito de um aparelho de ar-condicionado da sala Almoxarifado, por se tratar de uma carga elétrica de uso frequente e significativa. O sensor de corrente foi acoplado de forma não invasiva ao cabo de alimentação do equipamento, com o objetivo de capturar variações de consumo em tempo real.

Figura 18 – Painel de Distribuição de Energia



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Localização Gateway

O gateway LoRaWAN foi instalado no 1º andar do Bloco da Administração, na sala do Núcleo de Tecnologia da Informação e Comunicação (NTIC). A escolha deste local levou em conta a infraestrutura de rede disponível, facilidade de acesso e, principalmente, a cobertura de sinal necessária para a comunicação com o dispositivo instalado no Bloco 4. A posição do gateway foi definida de forma a garantir estabilidade na recepção dos pacotes LoRa e conectividade contínua com o servidor.

Figura 19 – Gateway instalado Campus da UFC em Quixadá



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.3 Hospedagem dos Servidores

Tanto o servidor LoRaWAN quanto o servidor responsável pela plataforma FIWARE foram implantados em servidores locais do próprio Campus da UFC em Quixadá. Essa abordagem proporcionou maior controle sobre o ambiente de execução, facilidade de manutenção, maior segurança dos dados e integração direta com a rede institucional. O servidor LoRaWAN foi configurado para receber e encaminhar os pacotes de dados recebidos do gateway, enquanto o servidor com o FIWARE ficou responsável por armazenar, processar e disponibilizar os dados para visualização e análise.

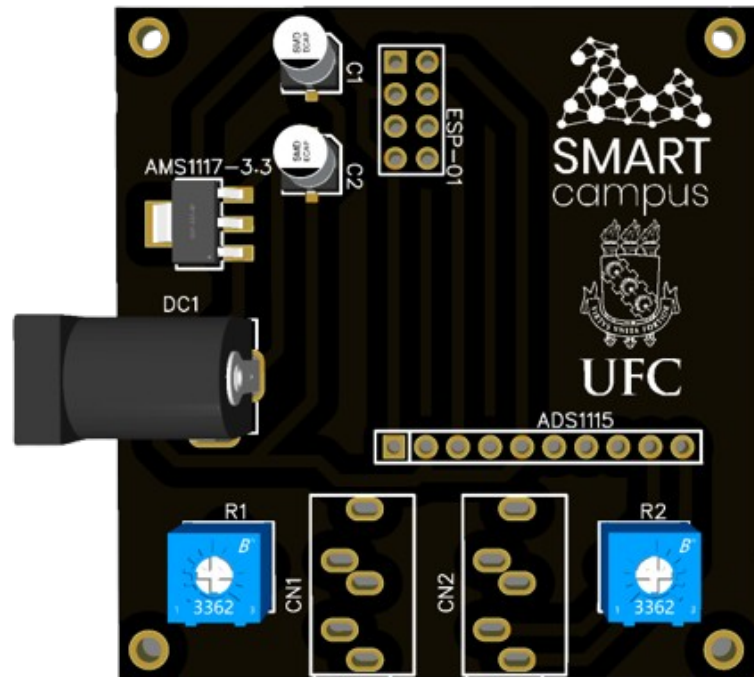
4.5 Implementação e Integração dos Componentes

A implementação do sistema foi conduzida em etapas, abrangendo a montagem dos dispositivos, a instalação física dos sensores, a configuração do gateway e dos servidores, além da integração com a plataforma FIWARE. Todo o processo foi executado com o objetivo de garantir a comunicação estável entre os elementos da arquitetura e permitir a coleta de dados em tempo real.

4.5.1 Montagem do Dispositivo Final

A montagem do dispositivo final foi realizada utilizando uma PCB personalizada, disponibilizada pelo Campus da UFC em Quixadá, desenvolvida para integrar os sensores e facilitar a comunicação com a placa TTGO LoRa32 SX1276 OLED. A PCB inclui as conexões necessárias para acoplar o sensor ADS1115 (conversor analógico-digital) e o sensor de corrente SCT013. Além disso, a placa conta com um Header que permite fazer a conexão com os pinos GPIO da TTGO LoRa32 SX1276 OLED, possibilitando tanto a alimentação da placa quanto a comunicação I2C com o ADS1115. A Figura 20 ilustra a disposição da PCB, com os componentes mencionados e a conexão para alimentação e comunicação com a placa TTGO.

Figura 20 – Vista 3D da PCB



Fonte: Universidade Federal do Ceará (2025a)

A Tabela 1 mostra o pinout que conecta o Header da PCB aos pinos GPIO da placa TTGO LoRa32 SX1276 OLED. Esses pinos são responsáveis pela alimentação da placa e pela comunicação I2C com o ADS1115.

4.5.2 Instalação do Sensor

O sensor SCT-013 foi fixado no cabo de alimentação de um ar-condicionado localizado na sala do Almoxarifado, conectado a um painel de distribuição de energia no 1º andar do Bloco 4. A instalação foi realizada de forma segura e não invasiva, respeitando as normas de

Tabela 1 – Pinout entre o Header da PCB e os pinos GPIO da placa TTGO LoRa32 SX1276 OLED

Pino Header PCB	Pino GPIO TTGO LoRa32 SX1276 OLED
Pino 2	GND
Pino 4	GPIO 13 (SCK)
Pino 6	GPIO 13 (SDA)
Pino 3 e 7	VIN

Fonte: Elaborado pelo autor.

isolamento e proteção elétrica. O objetivo foi monitorar o consumo desse equipamento de forma contínua e precisa.

4.5.3 Configuração do Gateway

A instalação e configuração do gateway LoRaWAN foi realizada utilizando uma imagem ISO disponibilizada pela própria fabricante do gateway, RadioEnge, para ser instalada em um SDCard e posteriormente utilizada em um Raspberry Pi 3. A imagem foi baixada e gravada no SDCard, e o Raspberry Pi 3 foi configurado para rodar o sistema operacional com o servidor LoRaWAN. A referência à imagem utilizada pode ser consultada em (RadioEnge, 2025).

A configuração do gateway foi realizada no arquivo `global_conf.json`, onde os parâmetros do servidor LoRaWAN foram definidos. Um exemplo dessa configuração é mostrado na Figura 21, que ilustra a configuração do gateway diretamente na Raspberry Pi 3, incluindo a definição do ID do gateway, o endereço do servidor e as configurações de porta e comunicação.

4.5.4 Instalação do Servidor LoRaWAN

A instalação do servidor LoRaWAN foi realizada utilizando o Docker, o que garantiu uma configuração prática e eficiente para o ambiente do servidor. A instalação foi feita com a imagem oficial fornecida pelo próprio servidor LoRaWAN, disponível no Docker Hub (Gotthardp, 2025a). Esta imagem foi escolhida por ser otimizada para implementar rapidamente o servidor LoRaWAN de forma compatível.

A Figura 22 a seguir mostra o comando `docker ps` sendo executado no servidor LoRaWAN, exibindo o *container* em funcionamento e as portas de rede mapeadas:

Figura 21 – Configuração do gateway no arquivo global_conf.json na Raspberry Pi 3.

```
"gateway_conf": {
  "gateway_ID": "AAAAAAAAAAAAAAAA", // Gateway Radioenge
  /* change with default server address/ports, or overwrite in local_conf.json */
  "server_address": "192.168.25.1",
  "serv_port_up": 1680,
  "serv_port_down": 1680,
  /* adjust the following parameters for your network */
  "keepalive_interval": 10,
  "stat_interval": 30,
  "push_timeout_ms": 1000,
  /* forward only valid packets */
  "forward_crc_valid": true,
  "forward_crc_error": false,
  "forward_crc_disabled": false,
  /* GPS configuration */
  "gps_tty_path": "/dev/ttyAMA0",
  /* GPS reference coordinates */
  "ref_latitude": 0.0,
  "ref_longitude": 0.0,
  "ref_altitude": 0
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Print do comando docker ps no servidor LoRaWAN, exibindo o container em execução.

```
smart@nc-lora:~$ docker ps
CONTAINER ID   IMAGE          COMMAND                  CREATED        STATUS        PORTS                               NAMES
5ea6fcb9d39d   lorawan_img:tag "/bin/sh -c bin/lora..." 20 months ago Up 2 months   0.0.0.0:8080->8080/tcp, :::8080->8080/tcp, 0.0.0.0:1680->1680/udp, :::1680->1680/udp, 0.0.0.0:8443->8443/tcp, :::8443->8443/tcp lorawan-server
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.5 Integração com a Plataforma FIWARE

A integração com a plataforma FIWARE foi realizada em um servidor já instalado na própria infraestrutura do Campus da UFC em Quixadá, que contém a plataforma FIWARE configurada junto com o dashboard Grafana e o broker MQTT. O servidor foi preparado para processar e armazenar os dados coletados dos dispositivos finais via LoRaWAN, garantindo uma comunicação fluida entre o gateway e a plataforma de análise de dados.

A plataforma FIWARE foi configurada para armazenar e processar os dados recebidos pelo servidor LoRaWAN, utilizando o Orion Context Broker para gerenciar os dados contextuais e permitindo a análise em tempo real através do Grafana. Além disso, o broker MQTT foi configurado para facilitar a troca de mensagens entre os dispositivos e a plataforma de dados.

A Figura mostra a execução de diversos containers Docker no servidor de aplicação, incluindo o FIWARE, o Grafana, o Prometheus e o Mosquitto (broker MQTT), que garantem o funcionamento eficiente da plataforma.

Figura 23 – Exibição dos containers Docker no servidor de aplicação.

```
smart@smartufcqx:~$ docker ps
```

CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	STATUS	NAMES	PORTS
75ca4abc0a64	smartufc-dev-config	"python3 app.py"	9 days ago	Up 9 days	smartufc-dev-config	0.0.0.0:50002->50002/tcp
67b5af33c39b	quay.io/fiware/iotagent-ul:3.1.0-distoreless	"/nodejs/bin/node ./..."	9 days ago	Up 9 days	fiware-iot-agent	4061/tcp, 0.0.0.0:4041->4041/tcp
3bdc4f9d4fbb	quay.io/fiware/orion:3.11.0	"/usr/bin/contextBro..."	9 days ago	Up 9 days	fiware-orion	0.0.0.0:1026->1026/tcp
0c4724d03c27	grafana/grafana:9.4.7	"/run.sh"	9 days ago	Up 9 days	grafana	0.0.0.0:3000->3000/tcp
38780c75774b	prom/prometheus:latest	"/bin/prometheus --c..."	9 days ago	Up 9 days	prometheus	0.0.0.0:9090->9090/tcp
26df4db47c68	orchestracities/quantumleap:1.0.0	"python app.py"	9 days ago	Up 9 days	fiware-quantumleap	0.0.0.0:8668->8668/tcp
03e31bae6448	ghcr.io/justwatchcom/sql_exporter	"/bin/sh -c sql_expo..."	9 days ago	Up 9 days	sql-exporter	9237/tcp
2c654bf71ccc	mongo:4.4	"docker-entrypoint.s..."	9 days ago	Up 9 days	db-mongo	0.0.0.0:27017->27017/tcp
a4b696908b61	crate:4.8.4	"/docker-entrypoint.s..."	9 days ago	Up 9 days	db-crate	0.0.0.0:4200->4200/tcp
f6cafb649f88	redis:6	"docker-entrypoint.s..."	9 days ago	Up 9 days	db-redis	0.0.0.0:6379->6379/tcp
1b1f62579252	gcr.io/cadvisor/cadvisor:latest	"/usr/bin/cadvisor -..."	9 days ago	Up 9 days	cadvisor	8080/tcp
485923d5ab2a	eclipse-mosquitto:1.6.14	"/docker-entrypoint.s..."	9 days ago	Up 9 days	mosquitto	0.0.0.0:9001->9001/tcp
adife1c46c09	prom/node-exporter:latest	"/bin/node_exporter ..."	9 days ago	Up 9 days		9100/tcp

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Testes de Campo

O processo de testes de campo foi organizado para avaliar o desempenho da infraestrutura IoT implementada no Campus da UFC em Quixadá. O foco principal foi garantir que o sistema de monitoramento energético, baseado na tecnologia LoRaWAN, operasse corretamente, transmitindo dados de consumo de energia coletados pelos dispositivos finais para o servidor de aplicação com a plataforma FIWARE. Os resultados desses testes de campo são apresentados no Capítulo 5, seção 5.2.

4.7 Avaliação do Sistema

A avaliação do sistema foi planejada com o objetivo de analisar o desempenho da comunicação entre os dispositivos finais e o servidor LoRaWAN, utilizando métricas chave como SNR (Signal-to-Noise Ratio), RSSI (Received Signal Strength Indicator) e Taxa de Sucesso. O cenário de teste foi configurado para que o dispositivo final enviasse mil pacotes por SF, abrangendo os fatores de espalhamento SF7 a SF12.

4.7.1 Análise das Métricas de Comunicação

Para a avaliação do desempenho, foram coletadas as seguintes métricas para cada SF:

- SNR (dB): A relação entre o sinal transmitido e o ruído recebido, sendo um indicador fundamental da qualidade da comunicação.
- RSSI (dBm): A intensidade do sinal recebido, que permite avaliar a qualidade do link de comunicação entre o dispositivo final e o gateway.
- Taxa de Sucesso de Envio de Pacote: A porcentagem de pacotes transmitidos com sucesso, um parâmetro essencial para avaliar a eficácia do sistema de comunicação.

4.7.2 Análise do Delay de Envio de Pacote

Além das métricas de SNR e RSSI, foi realizada uma análise do delay de envio dos pacotes, focando na avaliação do tempo médio de transmissão para cada valor de SF. Para isso, foi calculado o Time On Air (ToA), que representa o tempo necessário para o envio de um pacote para cada SF no dispositivo final. Após a coleta dos dados de ToA, os valores obtidos foram comparados com os resultados teóricos, considerando as mesmas condições experimentais utilizadas nos testes de transmissão do dispositivo final. Essa comparação levou em conta o tamanho do pacote e o SF, permitindo validar a precisão dos valores de ToA em diferentes cenários de comunicação.

Essas análises são fundamentais para entender como o SF impacta no desempenho da rede LoRaWAN, considerando aspectos como o alcance da comunicação, a robustez do sinal e a confiabilidade na transmissão de dados. Adiante, no Capítulo 5, na seção 5.3, são apresentados os resultados completos dessa avaliação, nos quais as métricas de SNR, RSSI, Taxa de Sucesso e Delay de Envio são detalhadas, proporcionando uma visão clara sobre o desempenho do sistema em diferentes condições de comunicação.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na implantação da infraestrutura de IoT baseada em LoRaWAN para monitoramento energético no Campus da UFC em Quixadá, seguindo a metodologia descrita no Capítulo 4. Os resultados são divididos em quatro seções principais: Implementação, Teste da Infraestrutura, Avaliação de Desempenho e Coleta de Dados. A seguir, descrevem-se as seções e os principais aspectos analisados.

5.1 Implementação

A implementação do sistema desenvolvido foi realizada utilizando a placa TTGO LoRa32 SX1276 OLED, que foi programada para coletar e transmitir dados de consumo energético. O código-fonte do sistema foi disponibilizado publicamente e pode ser acessado através do repositório no GitHub¹. Para o desenvolvimento do código, foi utilizado o PlatformIO, uma plataforma de desenvolvimento integrada (IDE) que permite a criação de projetos multiplataforma (PlatformIO, 2025). Essa abordagem facilita a adaptação do projeto para diferentes placas e arquiteturas, proporcionando maior flexibilidade e escalabilidade ao sistema.

Além disso, o repositório do GitHub contém todos os dados coletados durante os testes, os quais estão presentes nos resultados apresentados neste trabalho. Esses dados foram armazenados e estão disponíveis para consulta e verificação, permitindo a replicação dos experimentos e a análise de resultados adicionais.

5.2 Testes da Infraestrutura

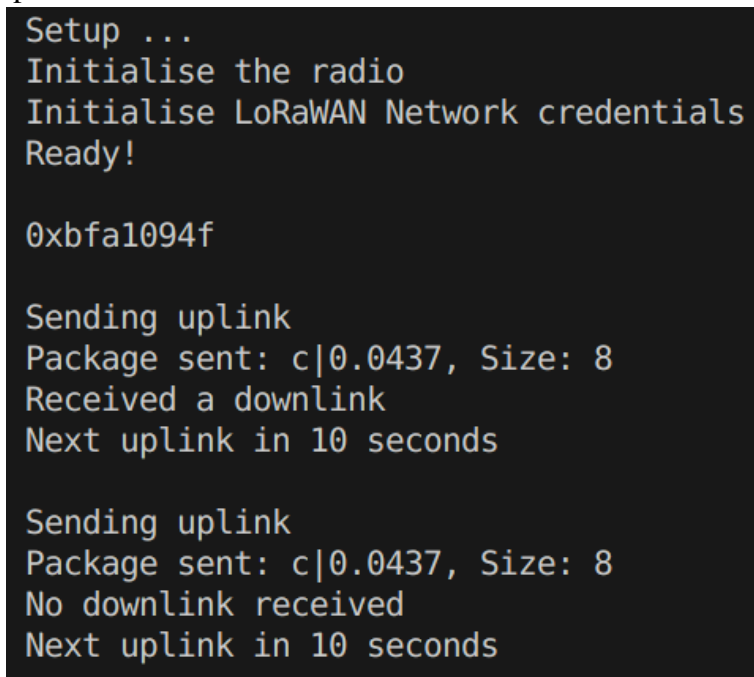
O processo de testes da infraestrutura foi realizado para validar a comunicação entre o dispositivo final (placa TTGO), o gateway LoRaWAN, o servidor de aplicação com a plataforma FIWARE e a visualização no dashboard Grafana. O objetivo foi garantir que os dados coletados pelo dispositivo final fossem corretamente transmitidos, processados e exibidos no dashboard Grafana.

¹ https://github.com/hugosantosbessa/TCC_Hugo_Bessa_UFC

5.2.1 Comunicação com a Placa TTGO

O primeiro passo foi a verificação da comunicação entre o dispositivo final (placa TTGO LoRa32 SX1276 OLED) e o gateway LoRaWAN. A placa TTGO foi configurada para enviar pacotes de dados periodicamente, a cada dez segundos, e no terminal do servidor, foi possível observar as transmissões de pacotes. A Figura 24 mostra que o terminal exibe a comunicação serial da placa, mostrando que os pacotes estavam sendo enviados com sucesso.

Figura 24 – Terminal exibindo a comunicação serial com a placa TTGO



```
Setup ...  
Initialise the radio  
Initialise LoRaWAN Network credentials  
Ready!  
  
0xbfa1094f  
  
Sending uplink  
Package sent: c|0.0437, Size: 8  
Received a downlink  
Next uplink in 10 seconds  
  
Sending uplink  
Package sent: c|0.0437, Size: 8  
No downlink received  
Next uplink in 10 seconds
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

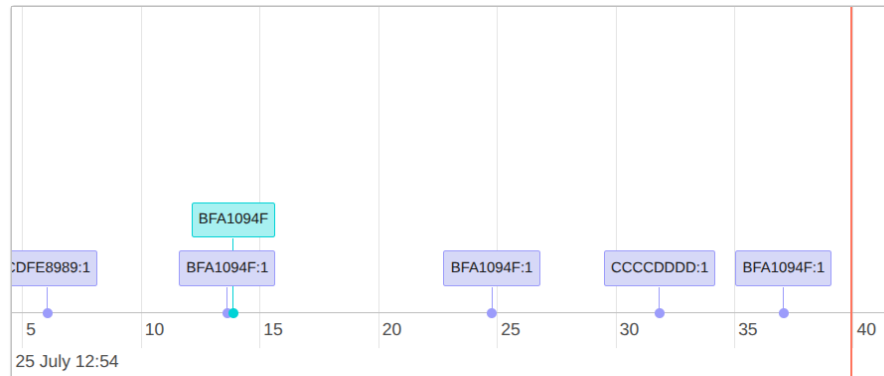
5.2.2 Dashboard com Notificações de Pacotes

Após a transmissão dos pacotes, o gateway LoRaWAN recebeu os pacotes enviados pela placa TTGO e os encaminhou para o servidor. No dashboard do servidor LoRaWAN, foram exibidas notificações de que os pacotes estavam chegando corretamente. A Figura 25 ilustra o momento em que o servidor recebeu e registrou os pacotes.

5.2.3 Frames no Servidor LoRaWAN

A terceira etapa consistiu na visualização dos pacotes diretamente no servidor LoRaWAN. Na Figura 26, é possível observar os frames enviados pelo dispositivo final, que

Figura 25 – Dashboard exibindo as notificações dos pacotes recebidos pelo servidor LoRaWAN.



Fonte: Elaborado pelo autor.

foram processados corretamente pelo servidor, confirmando que os pacotes estavam sendo recebidos e registrados conforme esperado.

Figura 26 – Frames do servidor LoRaWAN exibindo os pacotes recebidos corretamente.

↑	2025-07-25 12:54:24	Current Sensor Handler	BFA1094F	B827EB0000853FF6	-111	3.5	1	×	1	637C302E30343337	[ASCII] c[0.0437
↓	2025-07-25 12:54:13	Current Sensor Handler	BFA1094F	B827EB0000853FF6			1	×			
↑	2025-07-25 12:54:13	Current Sensor Handler	BFA1094F	B827EB0000853FF6	-108	5.2	0	×	1	637C302E30343337	

Fonte: Elaborado pelo autor.

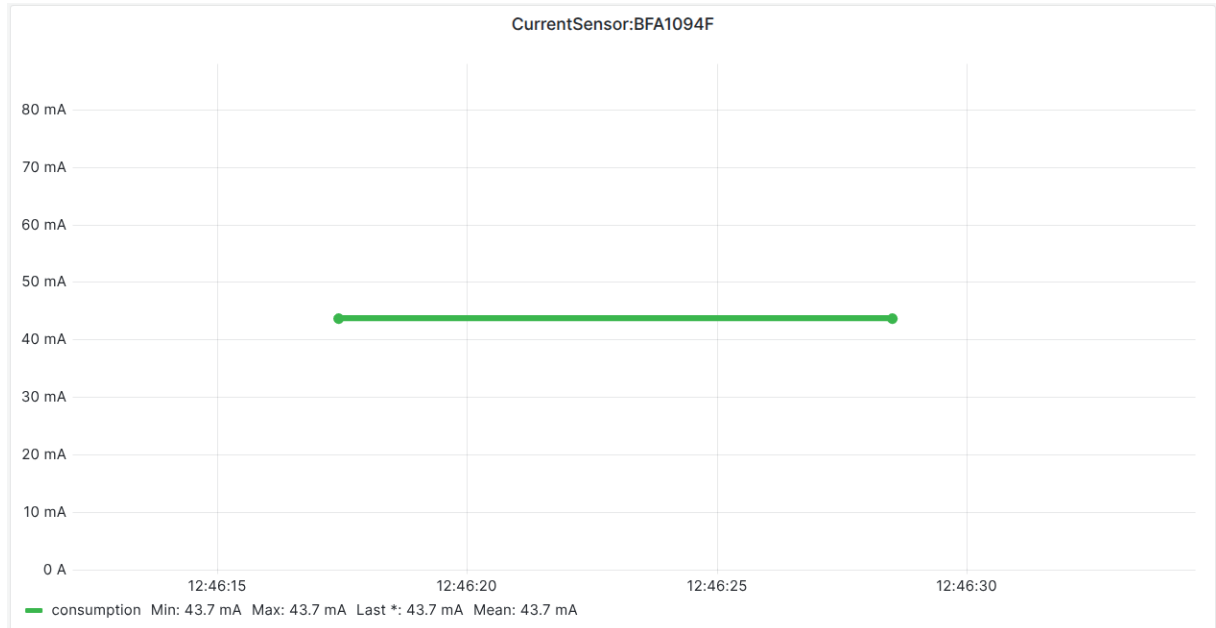
5.2.4 Visualização no Grafana

Finalmente, os dados processados pelo servidor foram enviados para a plataforma Grafana para visualização. O dashboard do Grafana foi configurado para exibir graficamente os dados de consumo energético, permitindo uma análise em tempo real dos pacotes recebidos. A Figura 27 exibe a visualização no Grafana, apresentando o consumo de energia de forma clara e detalhada.

5.3 Avaliação de Desempenho

A avaliação de desempenho teve como objetivo analisar a eficiência da infraestrutura IoT implantada no campus da UFC em Quixadá, considerando o sistema LoRaWAN para monitoramento energético. As métricas de comunicação, como SNR, RSSI e Taxa de Sucesso de Envio de Pacotes, foram utilizadas para medir a qualidade da rede. Além disso, foi realizada

Figura 27 – Dashboard no Grafana exibindo visualmente os pacotes enviados e o consumo registrado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

uma análise do delay de envio de pacotes para verificar a latência da transmissão de dados entre os dispositivos finais e os servidores de rede.

5.3.1 Análise das Métricas de Comunicação

Nesta seção, são apresentadas as análises das principais métricas de comunicação coletadas durante os testes do sistema LoRaWAN, que incluem RSSI e SNR, com o objetivo de avaliar o desempenho da comunicação entre o dispositivo final e o gateway. O RSSI é calculado pelo gateway com base na potência do sinal recebido, indicando a intensidade do sinal entre o dispositivo final e o gateway. Já o SNR é calculado pela diferença entre a potência do sinal útil e a potência do ruído, fornecendo uma medida da qualidade da comunicação.

Embora o número de pacotes enviados tenha sido o mesmo para cada valor de SF, é importante destacar que os pacotes foram transmitidos em momentos distintos, em dias e horários diferentes, conforme mostrado na Tabela 2. O horário de funcionamento do campus, das 8h às 22h, pode afetar a intensidade do sinal e o nível de interferência, já que a quantidade de dispositivos conectados à rede e a utilização de outros sistemas de comunicação variam ao longo do dia. Isso pode impactar diretamente a comunicação entre o dispositivo final e o Gateway, independentemente do SF, refletindo as condições dinâmicas do ambiente de operação durante o período de coleta dos dados.

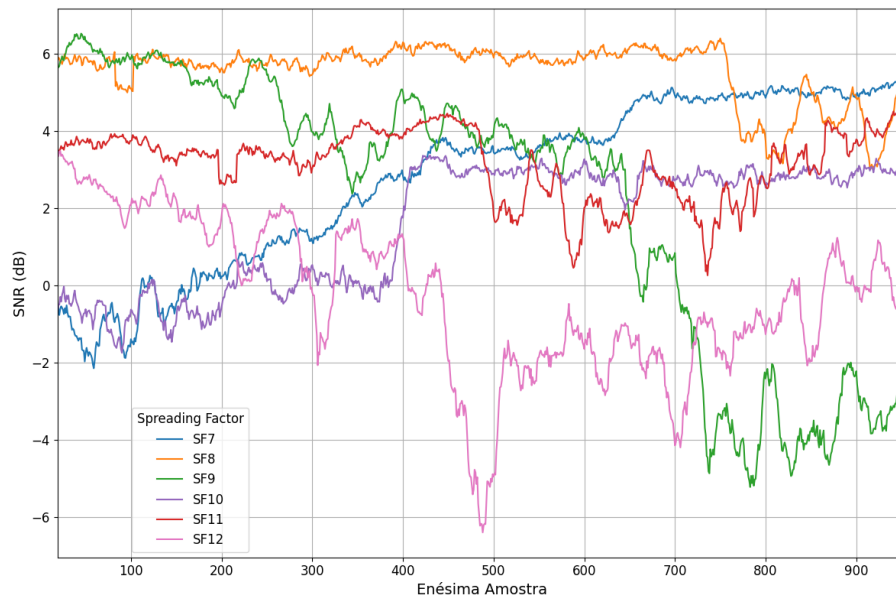
Tabela 2 – Horários de Realização dos Testes para Cada SF

SF	Data e Hora de Início	Data e Hora de Término
SF7	2025-07-22 15:56:22	2025-07-23 00:48:48
SF8	2025-07-23 00:49:20	2025-07-23 09:42:36
SF9	2025-07-23 09:43:08	2025-07-23 18:37:58
SF10	2025-07-23 18:38:30	2025-07-24 03:36:06
SF11	2025-07-24 03:36:39	2025-07-24 12:41:49
SF12	2025-07-24 12:42:22	2025-07-24 21:58:33

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 28 ilustra o gráfico de SNR para cada SF. O SNR reflete a relação entre o sinal transmitido e o ruído de fundo, sendo um indicativo importante da qualidade da comunicação. Valores mais altos de SNR indicam uma maior relação entre o sinal útil e o ruído de fundo, o que resulta em uma comunicação mais clara e com menor probabilidade de erros de transmissão devido à interferência. Observa-se que o SF8 apresenta os melhores valores de SNR, enquanto o SF12 tem valores mais variados.

Figura 28 – Gráfico SNR por SF

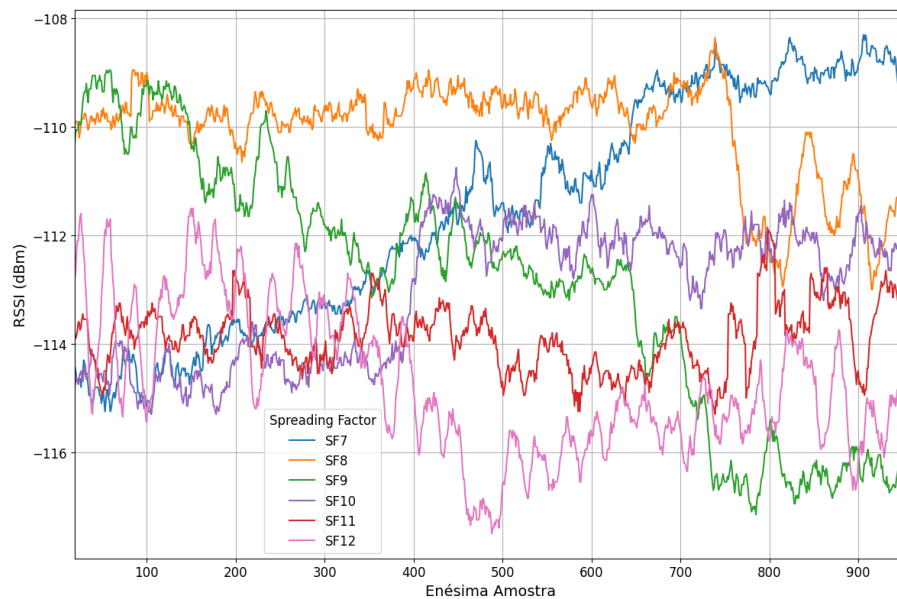


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 29 mostra o gráfico de RSSI em função das amostras para diferentes Spreading Factors (SF). Os valores de RSSI indicam a intensidade do sinal recebido pelo dispositivo, com valores mais próximos de zero representando um sinal mais forte. Os valores de RSSI variam conforme os diferentes SFs testados, refletindo a intensidade do sinal recebido sob condições específicas de cada teste. Dentro dessas condições, observa-se que o SF8 apresentou os valores de RSSI mais elevados, enquanto o SF12 apresentou os menores. Esse comportamento sugere que o RSSI pode estar correlacionado ao SNR do ambiente, com uma relação entre a

intensidade do sinal recebido e a qualidade da comunicação no contexto dos testes realizados.

Figura 29 – Gráfico RSSI por SF



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 3 resume as principais métricas de comunicação para os diferentes Spreading Factors (SF7 a SF12), fornecendo uma visão clara das variações nos valores de SNR, RSSI e Taxa de Sucesso em função do SF utilizado.

Tabela 3 – Métricas de Envio de Pacote por SF

Métrica	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Média SNR (dB)	2.8	5.5	2.0	1.6	3.1	-0.2
Média RSSI (dBm)	-111.5	-110.1	-113.0	-113.0	-113.9	-114.7
Taxa de Sucesso (%)	98.8	99.2	99.6	99.1	99.9	95.6

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Análise do Time On Air

Nesta subseção, são apresentados os resultados do delay de envio de pacotes (Time On Air - ToA) para diferentes SF's, com base nas medições realizadas utilizando a placa TTGO LoRa32 SX1276 OLED.

A Figura 30 mostra os tempos de envio para SF7, SF8, e SF9, enquanto a Figura 31 mostra o tempo de envio para SF10, SF11 e SF12. Similarmente, o aumento do SF resulta em tempos mais longos para o envio de pacotes. O SF7 tem o menor tempo de envio (62 ms), seguido por SF8 (114 ms) e SF9 (206 ms), corroborando a relação esperada entre SF e ToA. Por

consequente, os valores observados para SF10, SF11, e SF12 são, respectivamente, 371 ms, 824 ms, e 1483 ms.

Figura 30 – Time On Air - SF7, SF8, SF9

```
Sending uplink
Set SF for SF7
Payload Size: 10
62 milliseconds to send

Sending uplink
Set SF for SF8
Payload Size: 10
114 milliseconds to send

Sending uplink
Set SF for SF9
Payload Size: 10
206 milliseconds to send
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Time On Air - SF10, SF11, SF12

```
Sending uplink
Set SF for SF10
Payload Size: 10
371 milliseconds to send

Sending uplink
Set SF for SF11
Payload Size: 10
824 milliseconds to send

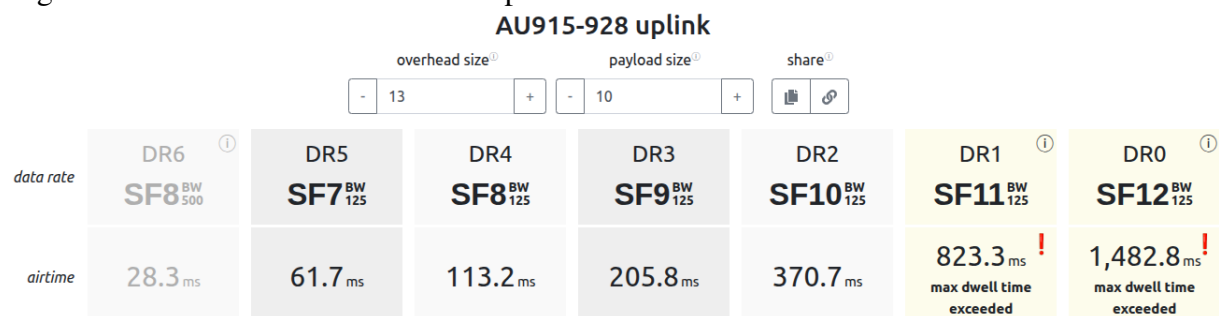
Sending uplink
Set SF for SF12
Payload Size: 10
1483 milliseconds to send
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 32 exibe os tempos de envio de pacotes calculados pela ferramenta Airtime Calculator for LoRaWAN (Arjan, 2019). Os resultados obtidos com a TTGO mostram-se consistentes com os valores calculados na ferramenta, validando a precisão do cálculo do Time On Air. Por exemplo, os tempos calculados para SF10, SF11 e SF12 foram, respectivamente, 411.6 ms, 823.3 ms e 1646.6 ms, muito próximos dos valores medidos com a TTGO (412 ms, 824 ms e 1482.8 ms).

Essa concordância entre os resultados empíricos e os valores calculados mostra que os tempos de envio de pacotes, ou Time On Air, para diferentes SF's estão de acordo com as expectativas, e que a medição realizada com a TTGO foi precisa.

Figura 32 – Calculadora Time On Air para LoRaWAN



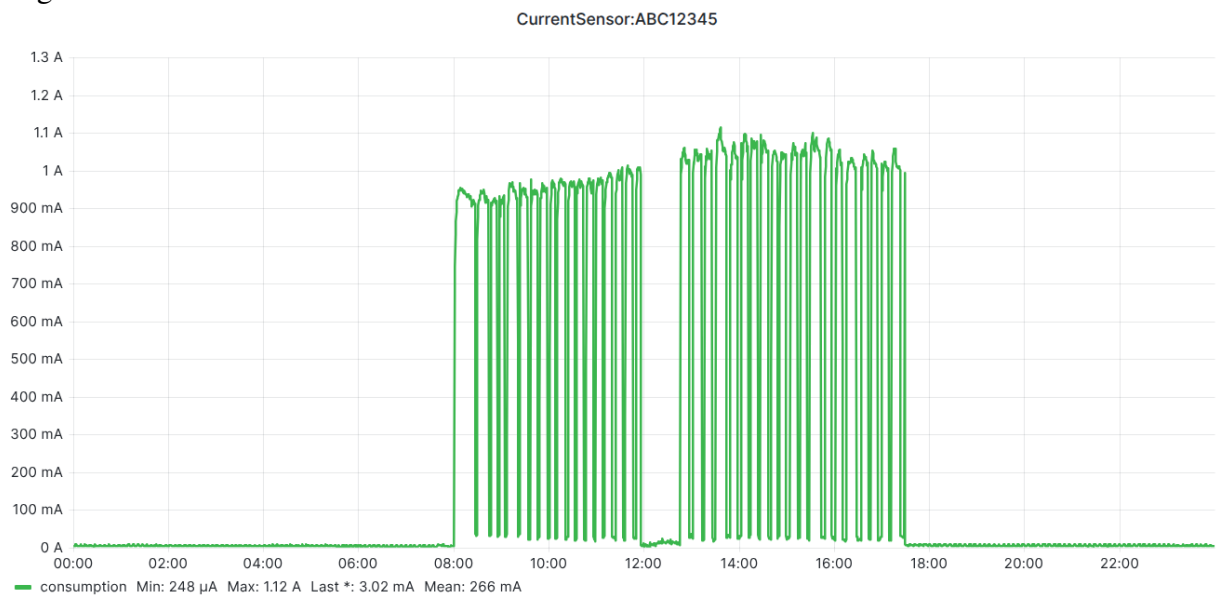
Fonte: Arjan (2019)

5.4 Coleta de Dados

A visualização de dados foi realizada utilizando o dashboard Grafana, que permitiu monitorar o consumo energético do ar condicionado modelo Split Springer Midea 42MACA18S5 (Midea, 2019). Este modelo de ar condicionado utiliza uma tecnologia convencional On/Off, o que significa que ele opera em ciclos de liga/desliga, ao invés de uma regulação contínua de temperatura.

A Figura 33 exibe o consumo diário do ar condicionado no dia 17/07/2025 (quinta-feira). O gráfico mostra os períodos em que o dispositivo foi ligado, a partir de 08:01:17, e desligado, às 17:28:47. Além disso, são visíveis os ciclos de operação On/Off típicos dessa tecnologia. Durante o período de operação, os valores de corrente variaram entre um mínimo de 72 μ A e um máximo de 1,10 A, com uma média de 208 mA.

Figura 33 – Consumo do dia 17/07/2025

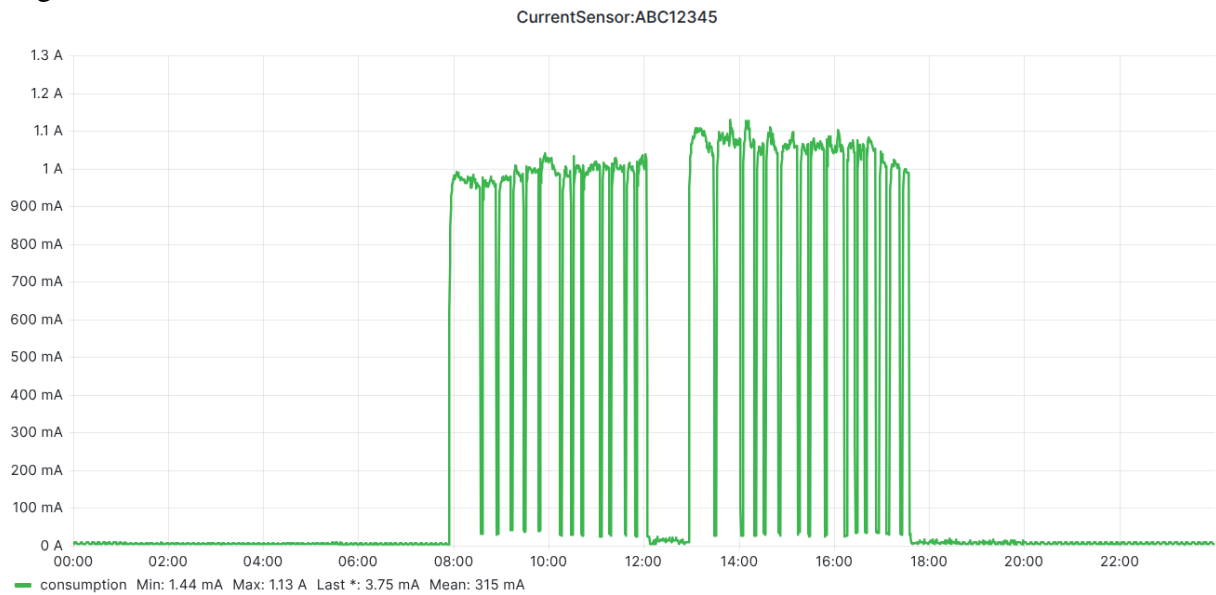


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 exibe o consumo diário do ar condicionado no dia 24/07/2025, que também foi uma quinta-feira, assim como o dia 17/07/2025. Ao escolher o mesmo dia da semana, é possível observar os padrões de consumo ao longo de dias semelhantes. O gráfico mostra os períodos em que o dispositivo foi ligado, a partir de 07:54:47, e desligado, às 17:33:01. Além disso, são visíveis os mesmos ciclos de operação On/Off típicos dessa tecnologia convencional. Durante o período de operação, os valores de corrente variaram entre um mínimo de 1,44 mA e um máximo de 1,13 A, com uma média de 315 mA.

A Figura 35 exibe o consumo semanal do ar condicionado entre os dias 04/07/2025

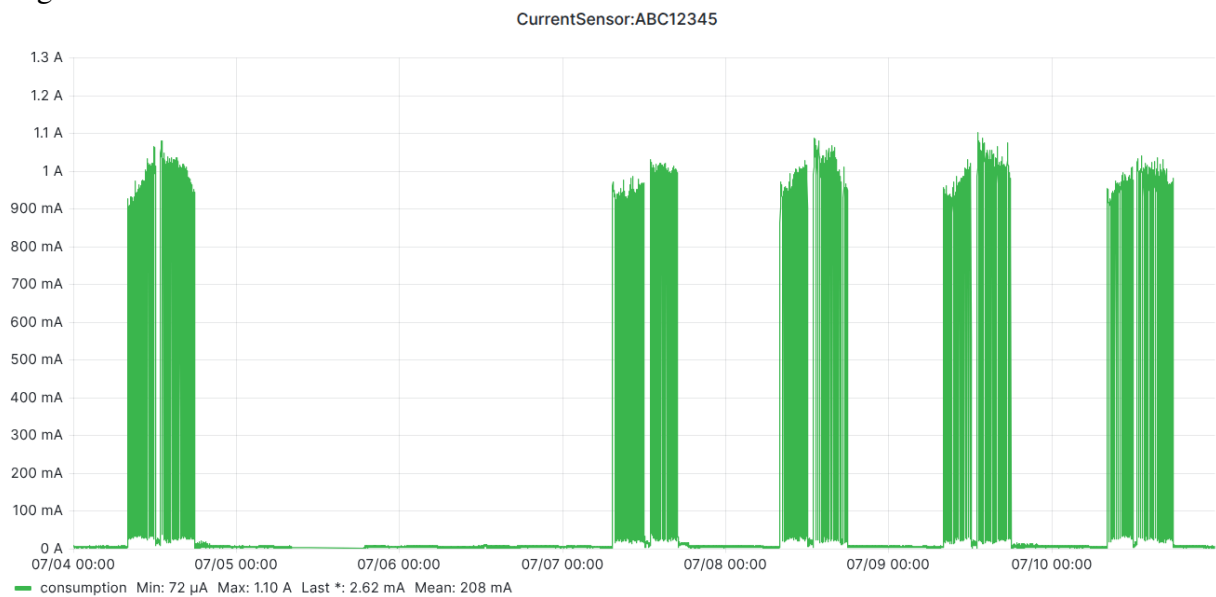
Figura 34 – Consumo do dia 24/07/2025



Fonte: Elaborado pelo autor.

(sexta-feira) e 10/07/2025 (quinta-feira). A escolha de uma semana inteira permite observar padrões de consumo ao longo de vários dias consecutivos. O gráfico mostra que, durante a semana, o dispositivo foi ligado nos dias úteis (sexta-feira a quinta-feira), mas não foi ligado entre sábado e domingo, evidenciando os períodos de descanso. Durante os ciclos de operação, os valores de corrente variaram entre um mínimo de 72 μ A e um máximo de 1,10 A, com uma média de 208 mA.

Figura 35 – Consumo entre os dias 04/07/2025 a 10/07/2025

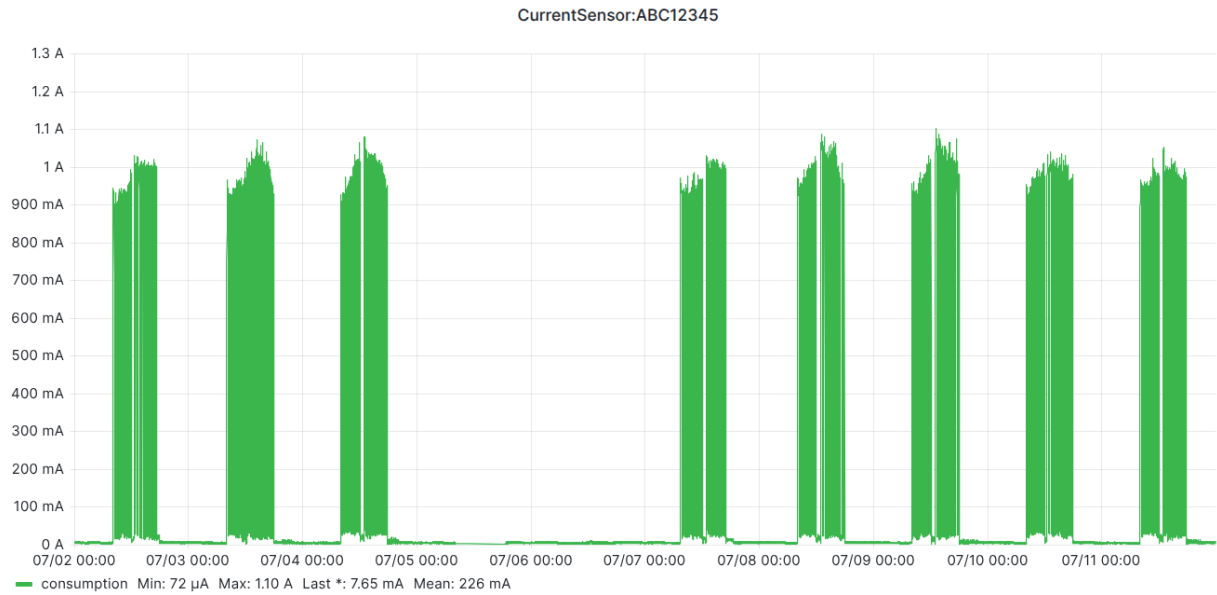


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 36 exibe o consumo do ar condicionado entre os dias 02/07/2025 (quarta-

feira) e 11/07/2025 (sexta-feira), cobrindo um período mais extenso de dez dias de funcionamento. Este intervalo de coleta de dados permite observar um padrão de consumo mais longo, com o dispositivo operando de forma contínua durante os dias úteis e o final de semana. Durante os ciclos de operação, os valores de corrente variaram entre um mínimo de 72 μA e um máximo de 1,10 A, com uma média de 226 mA.

Figura 36 – Consumo entre os dias 02/07/2025 a 11/07/2025



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo a implantação de uma infraestrutura IoT baseada no protocolo LoRaWAN para o monitoramento energético no campus da UFC em Quixadá, promovendo o monitoramento energético por meio de uma solução escalável, robusta e de baixo custo. O protocolo LoRaWAN, com suas características de longo alcance e baixo consumo energético, mostrou-se altamente eficaz no envio de pacotes de dados, especialmente em um ambiente com grandes distâncias e desafios de cobertura. A escolha dessa tecnologia, juntamente com a plataforma FIWARE, que processa e armazena os dados, permitiu a construção de um sistema capaz de oferecer visibilidade em tempo real do consumo energético do campus.

A análise das métricas de comunicação, como SNR, RSSI e taxa de sucesso de envio de pacotes, revelou que o sistema LoRaWAN apresentou um excelente desempenho, mesmo em cenários com diferentes SF's. Os resultados mostraram que a comunicação se manteve estável e eficiente, com altas taxas de sucesso, mesmo em condições adversas de sinal.

A integração do Grafana com o sistema de monitoramento permitiu uma visualização intuitiva e detalhada dos dados coletados, facilitando a análise do consumo energético e a identificação de padrões de uso. Essa visualização, somada à interface simples e eficaz da plataforma, proporcionou uma solução de fácil operação para gestores e técnicos, garantindo uma monitorização em tempo real e contribuindo para uma gestão mais inteligente e sustentável.

Os testes de campo realizados com o dispositivo final (placa TTGO LoRa32 SX1276 OLED) e o gateway LoRaWAN confirmaram a viabilidade e a robustez da solução. A coleta de dados e a visualização em tempo real evidenciaram a precisão das medições, contribuindo para um diagnóstico energético mais preciso e à implementação de medidas para reduzir o desperdício de energia.

6.1 Trabalhos Futuros

Como próximos passos para o aprimoramento do sistema, destacam-se as seguintes abordagens:

6.1.1 *Análise de Dados sobre o Padrão de Consumo*

A implementação de técnicas de análise de dados pode ser explorada para identificar padrões de consumo mais detalhados ao longo do tempo. Isso permitirá uma compreensão mais

profunda das flutuações e tendências de uso de energia, facilitando a adoção de estratégias de otimização mais eficientes.

6.1.2 Monitoramento de Diferentes Aparelhos

Uma futura expansão do sistema pode incluir a monitoração de diferentes tipos de aparelhos e dispositivos no campus, além dos ar-condicionados. Isso proporcionará uma visão mais abrangente do consumo energético em diversas áreas e equipamentos do campus.

6.1.3 Monitoramento de Múltiplos Aparelhos Simultaneamente

A implementação de soluções para monitoramento simultâneo de múltiplos aparelhos no mesmo ambiente ajudaria a otimizar ainda mais o uso de energia, permitindo que os gestores monitorem vários dispositivos de maneira integrada e eficiente.

6.2 Limitações

Apesar dos avanços e da eficácia da solução proposta, algumas limitações foram identificadas durante a implementação e operação do sistema, as quais podem ser aprimoradas em futuras versões do projeto:

6.2.1 Falta de Acesso a Outros Tipos de Medição

O trabalho não contou com acesso a outros tipos de dispositivos de medição que poderiam ser usados para validar a exatidão das medições do consumo energético do ar-condicionado. A comparação entre diferentes métodos de medição ajudaria a garantir maior precisão e confiabilidade nos dados coletados, permitindo uma avaliação mais robusta da eficiência do sistema de monitoramento. Essa limitação pode ser abordada com a integração de dispositivos de medição complementares ou com a implementação de técnicas de calibração mais avançadas para garantir a precisão das medições realizadas, proporcionando uma análise mais precisa do consumo energético.

Em síntese, a infraestrutura IoT baseada em LoRaWAN proposta se mostrou eficaz no monitoramento do consumo de energia, ao mesmo tempo que proporcionou uma plataforma robusta e acessível para visualização e controle de dados, alinhada com as necessidades de um campus universitário moderno e sustentável. O sucesso deste projeto abre caminho para

futuras implementações em outras instituições, visando à otimização dos recursos energéticos e à promoção da eficiência em larga escala.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL. **Cartilha Orientativa Internet das Coisas (IoT/M2M)**. 2020. Disponível em: <https://sistemas.anatel.gov.br/anexar-api/publico/anexos/download/a028ab5cc4e3f97442830bba0c8bd1dd>. Acesso em: 7 fev. 2025.
- AL FAJAR, M. C.; SAMIJAYANI, O. N. Realtime greenhouse environment monitoring based on lorawanprotocol using grafana. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND SMART DEVICES (ISESD), 2021. **Proceedings [...]**. [S. l.]: IEEE, 2021. p. 1–5.
- AMURIM, A. D. T.; SILVA, J. I. M. d.; ORTIZ, M. D.; REGO, P. A. L.; SOUZA, J. N. d. Uma solução de iot baseada no fiware para gerenciamento de recursos energéticos e serviços acadêmicos em um campus universitário. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO URBANA (COURB). **Anais [...]**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2021. p. 265–278. ISSN 2595-2706. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/courb/article/view/17119>. Acesso em: 16 jan. 2025.
- ANJOS, R. M. d.; LIMA, T. d. S. R. d.; RAMOS, T. G.; PEREIRA, E. M.; CASTRO, D. d. S. R. Sistema de monitoramento de uso de energia para o campus universitário ufam-icet utilizando internet das coisas. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (CONBREPRO). **Anais [...]**. Ponta Grossa, PR: CONBREPRO, 2023.
- ARAUJO, V.; MITRA, K.; SAGUNA, S.; ÅHLUND, C. Performance evaluation of fiware: A cloud-based iot platform for smart cities. **Journal of Parallel and Distributed Computing**, v. 132, p. 250–261, 2019. ISSN 0743-7315. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743731519300164>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- ARJAN. **Airtime Calculator - TTN AU915**. 2019. Disponível em: <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/au915>. Acesso em: 24 jul. 2025.
- ASHTON, K. That 'internet of things' thing. **RFID Journal**, 2009. Disponível em: <https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. **Computer Networks**, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- BARRETO JUNIOR, C. R.; PEREIRA, A. A. d. S.; TREVIZANO, W. A.; CAMPOS, S. C. Sistema de monitoramento em tempo real do consumo de energia elétrica no centro universitário governador ozanam coelho. **Caderno Científico UNIFAGOC de Graduação e Pós-Graduação**, UNIFAGOC, Ubá, v. 6, n. 2, 2020. Disponível em: <https://revista.unifagoc.edu.br/caderno/article/view/733>. Acesso em: 18 jan. 2025.
- CABRAL, R. d. A. C. **Um estudo sobre a eficiência energética em sistemas IoT com diferentes tipos de comunicação**. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação), Campus de Quixadá, Quixadá, 2019.
- CASTELLS, M. **The Rise of the Network Society: The information age: Economy, society, and culture**. 2nd. ed. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2010. v. 1.
- CENTENARO, M.; VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios. **IEEE Wireless Communications**, IEEE, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.

CIRILLO, F.; SOLMAZ, G.; BERZ, E. L.; BAUER, M.; CHENG, B.; KOVACS, E. A standard-based open source iot platform: Fiware. **IEEE Internet of Things Magazine**, v. 2, n. 3, p. 12–18, 2019.

DOMÍNGUEZ-BOLAÑO, T.; BARRAL, V.; ESCUDERO, C. J.; GARCÍA-NAYA, J. A. An iot system for a smart campus: Challenges and solutions illustrated over several real-world use cases. **arXiv preprint arXiv:2403.15395**, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2403.15395>. Acesso em: 18 jan. 2025.

FIWARE FOUNDATION. **Open Source Platform for Our Smart Digital Future**. 2022. Disponível em: <https://www.fiware.org/about-us/>. Acesso em: 4 fev. 2025.

GARCIA, M. S.; BITARÃES, T. G.; OLIVEIRA, I. C.; SOUZA, R. V. G. de. Eficiência energética e benchmarking em campi universitários: Oportunidades de pesquisa a partir de análise bibliométrica. In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC). **Anais [...]**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.academia.edu/121772871/Eficiência_Energética_e_Benchmarking_Em_Campi_Universitários_Oportunidades_De_Pesquisa_a_Partir_De_Análise_Bibliométrica. Acesso em: 20 jan. 2025.

GOTTHARDP, P. **Gotthard - Docker Hub**. 2025. Disponível em: <https://hub.docker.com/r/stocard/gotthard>. Acesso em: 24 jul. 2025.

GOTTHARDP, P. **lorawan-server**. 2025. Disponível em: <https://github.com/gotthardp/lorawan-server>. Acesso em: 23 fev. 2025.

GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, Elsevier, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

INGENU. **The Leader in LPWAN Connectivity for IoT Applications**. 2025. Disponível em: <https://www.ingenu.com/company/about-us/>. Acesso em: 4 fev. 2025.

LILYGO. **LoRa32 V1.0**. 2025. Disponível em: <https://lilygo.cc/products/lora32-v1-0>. Acesso em: 10 fev. 2025.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN 1.0.3 Regional Parameters**. 2018. Disponível em: <https://lora-alliance.org>. Acesso em: 7 fev. 2025.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification**. 2020. Disponível em: <https://lora-alliance.org>. Acesso em: 7 fev. 2025.

MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. **ICT Express**, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019.

MIDEA. **Manual de Instalação, Operação e Manutenção - Split Hi Wall**. 2019. Disponível em: https://img.mideadobrasil.com.br/downloads_docs/9c1a2-256.09.088_IOM-SHW-Springer-Midea-D-01-19--view-.pdf. Acesso em: 24 jul. 2025.

NOR, R. F. A. M.; ZAMAN, F. H.; MUBDI, S. Smart traffic light for congestion monitoring using lorawan. In: IEEE 8TH CONTROL AND SYSTEM GRADUATE RESEARCH COLLOQUIUM (ICSGRC), 2017. **Proceedings [...]**. [S. l.]: IEEE, 2017. p. 132–137.

PLATFORMIO. **A Cross-Platform IDE and Unified Debugging System for Embedded Development**. 2025. Disponível em: <https://platformio.org/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

RADIOENGE. **Gateway LoRaWAN**. 2025. Disponível em: <https://www.radioenge.com.br/produto/gateway-lorawan/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SEMTECH CORPORATION. **LoRa™ Modulation Basics**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.semtech.com>. Acesso em: 30 jul. 2025.

SHERAZI, H. H. R.; GRIECO, L. A.; IMRAN, M. A.; BOGGIA, G. Energy-efficient lorawan for industry 4.0 applications. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 17, n. 2, p. 891–902, 2021.

SIGFOX. **Global 0G Network for IoT**. 2025. Disponível em: <https://sigfox.com/what-is-sigfox/>. Acesso em: 4 fev. 2025.

SMARTKITS. **Módulo ADS1115 – Conversor Analógico Digital 16 Bits I2C**. 2025. Disponível em: <https://www.smartkits.com.br/modulo-ads1115-conversor-analogico-digital-16-bits-i2c>. Acesso em: 14 fev. 2025.

SMARTKITS. **Sensor de Corrente Não Invasivo 100A:50mA (SCT-013)**. 2025. Disponível em: <https://www.smartkits.com.br/sensor-de-corrente-nao-invasivo-100a-sct-013>. Acesso em: 14 fev. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Imagem da Placa de Circuito Impresso**. Campus de Quixadá, Quixadá: [S. n.], 2025. Imagem não publicada fornecida pela Universidade Federal do Ceará. Acesso em: 24 jul. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Mapa do Campus da UFC em Quixadá**. Campus de Quixadá, Quixadá: [S. n.], 2025. Disponível em: <https://www.quixada.ufc.br/mapa-do-campus-da-ufc-em-quixada/>. Acesso em: 24 jul. 2025.